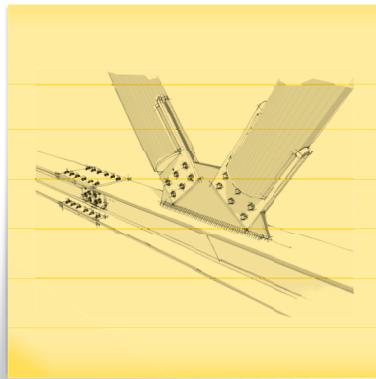


Simone Caffè

# ACCIAIO

**MANUALE TECNICO PER IL PROGETTO E LA VERIFICA  
DELLE STRUTTURE IN ACCIAIO  
E DELLE CONNESSIONI BULLONATE E SALDATE**

AI SENSI DEL D.M. 14 GENNAIO 2008 (NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI)  
E DELLE NORME UNI EN 1993-1-1:2005 E UNI EN 1993-1-8:2005



**SOFTWARE INCLUSO**

FOGLI DI CALCOLO PER LA VERIFICA DI MEMBRATURE E CONNESSIONI



The logo for GRAFILL, featuring the word 'GRAFILL' in a bold, uppercase sans-serif font. Above the letters 'A' and 'I', there are decorative dashed lines that curve upwards and end in small red dots.

# INDICE

PRESENTAZIONE.....	p.	11
INTRODUZIONE.....	"	13
<b>1. PROPRIETÀ DEGLI ACCIAI</b>		
<b>E CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE SEZIONI .....</b>	"	15
<b>1.1. Proprietà degli Acciai .....</b>	"	15
<b>1.2. Prodotti .....</b>	"	22
<b>1.3. Caratteristiche meccaniche delle sezioni.....</b>	"	24
<b>› Scheda tecnica ST1.1</b>		
<i>Sezioni a I e ad H laminate a caldo .....</i>	"	25
<b>› Scheda tecnica ST1.2</b>		
<i>Sezioni a I e ad H saldate .....</i>	"	27
<b>› Scheda tecnica ST1.3</b>		
<i>Sezioni a I e ad H saldate, ad ali disuguali.....</i>	"	29
<b>› Scheda tecnica ST1.4</b>		
<i>Sezioni a T saldate .....</i>	"	32
<b>› Scheda tecnica ST1.5</b>		
<i>Sezioni a C saldate.....</i>	"	35
<b>› Scheda tecnica ST1.6</b>		
<i>Sezioni a L.....</i>	"	38
<b>› Scheda tecnica ST1.7</b>		
<i>Sezioni tubolari .....</i>	"	41
<b>› Scheda tecnica ST1.8</b>		
<i>Sezioni scatolari.....</i>	"	43
<b>› Scheda tecnica ST1.9</b>		
<i>Calcolo dei fattori di warping per sezioni ad I e ad H .....</i>	"	45
<b>› Applicazione A1.1</b>		
<i>Calcolo delle proprietà geometriche</i>		
<i>e meccaniche di una sezione a C .....</i>	"	49
<b>› Applicazione A1.2</b>		
<i>Esempio di calcolo della costante di warping</i>		
<i>di una sezione a "I" con ali non simmetriche .....</i>	"	57

<b>2. CONSIDERAZIONI</b>		
<b>SULL'ANALISI STRUTTURALE GLOBALE</b> .....	p.	59
<b>2.1. Le basi della progettazione (azioni, combinazioni e resistenze)</b> .....	~	59
<b>2.1.1. Azioni di progetto</b> .....	~	59
<b>2.1.2. Combinazione delle azioni</b> .....	~	61
<b>2.1.3. Concetto di Stati Limite</b> .....	~	63
> <b>Scheda tecnica ST2.1</b>		
<i>Combinazione delle azioni</i> .....	~	65
<b>2.2. Modellazione delle strutture e metodi di analisi</b> .....	~	68
<b>2.2.1. Modellazione strutturale</b> .....	~	68
<b>2.2.2. L'analisi globale</b> .....	~	71
<b>2.3. L'analisi strutturale dei telai</b> .....	~	72
<b>2.3.1. Classificazione dei telai</b> .....	~	74
> <b>Applicazione A2.1</b> .....	~	77
> <b>Applicazione A2.2</b> .....	~	79
<b>2.3.2. Effetti del secondo ordine per telai a nodi spostabili</b> .....	~	82
> <b>Applicazione A2.3</b> .....	~	84
<b>2.3.3. Effetti delle imperfezioni nelle strutture</b> .....	~	86
> <b>Applicazione A2.4</b> .....	~	92
<b>3. CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI</b> .....	~	99
<b>3.1. Generalità</b> .....	~	99
<b>3.2. Rapporti dimensionali larghezza-spessore degli elementi compressi</b> .....	~	100
<b>3.3. Classificazione delle sezioni trasversali tese</b> .....	~	104
<b>3.4. Classificazione delle sezioni trasversali compresse</b> .....	~	104
<b>3.5. Classificazione delle sezioni trasversali inflesse</b> .....	~	104
<b>3.6. Classificazione delle sezioni trasversali soggette a presso flessione</b> .....	~	105
> <b>Scheda tecnica ST3.1</b>		
<i>Dominio di transizione di classe</i> .....	~	106
> <b>Applicazione A3.1</b> .....	~	114
> <b>Applicazione A3.2</b> .....	~	116
> <b>Applicazione A3.3</b> .....	~	123
<b>4. RESISTENZA DELLE MEMBRATURE</b> .....	~	134
<b>4.1. Generalità</b> .....	~	134
<b>4.2. Criteri di resistenza delle sezioni trasversali</b> .....	~	134
<b>4.3. Elementi soggetti a trazione pura</b> .....	~	136
> <b>Scheda tecnica ST4.1</b>		
<i>Determinazione dell'area netta <math>A_{net}</math></i> .....	~	138
<b>4.4. Elementi soggetti a compressione pura</b> .....	~	140

4.5.	Elementi soggetti a flessione monoassiale .....	p.	141
4.5.1.	Verifiche agli SLE .....	"	141
4.5.2.	Verifiche agli SLU .....	"	143
	> <b>Applicazione ST4.1</b> .....	"	146
	> <b>Scheda tecnica ST4.2</b>		
	<i>Caratteristiche meccaniche efficaci</i> .....	"	150
4.6.	Elementi soggetti a taglio .....	"	153
4.7.	Elementi soggetti a torsione .....	"	155
4.7.1.	Torsione uniforme .....	"	155
4.7.2.	Torsione non uniforme .....	"	157
4.7.3.	Torsione mista .....	"	157
4.8.	Verifica tensionale elastica delle sezioni soggette ad azioni combinate .....	"	161
	> <b>Applicazione A4.2</b> .....	"	163
4.9.	Resistenza plastica delle sezioni soggette ad azioni combinate .....	"	166
4.9.1.	Taglio e torsione .....	"	166
4.9.3.	Flessione biassiale e taglio .....	"	167
4.9.4.	Flessione e forza assiale in sezioni trasversali di classe 1 o 2 .....	"	168
4.9.5.	Flessione biassiale e forza assiale in sezioni trasversali di classe 1 o 2 .....	"	171
4.9.6.	Flessione biassiale e forza assiale in sezioni trasversali di classe 3 o 4 .....	"	171
4.9.7.	Flessione e torsione .....	"	172
4.9.8.	Flessione, taglio e forza assiale .....	"	172
<b>5.</b>	<b>STABILITÀ DELLE MEMBRATURE</b> .....	"	175
5.1.	Stabilità delle membrature compresse .....	"	175
5.1.1.	Carico critico Euleriano nel caso di instabilità piana dell'asta ideale .....	"	176
5.1.2.	Lunghezza critica: .....	"	178
	> <b>Applicazione A5.1</b> .....	"	184
	> <b>Applicazione A5.2</b> .....	"	189
5.1.3.	Instabilità piana dell'asta reale .....	"	191
5.1.4.	Resistenza delle membrature nei confronti dell'instabilità piana .....	"	195
5.1.5.	Instabilità torsionale o flesso torsionale nelle membrature compresse .....	"	198
	> <b>Applicazione A5.3</b> .....	"	201
5.2.	Stabilità laterale delle membrature inflesse .....	"	204
5.2.1.	Momento critico elastico per la trave ideale .....	"	205
	> <b>Applicazione A5.4</b> .....	"	220
5.3.	Stabilità delle membrature presso-inflesse biassialmente .....	"	228

5.3.1.	Verifica delle sezioni presso-inflesse biassialmente con il METODO 1 .....	p.	230
5.3.2.	Verifica delle sezioni presso-inflesse biassialmente con il METODO 2 .....	~	233
	> <b>Applicazione A5.5</b> .....	~	236
5.4.	Stabilità delle aste compresse composte .....	~	248
	> <b>Applicazione A5.6</b> .....	~	258
<b>6.</b>	<b>PROGETTO E VERIFICA DELLE CONNESSIONI</b> .....	~	263
6.1.	Criteri generali di progettazione .....	~	263
6.1.1.	Premessa .....	~	263
6.1.2.	Coefficienti parziali di sicurezza per le connessioni .....	~	263
6.1.3.	Considerazioni generali sulle connessioni .....	~	264
6.2.	Connessioni bullonate.....	~	264
6.2.1.	Bulloni, dadi e rondelle .....	~	264
6.2.2.	Categorie delle connessioni bullonate.....	~	265
6.2.3.	Dimensione e posizionamento dei fori.....	~	266
6.2.4.	Verifiche dei bulloni per le connessioni in categoria A e D.....	~	268
6.2.5.	Verifiche dei bulloni per le connessioni in categoria B, C ed E .....	~	270
6.2.6.	Distribuzione delle forze nei dispositivi di giunzione agli stati limite ultimi .....	~	272
6.2.7.	Connessioni semplici.....	~	274
	> <b>Scheda tecnica ST6.1</b> <i>Piastra flessibile di estremità</i> .....	~	276
	> <b>Scheda tecnica ST6.2</b> <i>Piastra sottile</i> .....	~	297
	> <b>Scheda tecnica ST6.3</b> <i>Connessione con doppio angolare</i> .....	~	317
	> <b>Scheda tecnica ST6.4</b> <i>Connessioni per travi reticolari</i> .....	~	341
6.2.8.	Connessioni in grado di trasmettere le sollecitazioni flettenti .....	~	350
	> <b>Scheda tecnica ST6.5</b> <i>Connessione con coprigiunti d'ala e anima</i> .....	~	351
	> <b>Applicazione A6.1</b> .....	~	366
6.2.9.	Connessioni di base .....	~	396
	> <b>Scheda tecnica ST6.6</b> <i>Connessioni di base incernierate</i> .....	~	397
	> <b>Applicazione A6.2</b> .....	~	404
	> <b>Scheda tecnica ST6.7</b> .....	~	407

	> <b>Scheda tecnica ST6.8</b>	
	<i>Connessioni di base rigide</i> .....	p. 411
	> <b>Applicazione A6.3</b> .....	" 425
<b>6.3.</b>	Connessioni saldate .....	" 430
	<b>6.3.1.</b> Generalità.....	" 430
	<b>6.3.2.</b> Saldature a cordone d'angolo .....	" 430
	<b>6.3.3.</b> Saldature di testa a completa penetrazione .....	" 431
	<b>6.3.4.</b> Saldature di testa a parziale penetrazione .....	" 432
	<b>6.3.5.</b> Resistenza delle saldature a cordone d'angolo .....	" 432
	> <b>Scheda tecnica ST6.9</b>	
	<i>Connessioni saldate</i> .....	" 434
	> <b>Applicazione A6.4</b> .....	" 446
<b>7.</b>	<b>APPLICAZIONI NUMERICHE</b> .....	" 448
	> <b>Applicazione A7.1</b>	
	<i>Caratteristiche efficaci e stato tensionale elastico</i> .....	" 448
	> <b>Applicazione A7.2</b>	
	<i>Resistenze plastiche di una sezione trasversale</i> .....	" 458
	> <b>Applicazione A7.3</b>	
	<i>Progetto e verifica di un impalcato in acciaio</i> .....	" 465
	> <b>Applicazione A7.4</b>	
	<i>Verifica di un portale incernierato alla base</i> .....	" 474
	> <b>Applicazione A7.5</b>	
	<i>Verifica di una connessione a perno</i> .....	" 514
	> <b>Applicazione A7.6</b>	
	<i>Verifica di una connessione con piastra sottile</i> .....	" 517
	> <b>Applicazione A7.7</b>	
	<i>Verifica di una connessione con coprighiunti</i> .....	" 523
	<b>APPENDICI</b> .....	" 531
	<b>GUIDA AL SOFTWARE</b> .....	" 566
	> Introduzione al software allegato.....	" 566
	> Requisiti minimi hardware e software .....	" 568
	> Download del software e richiesta della password di attivazione.....	" 568
	> Procedura per l'installazione e l'attivazione del software .....	" 568
	> Utilizzo del software .....	" 568
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	" 571

---

## PRESENTAZIONE

Il testo appare unico nel panorama della letteratura tecnica e scientifica destinata agli Operatori più affermati nel campo della progettazione strutturale, sia per facilità di lettura che per praticità di utilizzo. Il professionista è sempre alla ricerca di strumenti aggiornati e di comprensione immediata: difficile trovare pubblicazioni così avanzate e complete nel settore delle connessioni degli elementi in carpenteria metallica. I nuovi disposti normativi prevedono una pluralità di verifiche da eseguirsi sui nodi che spesso richiedono maggiore impegno di quello dedicato alla progettazione complessiva. Con il testo e il supporto informatico predisposto dall'Ing. Simone Caffè si ha finalmente a disposizione un sistema facile, veloce e sicuro per la verifica dei collegamenti più complessi. È un testo che non deve mancare in uno Studio Tecnico di Ingegneria. È auspicabile che a questo esemplare "manuale" ne seguano presto altri di pari efficacia.

Dott. Ing. Aldo Signorelli

## INTRODUZIONE

“L'acciaio rappresenta il materiale da costruzione per eccellenza”. Fin dai tempi dell'Università ho sostenuto quest'affermazione, in accordo con quanto illustrato dal Professor Vladimiro Augusti al tempo docente di Scienza delle Costruzioni e Progetto di Strutture presso la Facoltà di Ingegneria di Genova. L'acciaio infatti possiede un comportamento che si avvicina molto al modello di solido ideale, isotropo e perfettamente elastico concepito da Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant nella metà dell'800. L'accostamento, inizialmente timoroso, ai principi esposti nell'Eurocodice 3 ha stimolato in me la voglia di espandere i confini delle mie conoscenze oltre quelle che sono le basi accademiche, prestando particolare attenzione al calcolo delle connessioni fondato sui principi dell'analisi limite e non più sui metodi tensionali elastici tanto cari agli ingegneri che hanno saputo per anni insegnarci il mestiere del buon costruire.

La mia ricerca si è spinta oltre i confini delle pubblicazioni italiane e sebbene apprezzai di esse la chiarezza e l'approfondimento delle parti teoriche (nelle quali noi Italiani siamo maestri), ho trovato grande soddisfazione e stupore nello scoprire il sito internet dell'Access Steel (<http://www.access-steel.com>) che mi ha permesso di apprendere nuove tecniche risolutive basate sulle Norme di calcolo internazionali utilizzando lo stile conciso e sintetico tipico dei “quaderni tecnici” dell'Italsider, sul quale noi tutti abbiamo avuto il piacere di studiare la Tecnica delle costruzioni. Sono rimasto sempre affascinato dai suddetti quaderni, scritti a mano eppure straordinariamente chiari, ordinati e precisi, ricchi di disegni esplicativi e di tabelle volte a “velocizzare” e “semplificare” la parte computazionale, al fine di lasciare maggior spazio alla “creatività progettuale” che, in ultima analisi, è ciò che fa del nostro mestiere un atto di assoluta volontà. Ispirato da ciò, ho voluto redigere un manuale che ricalcasse lo spirito che aleggiava in quelle pagine ingiallite, cercando di sintetizzare i concetti teorici per dar maggior spazio alle tecniche di risoluzione, facendo tesoro dell'esperienza maturata negli anni e legata alla creazione di fogli di calcolo, ho cercato (senza esserci sempre riuscito) di realizzare un testo che possedesse “un ordine” logico atto a facilitare e stimolare l'implementazione delle numerose formule, sovente complesse, all'interno di software di calcolo. Nascono in questo modo le cosiddette “schede tecniche” di cui il manuale è ricco, nelle quali viene dato un ordine alle procedure espresse nei testi normativi, troppo spesso confusionari e colmi di rimandi che ne rendono farraginoso l'esecuzione. Ad esse ho in molti casi associato le “applicazioni numeriche”, volte a dare immediata evidenza pratica a sostegno e spiegazione degli aspetti puramente teorici.

Il risultato di questi sforzi di sintesi, uniti ai tempi stretti di redazione, hanno necessariamente portato a tralasciare alcuni argomenti di grande importanza quali l'instabilità a taglio delle travi a “parete piena” e gli aspetti legati alla fatica o alla dinamica delle strutture in acciaio. Mi scuso pertanto con quella cerchia di lettori che avrebbe avuto il piacere di

sfogliare un manuale veramente completo che possedesse il pregio di toccare tutti i grandi temi legati alla progettazione delle strutture metalliche, sperando tuttavia in una seconda possibilità editoriale che permetta di “colmare i vuoti”.

Nella stesura del testo ho cercato di citare le fonti di immagini e procedure numeriche di risoluzione ogni qualvolta mi sia stato possibile recuperarne la paternità certa, restano tuttavia alcune inevitabili lacune delle quali mi scuso anticipatamente.

Concludo con la speranza che il mio sforzo si possa tradurre in una lettura piacevole ed interessata sia da parte degli studenti di Ingegneria ed Architettura, sia da parte di tecnici e professionisti che posseggano ancora “il gusto difficile” di non smettere mai di voler apprendere.

Simone Caffè

## PROPRIETÀ DEGLI ACCIAI E CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE SEZIONI

### › 1.1. Proprietà degli Acciai

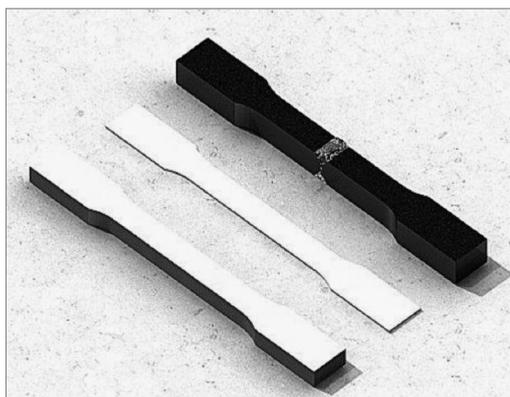
Gli “acciai” sono particolari leghe di ferro e carbonio che si distinguono le une dalle altre in funzione della loro composizione chimica e, in particolare, della percentuale C di carbonio (o tenore di carbonio) presente nel materiale.

Il carbonio aumenta considerevolmente le caratteristiche di resistenza degli acciai, ma ne riduce sensibilmente la duttilità ovvero la capacità di manifestare grandi deformazioni plastiche prima di giungere a rottura. In particolare, per la progettazione sismica, il requisito di duttilità è di grande importanza perché legato alle ipotesi di base dei metodi allo stato limite ultimo e dell’analisi limite oltre che alla risposta globale di un edificio nei confronti delle forze orizzontali ed in particolare degli effetti del sisma.

Per queste ragioni gli acciai da carpenteria per costruzioni civili ed industriali sono caratterizzati da un basso tenore di carbonio (C compreso tra 0.1% e 0.3%) e il controllo del tenore di carbonio è specificato dalle norme.

Oltre al carbonio sono solitamente presenti il manganese, il silicio e in taluni casi, il cromo ed il nichel. In generale questi elementi servono a garantire un aumento delle caratteristiche meccaniche, di saldabilità e di resistenza alla corrosione.

La legge costitutiva dell’acciaio viene comunemente descritta sottoponendo un provino in acciaio avente dimensioni standardizzate, ad una prova di trazione monoassiale. La prova consente di ricavare la curva carico-allungamento dalla quale, note le caratteristiche della macchina di prova e la geometria del provino, sono deducibili i diagrammi tensione ( $\sigma$ ) – deformazione ( $\epsilon$ ).



**Figura 1.1.** Tipologie dei provini per le prove di trazione monoassiale  
[fonte: <http://www.genesisgroup.com>]

Risulta infatti:

$$F = E \cdot S_0 \cdot \varepsilon = E \cdot S_0 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (1.1)$$

dove:

F rappresenta la forza di trazione applicata al provino;

$S_0$  rappresenta l'area nominale del provino;

$L_u$  rappresenta la distanza ultima tra i riferimenti presi sul provino;

$L_0$  rappresenta la distanza iniziale tra i riferimenti presi sul provino.

La distanza iniziale  $L_0$  può essere assunta convenzionalmente pari a:

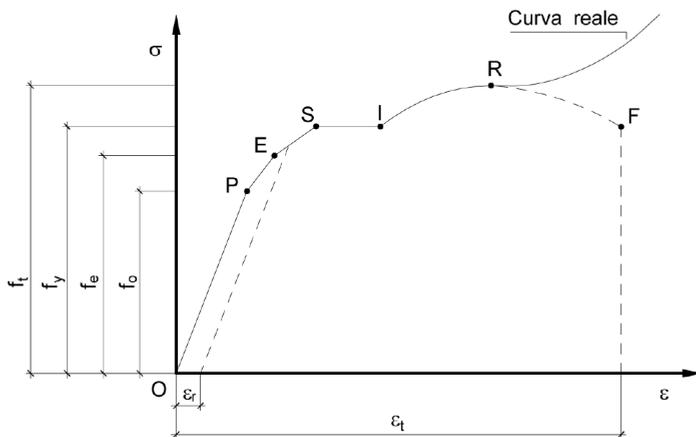
$$L_0 = 5.65 \cdot \sqrt{S_0} \quad (1.2)$$

Le modalità di prova sono descritte nella norma UNI EN 10002-1 (CEN, 2001).

In funzione dei risultati derivanti dalla suddetta prova, si ricavano i diagrammi tensione-deformazione per gli acciai extra-dolci, semi-duri ed extra-duri.

### *Acciai extra-dolci e semi-duri*

Il diagramma  $\sigma - \varepsilon$  tipico degli acciai extra-dolci e semi-duri è riportato nella figura 1.2:



**Figura 1.2.** Diagramma sforzi-deformazioni per gli acciai extra-dolci e semi-duri  
[fonte: Ballio G., Mazzolani F., *Strutture in Acciaio*, Hoepli]

#### *Tratto OP (da zero al limite di proporzionalità)*

In questo tratto il comportamento del materiale è perfettamente elastico, le tensioni crescono dal valore nullo fino al valore  $f_0$  detto “limite di proporzionalità”.

Il legame sforzi-deformazioni è lineare e la pendenza della retta è definita dal modulo di elasticità normale o modulo di Young:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.3)$$

*Tratto PE (dal limite di proporzionalità al limite di elasticità)*

Il comportamento del materiale è ancora elastico (ovvero una volta scaricato il provino, la deformazione residua  $\varepsilon_r$  è pari a zero), ma non lineare e definito dal modulo istantaneo detto “modulo tangente”:

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (1.4)$$

Le tensioni variano tra il valore  $f_0$  ed il valore  $f_e$  detto “limite di elasticità”.

*Tratto ES (dal limite di elasticità al limite di snervamento)*

Il comportamento del materiale non è più elastico ovvero una volta scaricato il provino, permane una deformazione residua  $\varepsilon_r$ . Le tensioni variano tra il valore  $f_e$  ed il valore  $f_y$  detto “valore di snervamento” (“yield” in lingua inglese).

*Tratto SI (dal limite di snervamento al limite di incrudimento)*

Raggiunto il valore  $f_y$ , gli acciai extra-dolci manifestano un allungamento spontaneo senza incrementi di tensione fino a raggiungere l’inizio del fenomeno di incrudimento.

*Tratto IR (dal limite di incrudimento al limite di rottura)*

L’incrudimento si manifesta con una ripresa di resistenza del materiale le cui tensioni aumentano dal valore  $f_y$  fino al valore limite di rottura  $f_t$  (punto massimo del diagramma).

*Tratto RF (dal limite di rottura al raggiungimento dell’allungamento ultimo)*

Raggiunto il valore  $f_t$  il diagramma tensioni-deformazioni presenta un tratto discendente detto rammollente di “softening, fino a raggiungere l’allungamento ultimo di rottura  $\varepsilon_t$  corrispondente all’effettiva rottura del provino.

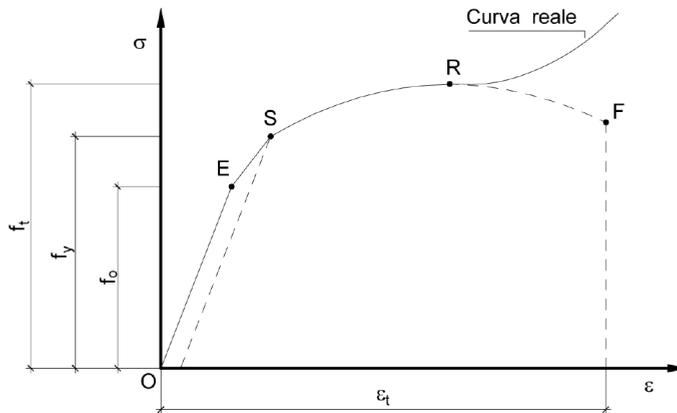
Va precisato che la risposta nel tratto RF corrisponde al fenomeno fisico denominato “strizione” per il quale gli incrementi deformativi si localizzano in una porzione limitata del provino determinandone una sensibile riduzione della sezione. Al fenomeno della strizione è associata la perdita di uniformità della tensione effettiva lungo il provino con conseguente perdita di monoassialità nella porzione soggetta a strizione. L’andamento decrescente del tratto RF non è più quindi direttamente correlabile ad una tensione nominale significativa del provino e non corrisponde all’andamento locale della tensione effettiva che continua invece a crescere.

### **Acciai extra-duri**

Il diagramma  $\sigma - \varepsilon$  tipico degli acciai extra-duri è riportato nella figura 1.3.

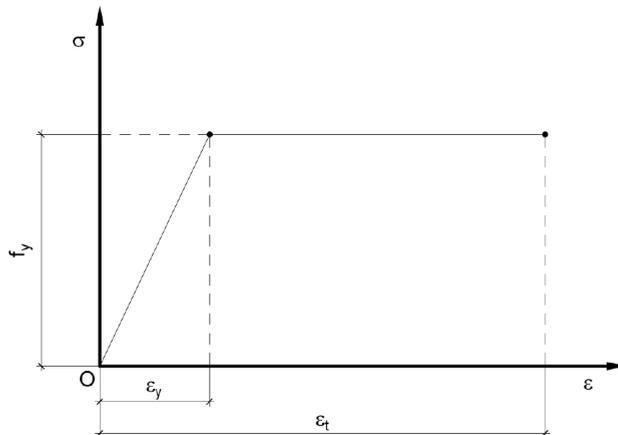
In questo caso non si rileva il tratto a tensione costante detto “plateau” corrispondente allo snervamento del materiale, tipico degli acciai extra-dolci. In assenza di un definito valore di snervamento si assume convenzionalmente un limite di elasticità, detto di “sco-

stamento dalla proporzionalità”, generalmente pari al valore di tensione cui corrisponde una deformazione residua  $\varepsilon_r$  pari allo 0.1%<sup>1</sup>.



**Figura 1.3.** Diagramma sforzi-deformazioni per gli acciai extra-duri

Nella pratica progettuale la risposta monoassiale dell'acciaio per carpenteria è descritta da un diagramma semplificato del tipo “elastico – perfettamente plastico”, caratterizzato da un tratto lineare che si estende fino alla deformazione di snervamento  $\varepsilon_y$ , seguito, al crescere della deformazione, da un tratto a tensione costante fino alla deformazione di rottura  $\varepsilon_t$ .



**Figura 1.4.** Modello costitutivo Elastico – Perfettamente plastico

Tutti gli acciai per carpenteria metallica e per strutture composte acciaio-calcestruzzo devono essere conformi alle norme armonizzate della serie UNI EN 10025 (per i laminati), UNI EN 10210 (per i tubi senza saldatura) e UNI EN 10219-1 (per i tubi saldati).

<sup>1</sup> Ballio G., Mazzolani F., *Strutture in Acciaio*, Hoepli.

In sede di progetto le Norme assumono convenzionalmente i seguenti valori nominali delle proprietà del materiale:

Modulo elastico:  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

Modulo di taglio:  $G = \frac{E}{[2 \cdot (1 + \nu)]} = 80770 \text{ N/mm}^2$

Coefficiente di Poisson:  $\nu = 0.30$

Coefficiente di espansione termica:  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Peso specifico:  $\gamma_{\text{steel}} = 78.50 \text{ kN/m}^3$

In funzione dello “spessore nominale  $t$ ”, per gli acciai di cui alle norme UNI EN 10025, UNI EN 10210, e UNI EN 1021-1 si possono assumere nei calcoli i valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento  $f_{yk}$  ( $f_y$  nell’Eurocodice 3) e di rottura  $f_{tk}$  ( $f_u$  nell’Eurocodice 3) delle tabelle 1.I ed 1.II:

Norme e qualità degli acciai		Spessore nominale dell'elemento			
		$t \leq 40 \text{ mm}$		$40 \text{ mm} < t \leq 80 \text{ mm}$	
		$f_{yk}$	$f_{tk}$	$f_{yk}$	$f_{tk}$
UNI EN 10025-2	S 235	235	360	215	360
	S 275	275	430	255	410
	S 355	355	510	335	470
	S 450	440	550	420	550
UNI EN 10025-3	S 275 N/NL	275	390	255	370
	S 355 N/NL	355	490	335	470
	S 420 N/NL	420	520	390	520
	S 460 N/NL	460	540	430	540
UNI EN 10025-4	S 275 M/ML	275	370	255	360
	S 355 M/ML	355	470	335	450
	S 420 M/ML	420	520	390	500
	S 460 M/ML	460	540	430	530
UNI EN 10025-5	S 235 W	235	360	215	340
	S 355 W	355	510	335	490

**Tabella 1.I.** Laminati a caldo con profili a sezione aperta

Norme e qualità degli acciai		Spessore nominale dell'elemento			
		$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
		$f_{yk}$	$f_{tk}$	$f_{yk}$	$f_{tk}$
UNI EN 10210-1	S 235 H	235	360	215	340
	S 275 H	275	430	255	410
	S 355 H	355	510	335	490
	S 275 NH/NLH	275	390	255	370
	S 355 NH/NLH	355	490	335	470
	S 420 NH/NLH	420	540	390	520
	S 460 NH/NLH	460	560	430	550
UNI EN 10219-1	S 235 H	235	360		
	S 275 H	275	430		
	S 355H	355	510		
	S 275 NH/NLH	275	370		
	S 355 NH/NLH	355	470		
	S 275 MH/MLH	275	360		
	S 355 MH/MLH	355	470		
	S 420 MH/MLH	420	500		
	S 460 MH/MLH	460	530		

**Tabella 1.II.** Laminati a caldo con profili a sezione cava

La nomenclatura utilizzata nelle tabelle 1.I e 1.II deriva dall'applicazione della norma UNI EN 10027-1:2006 in merito alla designazione degli acciai.

Solitamente si adottano i seguenti principi di designazione alfanumerica:

1° simbolo: *lettera che distingue gli acciai in funzione del loro utilizzo:*

- B** acciai per calcestruzzo armato;
- D** acciai prodotti piani per formatura a freddo;
- H** acciai ad alta resistenza;
- S** acciai per impieghi strutturali;
- Y** acciai per calcestruzzo armato precompresso.

2° simbolo: *numero che indica il carico unitario di snervamento minimo espresso in  $N/mm^2$  in funzione dello spessore "t":*

- 235**  $f_{yk} = 235 \text{ N/mm}^2$ ;
- 275**  $f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$ ;
- 355**  $f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$ ;
- 420**  $f_{yk} = 420 \text{ N/mm}^2$ ;
- 450**  $f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$ ;
- 460**  $f_{yk} = 460 \text{ N/mm}^2$ .

3° simbolo: *parametro di “resilienza” (per acciai tipo “S”) che misura la “tenacità” del materiale ovvero la capacità di resistere alla rottura fragile causata da un impatto. Poiché a basse temperature la capacità di sopportare gli urti diminuisce considerevolmente anche nel caso degli acciai extra dolci, favorendo la frattura fragile senza manifestare il caratteristico ramo plastico del diagramma sforzi-deformazioni, le norme forniscono le energie minime d’impatto espresse in Joule in funzione della temperatura<sup>2</sup>:*

<b>JR</b>	resilienza minima a:	+ 20 °C pari a 27 J;
<b>J0</b>	resilienza minima a:	0 °C pari a 27 J;
<b>J2</b>	resilienza minima a:	- 20 °C pari a 27 J;
<b>J3</b>	resilienza minima a:	- 30 °C pari a 27 J;
<b>J4</b>	resilienza minima a:	- 40 °C pari a 27 J;
<b>KR</b>	resilienza minima a:	+ 20 °C pari a 40 J;
<b>K0</b>	resilienza minima a:	0 °C pari a 40 J;
<b>K2</b>	resilienza minima a:	- 20 °C pari a 40 J;
<b>K3</b>	resilienza minima a:	- 30 °C pari a 40 J;
<b>K4</b>	resilienza minima a:	- 40 °C pari a 40 J.

4° simbolo: *caratteristiche fisiche:*

<b>C</b>	formatura speciale a freddo;
<b>D</b>	zincatura;
<b>E</b>	smaltatura;
<b>H</b>	profilo cavo;
<b>L</b>	bassa temperatura;
<b>M</b>	laminazione termomeccanica (energia di impatto garantita a - 20 °C);
<b>ML</b>	laminazione termomeccanica (energia di impatto garantita a - 50 °C);
<b>N</b>	normalizzato (energia di impatto garantita a - 20 °C);
<b>NL</b>	normalizzato laminato (energia di impatto garantita a - 50 °C);
<b>O</b>	offshore;
<b>S</b>	costruzione navale;
<b>T</b>	tubi;
<b>W</b>	resistenza alla corrosione atmosferica.

A titolo d’esempio la designazione **S355 NLH** rappresenta un acciaio strutturale (S) avente valore di snervamento pari a 355 MPa, normalizzato laminato (NL) con energia di impatto garantita a - 50 °C utilizzabile per profili cavi (H).

<sup>2</sup> La letteratura tecnica è ricca di esempi di strutture collassate a causa di fenomeni di rottura fragile. In particolare modo l’ingegneria navale conosce molto bene i rischi legati alla perdita di duttilità a seguito delle basse temperature con conseguente formazione di strappi lamellari e cricche nelle zone interessate da assemblaggi mediante saldatura. Per tale ragione, laddove si operi con acciai ad elevato valore di snervamento, in presenza di saldature, per costruzioni sottoposte ad ambienti gelivi è consigliabile l’utilizzo di acciai in grado di resistere agli urti di grande energia a basse temperature ovvero aventi elevata resilienza.

## APPLICAZIONI NUMERICHE

### ■ APPLICAZIONE A7.1

#### CARATTERISTICHE EFFICACI E STATO TENSIONALE ELASTICO

Si studi lo stato tensionale di un profilo IPE 600 in acciaio S355, soggetto alle seguenti sollecitazioni di progetto e vincolato esternamente in modo da non consentire il libero ingobbamento della sezione trasversale:

Sollecitazioni agenti sulla trave							
<i>Inserire nella tabella successiva le sollecitazioni più gravose (compressione positiva, trazione negativa)</i>							
Comb.SLU	$N_{Ed}$	$V_{Ed,z}$	$V_{Ed,y}$	$M_{Ed,y}$	$M_{Ed,z}$	$T_{Ed}$	$B_{Ed}$
[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm <sup>2</sup> ]
SLU_01	3900.00	20.00	6.00	50.00	15.00	0.10	0.50

Caratteristiche meccaniche del profilo	IPE 600	
Altezza della sezione trasversale	h	600 [mm]
Larghezza della sezione trasversale	$b_f$	220 [mm]
Spessore dell'anima	$t_w$	12 [mm]
Spessore dell'ala	$t_f$	19 [mm]
Raggio di raccordo	r	24 [mm]
Area della sezione trasversale	A	15600 [mm <sup>2</sup> ]
Altezza della sezione trasversale al netto delle ali	$h_w$	562 [mm]
Altezza del pannello d'anima	$c_w$	514 [mm]
Diametro massimo consentito dei bulloni d'ala	$d_{bf,max}$	27 [mm]
Passo minimo trasversale tra i bulloni d'ala	$p_{b,min}$	116 [mm]
Passo massimo trasversale tra i bulloni d'ala	$p_{b,max}$	118 [mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse forte	$I_y$	9.208E+08 [mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse forte	$W_{el,y}$	3.070E+06 [mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte	$W_{pl,y}$	3.512E+06 [mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio nel piano dell'anima	$A_{v,z}$	8378 [mm <sup>2</sup> ]
Raggio d'inerzia attorno all'asse forte	$i_y$	243.0 [mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse debole	$I_z$	3.387E+07 [mm <sup>4</sup> ]

[...segue]

Caratteristiche meccaniche del profilo	IPE 600	
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse debole	$W_{el,z}$	3.079E+05 [mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse debole	$W_{pl,z}$	4.856E+05 [mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio nel piano delle ali	$A_{v,y}$	8856 [mm <sup>2</sup> ]
Raggio d'inerzia attorno all'asse debole	$i_z$	46.6 [mm]
Momento d'inerzia torsionale	$I_t$	1.654E+06 [mm <sup>4</sup> ]
Costante di Warping	$I_w$	2.846E+12 [mm <sup>6</sup> ]

a) *Classificazione della sezione*

Considerando la scomposizione plastica del diagramma delle tensioni si ottiene l'espressione della profondità adimensionale dell'asse neutro plastico che determina il passaggio tra classe 2 e classe 3 ovvero tra comportamento plastico e comportamento elastico:

$$\alpha_{2-3} = \frac{456 \cdot \varepsilon + \left(\frac{c_w}{t_w}\right)}{13 \cdot \left(\frac{c_w}{t_w}\right)}$$

Con riferimento alla Tabella 4.2.1 (D.M. 14 gennaio 2008) si valuta la classe di appartenenza della sezione in condizione di presso flessione retta:

$$\varepsilon = \sqrt{235/355} = 0.814$$

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{514}{12} = 42.83$$

$$\alpha_{2-3} = \frac{456 \cdot \varepsilon + \left(\frac{c_w}{t_w}\right)}{13 \cdot \left(\frac{c_w}{t_w}\right)} = \frac{456 \cdot 0.814 + 42.83}{13 \cdot 42.83} = 0.7436$$

Sostituendo il valore  $\alpha_{2-3}$  nell'espressione (2.15), si determina il valore massimo della forza di compressione sollecitante che può essere applicato alla sezione trasversale affinché questa possa ancora attingere alle proprie riserve plastiche:

$$N_{Ed,2-3} = c_w \cdot (2 \cdot \alpha_{2-3} - 1) \cdot t_w \cdot f_{yk}$$

$$N_{Ed,2-3} = \frac{514 \cdot (2 \cdot 0.7436 - 1) \cdot 12 \cdot 355}{1000} = 1067 \text{ kN} < N_{Ed} = 3900 \text{ kN}$$

Poiché il valore limite della forza normale  $N_{Ed,2-3}$  è minore della forza normale sollecitante, la sezione non è in grado di raggiungere la completa plasticizzazione, per

tanto si dovrà far riferimento alla distribuzione elastica delle tensioni e da questa valutare se ricada in classe 3 o in classe 4.

La condizione limite che divide la classe 3 dalla classe 4 si raggiunge quando il rapporto  $\psi$  tra la tensione minima presente nella sezione e quella di snervamento soddisfa la seguente espressione:

$$\psi = \frac{42 \cdot \varepsilon - 0.67 \cdot \left( \frac{c_w}{t_w} \right)}{0.33 \cdot \left( \frac{c_w}{t_w} \right)} = \frac{42 \cdot 0.814 - 0.67 \cdot 42.83}{0.33 \cdot 42.83} = 0.388$$

Sostituendo il valore  $\psi$  nell'espressione (2.27), si determina il valore massimo della forza di compressione sollecitante che può essere applicato alla sezione trasversale affinché questa possa ancora attingere alle proprie riserve elastiche senza subire l'effetto dell'instabilità locale:

$$N_{Ed,3-4} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot (1 + \psi) \cdot f_{yk} = \frac{1}{2} \cdot \frac{15600 \cdot (1 + 0.388) \cdot 355}{1000} = 3843 \text{ kN} < N_{Ed} = 3900 \text{ kN}$$

Poiché il valore limite della forza normale  $N_{Ed,3-4}$  è minore della forza normale sollecitante, la sezione ricade in classe 4 ovvero risente degli effetti dell'instabilità locale. Per tale ragione, in sede di verifica si dovrà far riferimento alle caratteristiche meccaniche efficaci.

b) *Determinazione delle caratteristiche meccaniche efficaci*

Al fine di determinare le caratteristiche meccaniche efficaci della sezione trasversale, è necessario descrivere lo stato tensionale presente nell'anima della sezione lorda soggetta alle sollecitazioni di progetto.

Le tensioni massime e minime agli estremi dell'anima della sezione si ricavano applicando l'equazione di Navier.

N.B. *Nonostante la flessione sia biassiale, la distribuzione delle tensioni nell'anima è dovuta unicamente alla forza assiale ed al momento  $M_{y,Ed}$ :*

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,el}} = \frac{3900 \cdot 10^3}{156 \cdot 10^2} + \frac{50 \cdot 10^6}{3069 \cdot 10^3} = 266.29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,el}} = \frac{3900 \cdot 10^3}{156 \cdot 10^2} - \frac{50 \cdot 10^6}{3069 \cdot 10^3} = 233.71 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Poiché entrambe le tensioni sono positive la sezione risulta interamente compressa. Per linearità del diagramma delle tensioni si ricava la posizione dell'asse neutro elastico calcolata dal lembo superiore della sezione ed analogamente si determinano le tensioni  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  relative al pannello d'anima:

$$z_{el} = h \cdot \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = 600 \cdot \frac{266.29}{266.29 - 233.71} = 4905 \text{ mm}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{max} \cdot (z_{el} - t_f - r)}{z_{el}} = \frac{266.29 \cdot (4905 - 19 - 24)}{4905} = 263.95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{max} \cdot (z_{el} - t_f - r - c_w)}{z_{el}} = \frac{266.29 \cdot (4905 - 19 - 24 - 514)}{4905} = 236.62 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Si determina ora il coefficiente  $\psi$  pari al rapporto tra la tensione minima e quella massima, relative al pannello d'anima:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{236.62}{263.95} = 0.896$$

Con riferimento alla tabella C.4.2.VIII (Circolare Ministeriale 2 Febbraio 2009), si determina il valore efficace del pannello d'anima relativo ad una distribuzione trapezoidale delle tensioni:

Per  $1 > \psi > 0$ , il fattore  $k_\sigma$  vale:

$$k_\sigma = \frac{8.2}{(1.05 + \psi)} = \frac{8.2}{(1.05 + 0.896)} = 4.22$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{c_w}{28.4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{514}{28.4 \cdot 12 \cdot 0.814 \cdot \sqrt{4.22}} = 0.902 > 0.673$$

$$\rho_w = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0.902 - 0.055 \cdot (3 + 0.896)}{0.902^2} = 0.845 < 1.0$$

La dimensione efficace del pannello risulta pertanto pari a:

$$c_{w,eff} = \rho_w \cdot c_w = 0.845 \cdot 514 = 434.47 \text{ mm}$$

Di cui la porzione adiacente all'ala superiore ha dimensioni pari a:

$$c_{we,1} = \frac{2}{5 - \psi} \cdot c_{w,eff} = \frac{2}{5 - 0.896} \cdot 434.47 = 211.73 \text{ mm}$$

E la porzione adiacente all'ala inferiore ha dimensioni pari a:

$$c_{we,2} = c_{w,eff} - c_{we,1} = 434.47 - 211.73 = 222.74 \text{ mm}$$

Risultano pertanto le seguenti grandezze relative alla porzione inefficace del pannello d'anima:

*Altezza della porzione inefficace:*

$$s = c_w - c_{w1,eff} - c_{w2,eff} = 514 - 211.73 - 222.74 = 79.53 \text{ mm}$$

*Posizione del baricentro della porzione inefficace dal lembo superiore:*

$$z_s = t_f + r + c_{w1,eff} + \frac{s}{2} = 19 + 24 + 211.73 + \frac{79.53}{2} = 294.49 \text{ mm}$$

Alla luce di quanto sopra si ottengono le caratteristiche meccaniche efficaci della sezione trasversale.

*Area efficace:*

$$A_{eff} = A - s \cdot t_w = 15600 - 79.53 \cdot 12 = 14645 \text{ mm}^2$$

*Posizione del baricentro della sezione efficace dal lembo superiore:*

$$z_{G,eff} = \frac{A \cdot h/2 - s \cdot t_w \cdot z_s}{A_{eff}} = \frac{15600 \cdot 300 - 79.53 \cdot 12 \cdot 294.49}{14645} = 300.37 \text{ mm}$$

*Momento d'inerzia efficace attorno all'asse maggiore y - y:*

$$I_{y,eff} = I_y + A \cdot \left( \frac{h}{2} - z_{G,eff} \right)^2 - \frac{t_w \cdot s^3}{12} - s \cdot t_w \cdot (z_{G,eff} - z_s)^2$$

$$I_{y,eff} = 92080 \cdot 10^4 + 15600 \cdot (300 - 300.37)^2 - \frac{12 \cdot 79.53^3}{12} - 79.53 \cdot 12 \cdot (300.37 - 294.49)^2$$

$$I_{y,eff} = 92030 \cdot 10^4$$

*Momento d'inerzia efficace attorno all'asse minore z - z:*

$$I_{z,eff} = I_z - \frac{s \cdot t_w^3}{12} = 3387 \cdot 10^4 - \frac{79.53 \cdot 12^3}{12} = 3385.8 \cdot 10^4$$

*Moduli di resistenza efficaci attorno all'asse maggiore y - y:*

$$W_{y,eff,l} = \frac{I_{y,eff}}{z_{G,eff}} = \frac{92030 \cdot 10^4}{300.37} = 3064 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,\text{eff},2} = \frac{I_{y,\text{eff}}}{h - z_{G,\text{eff}}} = \frac{92030 \cdot 10^4}{600 - 300.37} = 3071 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,\text{eff},\text{min}} = 3064 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

*Modulo di resistenza efficace attorno all'asse minore z - z:*

$$W_{z,\text{eff}} = \frac{2 \cdot I_{z,\text{eff}}}{b_f} = \frac{2 \cdot 3385.8 \cdot 10^4}{220} = 3078 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

- c) *Valutazione delle tensioni nella sezione e verifica di resistenza in campo elastico:*  
L'eccentricità tra il baricentro della sezione efficace e quello della sezione lorda genera un momento aggiuntivo attorno all'asse maggiore d'inerzia che va a sommarsi al momento sollecitante esterno:

$$\Delta M_{y,\text{Ed}} = |N_{\text{Ed}} \cdot e_{N,z}| = \left| \frac{3900 \cdot 10^3 \cdot (300 - 300.37)}{10^6} \right| = 1.44 \text{ kNm}$$

$$M_{y,\text{Ed,tot}} = M_{y,\text{Ed}} + \Delta M_{y,\text{Ed}} = 50 + 1.44 = 51.44 \text{ kNm}$$

Le tensioni longitudinali  $\sigma_{x,\text{Ed}}$  vengono determinate nei punti significativi della sezione trasversale, mediante l'utilizzo dell'equazione di Navier:

$$\sigma_{x,\text{Ed},i} = \frac{N_{\text{Ed}}}{A_{\text{eff}}} + \frac{M_{y,\text{Ed,tot}}}{I_{y,\text{eff}}} \cdot z_i + \frac{M_{z,\text{Ed}}}{I_{z,\text{eff}}} \cdot y_i$$

dove:

$(z_i; y_i)$  rappresentano le coordinate del punto "P" nel quale si vuole valutare la tensione rispetto al baricentro della sezione efficace.

$$\sigma_{x,\text{Ed},1} = \frac{3900 \cdot 10^3}{14645} + \frac{51.44 \cdot 10^6}{92030 \cdot 10^4} \cdot (300.37) + \frac{15 \cdot 10^6}{3385.8 \cdot 10^4} \cdot (110) = 331.83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{x,\text{Ed},2} = \frac{3900 \cdot 10^3}{14645} + \frac{51.44 \cdot 10^6}{92030 \cdot 10^4} \cdot (300.37) + \frac{15 \cdot 10^6}{3385.8 \cdot 10^4} \cdot (0) = 283.10 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{x,\text{Ed},3} = \frac{3900 \cdot 10^3}{14645} + \frac{51.44 \cdot 10^6}{92030 \cdot 10^4} \cdot (300.37) + \frac{15 \cdot 10^6}{3385.8 \cdot 10^4} \cdot (-110) = 234.36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{x,\text{Ed},4} = \frac{3900 \cdot 10^3}{14645} + \frac{51.44 \cdot 10^6}{92030 \cdot 10^4} \cdot (-600 + 300.37) + \frac{15 \cdot 10^6}{3385.8 \cdot 10^4} \cdot (110) = 298.29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{x,\text{Ed},5} = \frac{3900 \cdot 10^3}{14645} + \frac{51.44 \cdot 10^6}{92030 \cdot 10^4} \cdot (-600 + 300.37) + \frac{15 \cdot 10^6}{3385.8 \cdot 10^4} \cdot (0) = 249.56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{x,\text{Ed},6} = \frac{3900 \cdot 10^3}{14645} + \frac{51.44 \cdot 10^6}{92030 \cdot 10^4} \cdot (-600 + 300.37) + \frac{15 \cdot 10^6}{3385.8 \cdot 10^4} \cdot (-110) = 200.83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

La tensione longitudinale da ingobbamento impedito si ricava nel seguente modo:

$$\sigma_{w,Ed} = \pm \frac{B_{Ed}}{I_w} \cdot \omega(s)$$

$$\sigma_{w,Ed} = \pm \frac{B_{Ed}}{I_w} \cdot \frac{b \cdot h_m}{4} = \pm \frac{0.5 \cdot 10^9}{2846000 \cdot 10^6} \cdot \frac{220 \cdot (600 - 19)}{4} = \pm 5.61 \frac{N}{mm^2}$$

Tutti i sei punti in cui è stata valutata la tensione longitudinale soddisfano il seguente criterio di verifica ( $\sigma_{w,Ed}$  è presente unicamente nelle ali):

$$\sigma_{x,Ed,i} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1.05} = 338 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{x,Ed,max} = \sigma_{x,Ed,l} + \sigma_{w,Ed} = 337.4 \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1.05} = 338 \frac{N}{mm^2}$$

Le tensioni tangenziali dovute al taglio possono calcolarsi con il metodo delle tensioni medie costanti nell'anima e nelle ali:

$$\frac{A_f}{A_w} = \frac{220 \cdot 19}{(600 - 2 \cdot 19) \cdot 12} = 0.62 > 0.60$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{600 - 2 \cdot 19}{12} = 46.83 < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \cdot \frac{0.814}{1.00} = 58.6 \text{ (scongiurata instabilità a taglio)}$$

Dal momento che i rapporti  $A_f/A_w$  e  $h_w/t_w$  soddisfano le disuguaglianze riportate in normativa, è possibile applicare la seguente espressione al fine di ricavare la tensione tangenziale media nell'anima:

$$\tau_{Vz,Ed} = \frac{V_{z,Ed}}{h_w \cdot t_w} = \frac{20000}{(600 - 2 \cdot 19) \cdot 12} = 2.97 \frac{N}{mm^2}$$

Le tensioni medie angenti sulle ali risultano:

$$\tau_{Vy,Ed} = \frac{V_{y,Ed}}{2 \cdot b \cdot t_f} = \frac{6000}{2 \cdot 220 \cdot 19} = 0.72 \frac{N}{mm^2}$$

Poiché la sezione è aperta, in via semplificata, si possono assumere nulli gli effetti della torsione primaria, considerando unicamente quelli dovuti all'ingobbamento impedito. Sotto questa ipotesi risulta:  $T_{Ed} = T_{w,Ed}$ .

Le tensioni tangenziali nelle ali, dovute alla torsione secondaria, si ricavano pertanto nel seguente modo:

$$\tau_{w,Ed,f} = \frac{T_{w,Ed} \cdot S_{\omega}}{I_w \cdot t_f} = \frac{T_{w,Ed}}{I_w \cdot t_f} \cdot \left[ \frac{b^2 \cdot h_m \cdot t_f}{16} \right] = \frac{0.1 \cdot 10^6}{2846000 \cdot 10^6 \cdot 19} \cdot \left[ \frac{220^2 \cdot 581 \cdot 19}{16} \right] = 0.06 \frac{N}{mm^2}$$

Nell'ipotesi di trascurare gli effetti della torsione primaria, le tensioni tangenziali nell'anima risultano nulle:

$$\tau_{t,Ed,web} = 0 \text{ N/mm}^2.$$

Alla luce di quanto sopra si valuta la resistenza della sezione in campo elastico, applicando il criterio di combinazione delle tensioni, nei punti significativi per la verifica:

### Punto 1

Le tensioni longitudinali raggiungono il loro valore massimo, in concomitanza con la presenza delle tensioni tangenziali medie dovute al taglio trasversale ed a quelle dovute alla torsione secondaria:

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed,1} + \sigma_{w,Ed}}{f_{yk}/\gamma_{M0}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Vy,Ed} + \tau_{w,Ed,f}}{f_{yk}/\gamma_{M0}} \right)^2 = \left( \frac{337.4}{355/1.05} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{0.72 + 0.06}{355/1.05} \right)^2 = 0.99 < 1.00$$

### Punto 2'

Nel punto 2', avente coordinate  $(0; z_{G,eff} - t_f)$ , ubicato nella zona di connessione tra ala e anima, le tensioni longitudinali sono proporzionali unicamente alla sollecitazione assiale ed al momento flettente attorno all'asse maggiore di inerzia, e le tensioni tangenziali medie dovute al taglio verticale si sommano a quelle dovute alla torsione primaria:

$$\sigma_{x,Ed,2'} = \frac{3900 \cdot 10^3}{14645} + \frac{51.44 \cdot 10^6}{92030 \cdot 10^4} \cdot (300.37 - 19) = 282.03 \frac{N}{mm^2}$$

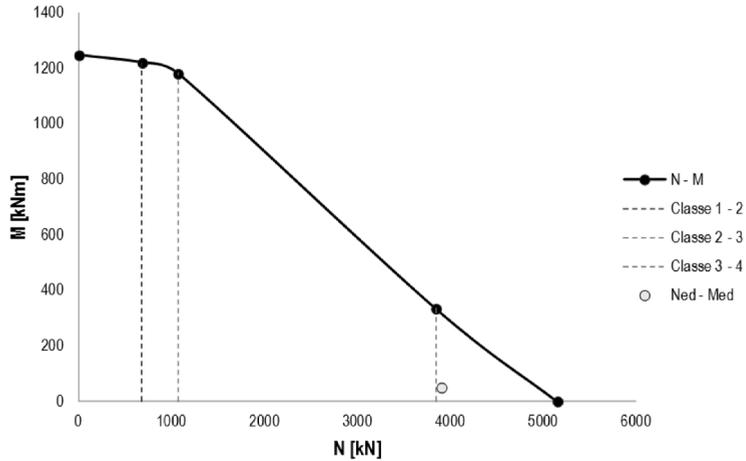
$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed,2'}}{f_{yk}/\gamma_{M0}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Vz,Ed} + \tau_{t,Ed,web}}{f_{yk}/\gamma_{M0}} \right)^2 = \dots$$

$$\dots = \left( \frac{282.03}{355/1.05} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{2.97 + 0}{355/1.05} \right)^2 = 0.69 < 1.00$$

Quanto sopra descritto, può essere facilmente determinato con il foglio Excel "Resistenza e Stabilità delle membrature a I e H", allegato al presente manuale:

Sollecitazioni agenti sulla trave							
<i>Inserire nella tabella successiva le sollecitazioni più gravose (compressione positiva, trazione negativa)</i>							
Comb.SLU	N <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed,z</sub>	V <sub>Ed,y</sub>	M <sub>Ed,y</sub>	M <sub>Ed,z</sub>	T <sub>Ed</sub>	B <sub>Ed</sub>
[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm <sup>2</sup> ]
SLU_01	3900.00	20.00	6.00	50.00	15.00	0.10	0.50

### Dominio di transizione di classe N - M<sub>y</sub>



#### Verifiche di resistenza (sollecitazioni composte)

Classificazione della sezione per flessione e forza assiale

Tensione massima dovuta alla forza normale

Tensione massima dovuta al momento flettente attorno a y - y

Tensioni massime dovute alla presenza di forza assiale e momento

Posizione dell'asse neutro elastico dal lembo superiore

Tensioni nelle fibre estreme del pannello d'anima

Rapporto tra le tensioni estreme del pannello d'anima

Coefficiente di imbozzamento

Snellezza adimensionale

Fattore di riduzione della dimensione del pannello d'anima

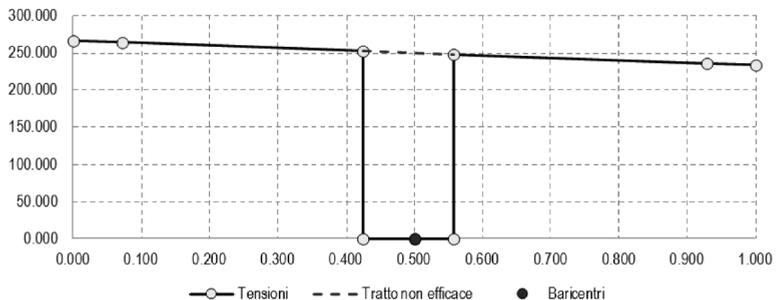
Altezza efficace del pannello d'anima

Dimensioni efficaci del pannello d'anima

Porzione inefficace del pannello d'anima

Classe	4
$\sigma_N$	250.00 [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{M_y}$	16.29 [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{N+M_y}$	266.29 [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{N-M_y}$	233.71 [N/mm <sup>2</sup> ]
$Z_{el}$	4905.00 [mm]
$\sigma_1$	263.95 [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_2$	236.05 [N/mm <sup>2</sup> ]
$\psi$	0.894 [-]
$k_{\sigma}$	4.22 [-]
$\lambda_p^1$	0.903 [-]
$\rho_w$	0.845 [-]
$c_{w,eff}$	434.32 [mm]
$c_{we,1}$	211.57 [mm]
$c_{we,2}$	222.75 [mm]
s	79.68 [mm]

### Stato tensionale elastico della sezione



Posizione della porzione inefficace rispetto al lembo superiore	$Z_s$	294.41 [mm]
Area della sezione efficace	$A_{eff}$	14644 [mm <sup>2</sup> ]
Posizione del baricentro della sezione efficace	$Z_{G,eff}$	300.37 [mm]
Eccentricità tra il baricentro della sezione lorda e quello efficace	$e_{N,z}$	-0.365 [mm]
Momento d'inerzia efficace attorno a y - y	$I_{y,eff}$	9.203E+08 [mm <sup>4</sup> ]
Moduli di resistenza efficaci attorno a y - y	$W_{y,eff,1}$	3.064E+06 [mm <sup>3</sup> ]
	$W_{y,eff,2}$	3.071E+06 [mm <sup>3</sup> ]
Momento d'inerzia efficace attorno a z - z	$I_{z,eff}$	3.386E+07 [mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza efficace attorno a z - z	$W_{z,eff}$	3.078E+05 [mm <sup>3</sup> ]
Momento aggiuntivo attorno a y - y	$\Delta M_{Ed,y}$	1.42 [kNm]

**Verifica tensionale della sezione**

Tensione normale massima al lembo più esterno della trave	$\sigma_{x,Ed,1}$	331.84 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione a metà dell'ala superiore	$\sigma_{x,Ed,2}$	283.11 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione a metà dell'ala superiore dove l'ala si collega con l'anima	$\sigma_{x,Ed,2'}$	282.05 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione all'esterno dell'ala superiore	$\sigma_{x,Ed,3}$	234.38 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione all'esterno dell'ala inferiore	$\sigma_{x,Ed,4}$	298.31 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione a metà dell'ala inferiore	$\sigma_{x,Ed,5}$	249.58 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione a metà dell'ala inferiore dove l'ala si collega con l'anima	$\sigma_{x,Ed,5'}$	250.64 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione normale minima al lembo più esterno della trave	$\sigma_{x,Ed,6}$	200.85 [N/mm <sup>2</sup> ]
Valore dell'area settoriale	$\omega_{max}$	31955 [mm <sup>2</sup> ]
Tensione normale (nelle ali) dovuta al bimomento	$\sigma_{w,Ed}$	5.61 [N/mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di un'ala e l'area dell'anima	$\rho_A$	✔ 0.62 [-]
Verifica di instabilità per taglio	$\rho_V$	✔ 46.83 [-]
Tensione tangenziale media nel piano dell'anima dovuta al taglio	$\tau_{Vz,Ed}$	2.97 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione tangenziale media nel piano delle ali dovuta al taglio	$\tau_{Vy,Ed}$	0.72 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione tangenziale presente nelle ali dovuta alla torsione primaria	$\tau_{t,Ed,flange}$	0.00 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione tangenziale presente nell'anima dovuta alla torsione primaria	$\tau_{t,Ed,web}$	0.00 [N/mm <sup>2</sup> ]
Momento statico settoriale	$S_\omega$	3.339E+07 [mm <sup>4</sup> ]
Tensione tangenziale massima nelle ali dovuta alla torsione secondaria	$\tau_{w,Ed,flange}$	0.06 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione tangenziale nelle ali per torsione (primaria o secondaria)	$\tau_{T,Ed,flange}$	0.06 [N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione tangenziale nell'anima per torsione (primaria o secondaria)	$\tau_{T,Ed,web}$	0.00 [N/mm <sup>2</sup> ]

Criterio di Von Mises nel punto 1	$\rho_{VM,1}$	✔ 1.00 [-]
Criterio di Von Mises nel punto 2	$\rho_{VM,2}$	✔ 0.70 [-]
Criterio di Von Mises nel punto 2'	$\rho_{VM,2'}$	✔ 0.70 [-]
Criterio di Von Mises nel punto 3	$\rho_{VM,3}$	✔ 0.46 [-]
Criterio di Von Mises nel punto 4	$\rho_{VM,4}$	✔ 0.75 [-]
Criterio di Von Mises nel punto 5	$\rho_{VM,5}$	✔ 0.54 [-]
Criterio di Von Mises nel punto 5'	$\rho_{VM,5'}$	✔ 0.55 [-]
Criterio di Von Mises nel punto 6	$\rho_{VM,6}$	✔ 0.37 [-]

## GUIDA AL SOFTWARE

### › Introduzione al software allegato

L'acquisto del presente volume consente, attraverso il **servizio G-cloud di Grafill**, il download di un software per la gestione di:

- **Fogli di calcolo** (\*.xls), utili alla comprensione delle metodologie di verifica di membrature e connessioni (i fogli di calcolo contengono al loro interno tutte le spiegazioni necessarie per il corretto utilizzo, nonché le formule per la determinazione di ciascuna grandezza);
- **Glossario** (principali termini tecnico-normativi utilizzati);
- **F.A.Q.** (domande e risposte più frequenti sugli argomenti principali);
- **Test iniziale** (verifica della formazione di base);
- **Test finale** (verifica dei principali concetti analizzati).

I fogli di calcolo disponibili nel software sono elencati di seguito e il loro utilizzo richiede la preinstallazione di MS Excel a cura dell'utente:

#### 📄 **Resistenza e stabilità delle membrature a I e H**

Questo foglio di calcolo consente di valutare le seguenti grandezze relative alle sezioni ad I o H:

- Caratteristiche meccaniche della sezione trasversale;
- Classificazione della sezione trasversale ai sensi dell'Eurocodice 3 e realizzazione del dominio di transizione di classe;
- Resistenze plastiche delle sezioni ricadenti in classe 1 e 2;
- Verifica tensionale delle sezioni ricadenti in classe 3 e 4;
- Verifiche di instabilità flessionale e torsionale delle membrature semplicemente compresse;
- Verifica di instabilità laterale (o flessotorsionale) delle membrature inflesse;
- Verifica di pressoflessione biassiale con il metodo proposto nell'Appendice A dell'Eurocodice 3;
- Verifica di pressoflessione biassiale con il metodo proposto nell'Appendice B dell'Eurocodice 3.

#### 📄 **Caratteristiche meccaniche dei profili**

Questo foglio di calcolo consente la determinazione delle caratteristiche meccaniche relative alle seguenti sezioni trasversali:

- Profili a I e H con ali uguali estrusi o saldati;

- Profili tubolari;
- Profili scatolari.

#### **Membrature composte**

Questo foglio di calcolo consente di progettare e verificare le membrature calastrelate o dotate di imbottiture con la possibilità, per quanto attiene le aste appartenenti a travature reticolari, di verificarne la connessione bullonata.

#### **Verifica colonne tubolari composte**

Questo foglio di calcolo consente la determinazione del dominio di resistenza di una colonna realizzata con tubolare in acciaio riempito di calcestruzzo e armato con gabbia opportunamente staffata. Le verifiche di resistenza e stabilità della membratura vengono effettuate tenendo conto dell'effetto di confinamento del calcestruzzo per effetto Poisson laddove i limiti imposti dalla normativa in merito all'eccentricità della forza assiale siano effettivamente soddisfatti.

#### **Giunto con coprighiunti – SPLICE CONNECTION**

Questo foglio di calcolo consente di verificare (o di determinare la resistenza) di un giunto bullonato di continuità tra membrature a I e H, realizzato con le seguenti configurazioni:

- Coprighiunti d'ala e anima (giunto incastro);
- Coprighiunti d'anima (giunto cerniera).

#### **Giunto semplice – FIN PLATE CONNECTION**

Questo foglio di calcolo consente di verificare (o di determinare la resistenza) di un giunto bullonato nominalmente incernierato, realizzato con fazzoletto verticale saldato alla membratura di sostegno, connesso alla membratura da collegare con un sistema di bulloni che lavorano a taglio.

#### **Giunto semplice – FLEXIBLE END PLATE CONNECTION**

Questo foglio di calcolo consente di verificare (o di determinare la resistenza) di un giunto bullonato nominalmente incernierato, realizzato con piastra flessibile saldata alla membratura da collegare, connessa alla membratura di sostegno con un sistema di bulloni che lavorano a taglio.

#### **Giunto di base con piastra circolare**

Questo foglio di calcolo consente di determinare la resistenza di una piastra di base di forma circolare, connessa alla fondazione mediante tirafondi.

#### **Giunto con flangia di estremità – MOMENT CONNECTION**

Questo foglio di calcolo consente di determinare il momento resistente e la classificazione in termini di resistenza flessionale, di un giunto flangiato bullonato, utilizzando il metodo T-stub descritto nell'Eurocodice 3, parte 8, relativo al progetto delle connessioni.