

# Sommario

<b>Capitolo 1</b>	<b>Generalità sull'acciaio</b>	<b>1</b>
1.1	Introduzione	1
1.2	I materiali tradizionali da costruzione	1
1.3	Il materiale acciaio nelle strutture	3
1.3.1	Tipi di acciaio e sezioni per strutture in acciaio	3
1.3.2	Legame costitutivo reale e ideale dell'acciaio	4
1.3.3	Equazioni costitutive	7
1.3.4	Il concetto di rigidità	7
1.3.5	Risposta duttile e risposta fragile	9
1.4	Tipi di profili in acciaio e loro impiego	11
1.5	Richiami di geometria delle masse	14
<b>Capitolo 2</b>	<b>Sicurezza, stati limite e azioni</b>	<b>17</b>
2.1	Introduzione	17
2.2	Stati limite	17
2.3	Metodo semiprobabilistico agli stati limite	21
2.4	Azioni	21
2.4.1	Classificazione delle azioni secondo le NTC2018	21
2.4.2	Combinazioni delle azioni	22
2.4.3	Impiego dei coefficienti di sicurezza per carichi favorevoli/sfavorevoli	24
	Esercizio 2.1 Calcolo delle azioni di progetto su telaio	26
<b>Capitolo 3</b>	<b>Progetto di membrature strutturali</b>	<b>29</b>
3.1	Introduzione	29
3.2	Classificazione delle sezioni in acciaio	29
3.3	L'approccio progettuale secondo il metodo semi-probabilistico agli stati limite: verifiche principali	32
3.4	La trave semplicemente appoggiata: verifica a flessione	34
3.5	Verifica a instabilità per carico di punta	36
3.5.1	Determinazione del carico critico euleriano	36
3.5.2	Iperbole di Eulero	38

3.5.3	Verifica di instabilità secondo la Norma Italiana NTC2018.....	40
Esercizio 3.1	Verifica a instabilità di trave semplicemente appoggiata	41
Esercizio 3.2	Verifica della sicurezza strutturale di un telaio .....	46
3.6	Membrature composte .....	53
3.6.1	Configurazioni geometriche .....	53
3.6.2	Travature reticolari .....	54
3.6.3	Metodi di risoluzione delle travature reticolari.....	56
3.6.4	Comportamento deformativo a taglio delle membrature composte	60
3.6.5	Fenomeni di instabilità globale e locale: criterio della snellezza equivalente .....	65
3.6.6	Calcolo snellezza equivalente nel caso di aste con imbottitura .....	68
3.6.7	Verifiche di instabilità per aste con imbottitura.....	70
Esercizio 3.1	Calcolo della snellezza equivalente di un traliccio verticale	72
Esercizio 3.2	Traliccio verticale soggetto ad azioni orizzontali .....	75
Esercizio 3.3	Verifica asta composta con imbottitura .....	80
<b>Capitolo 4</b>	<b>Torri a traliccio .....</b>	<b>87</b>
4.1	Introduzione .....	87
4.2	Torri da elettrodotto (Electrical Transmission Towers) .....	87
4.2.1	Generalità .....	87
4.2.2	Sostegni .....	88
4.2.3	Conduttori e isolatori .....	90
4.3	Azioni su torri a traliccio .....	91
4.3.1	Azione del vento .....	91
4.3.2	Altre azioni variabili.....	95
<b>Capitolo 5</b>	<b>Progetto e verifica di funi elastiche.....</b>	<b>97</b>
5.1	Introduzione .....	97
5.2	Generalità.....	97
5.3	La soluzione del problema elastico delle funi a debole curvatura.....	98
5.3.1	Determinazione della equazione della fune elastica a debole curvatura	98
5.3.2	Allungamento elastico delle funi sotto carichi distribuiti .....	101
5.3.3	Calcolo della freccia massima .....	102

5.3.4	Funi appese a supporti aventi diversa quota altimetrica .....	103
5.3.5	Relazioni fondamentali per le funi a debole curvatura .....	104
5.3.6	Variazioni termiche su funi elastiche a debole curvatura .....	106
5.4	La soluzione del problema elastico delle funi a grande curvatura.....	107
5.4.1	Funi a grande curvatura con sistema di riferimento posto nel supporto 108	
5.5	Azioni sulle funi .....	110
5.5.1	Azioni di ghiaccio e vento .....	110
5.5.2	Azione termica .....	112
5.5.3	Azioni ulteriori.....	112
5.5.4	Combinazione delle azioni.....	113
	Esercizio 5.1 Fune da elettrodotto .....	115
<b>Capitolo 6</b>	<b>Collegamenti .....</b>	<b>117</b>
6.1	Introduzione .....	117
6.2	Unioni saldate.....	117
6.2.1	Saldature a completa penetrazione.....	118
6.2.2	Saldature a cordone d'angolo.....	118
	Esercizio 6.1 Esempio di calcolo di tensioni sollecitanti una saldatura a doppio cordone d'angolo frontale .....	120
	Esercizio 6.2 Esempio di calcolo di tensioni sollecitanti una saldatura a doppio cordone d'angolo laterale.....	122
	Esercizio 6.3 Esempio di calcolo di tensioni sollecitanti una saldatura con cordoni d'angolo soggetta a torsione .....	124
6.3	Collegamenti bullonati .....	126
6.3.1	Tecnologia delle unioni bullonate e verifiche di sicurezza .....	126
6.3.2	Unioni soggette a taglio .....	130
6.3.3	Unioni soggette a trazione .....	134
	Esercizio 6.1 Giunto bullonato soggetto ad azioni taglienti .....	135
	Esercizio 6.2 Giunto bullonato con flangia soggetto a trazione e taglio 138	
	Esercizio 6.3 Giunto bullonato soggetto a momento torcente .....	142
	Esercizio 6.4 Giunto bullonato soggetto a taglio: risoluzione numerica 145	
	Esercizio 6.5 Giunto bullonato flangiato soggetto a trazione: risoluzione numerica 151	

<b>Capitolo 7</b>	<b>Dinamica strutturale.....</b>	<b>153</b>
7.1	Introduzione.....	153
7.2	Risposta dinamica di una struttura.....	153
7.3	Gradi di libertà di una struttura.....	153
7.4	Il telaio semplice come sistema ad un grado di libertà.....	154
7.4.1	Forza elastica.....	156
7.4.2	Forza smorzante.....	158
7.4.3	Forza esterna agente sul sistema.....	159
7.5	Equazione del moto di un sistema a un grado di libertà con forzante $p(t)$ 159	
7.6	Equazione del moto di un sistema a un grado di libertà con eccitazione sismica 160	
7.7	Metodi di soluzione dell'equazione del moto.....	161
7.8	Vibrazioni libere di un sistema a un grado di libertà.....	163
7.8.1	Vibrazioni libere di sistema non smorzato.....	163
	Esercizio 7.1 Oscillatore equivalente SDOF.....	167
7.8.2	Vibrazioni libere di sistema smorzato.....	168
7.8.3	Energia nelle vibrazioni libere.....	169
7.8.4	Valutazione sperimentale del coefficiente di smorzamento.....	170
7.9	Vibrazioni forzate di un sistema a 1 grado di libertà.....	171
7.9.1	Vibrazioni forzate di sistema non smorzato.....	171
7.9.2	Vibrazioni forzate di sistema smorzato.....	172
7.10	Sistema a due gradi di libertà.....	174
7.11	Analisi modale.....	176
7.11.1	Generalità.....	176
7.11.2	Determinazione dei modi di vibrare di un sistema a $n$ gradi di libertà 179	
7.12	Equazioni del moto e forze sismiche equivalenti per sistemi a $n$ gradi di libertà 180	
7.12.1	Equazioni del moto.....	180
7.12.2	Forze sismiche equivalenti in sistema a $n$ gradi di libertà.....	182
	Esercizio 7.1 Esempio: telaio <i>shear-type</i> a 2 gradi di libertà.....	184
<b>Capitolo 8</b>	<b>Fondamenti di sismologia e azione sismica.....</b>	<b>187</b>
8.1	Introduzione.....	187

8.2	Fondamenti di sismologia .....	187
8.2.1	Origine dei terremoti e onde sismiche .....	187
8.2.2	La misura dei terremoti .....	189
8.2.3	Misure di intensità dei terremoti e scale sismiche .....	191
8.3	Performance Based Capacity Design .....	192
8.4	Analisi probabilistica della sismicità in Italia .....	195
8.5	Azione sismica e spettri di risposta .....	197
8.5.1	Modellazione dell'azione sismica .....	197
8.5.2	Determinazione dello spettro di risposta elastico .....	198
8.5.3	Dallo spettro di risposta all'analisi sismica di un sistema a un grado di libertà	200
8.6	Azione sismica secondo la norma italiana .....	201
8.6.1	Concetto di pericolosità sismica .....	202
8.6.2	Parametri di sito .....	202
8.6.3	Stati limite, probabilità di superamento e periodi di ritorno dell'azione sismica .....	202
8.6.4	Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche .....	203
8.6.5	Spettro di risposta elastico in accelerazione .....	203
8.7	Comportamento dissipativo e non dissipativo. Analisi sismiche .....	204
8.7.1	Combinazione sismica .....	206
8.7.2	Criteri di modellazione della struttura e dell'azione sismica .....	206
<b>Capitolo 9</b>	<b>Analisi sismiche lineari .....</b>	<b>209</b>
9.1	Introduzione .....	209
9.2	Analisi statica equivalente .....	209
9.3	Analisi dinamica lineare (a spettro di risposta) .....	211
Esercizio 9.1	Telaio a tre impalcati: analisi lineare statica e dinamica lineare	213
Esercizio 9.2	Verifica dei pilastri del telaio a tre impalcati .....	226
Esercizio 9.3	Analisi dinamica lineare di telaio irregolare .....	232
	<b>BIBLIOGRAFIA SINTETICA .....</b>	<b>243</b>



# Capitolo 1 Generalità sull'acciaio

## 1.1 Introduzione

Il capitolo contiene una descrizione generale dei materiali tradizionalmente impiegati nelle costruzioni, con particolare attenzione per il materiale acciaio. Vengono illustrati i tipi di acciaio dal punto di vista chimico e fisico nonché i legami costitutivi che li caratterizzano. Sono introdotti i concetti di resistenza e rigidità, nonché di duttilità strutturale necessari per la progettazione strutturale anche in zona sismica.

## 1.2 I materiali tradizionali da costruzione

I materiali tradizionalmente impiegati nelle costruzioni sono l'acciaio, il calcestruzzo, la muratura e il legno.

Il materiale **acciaio** è largamente impiegato nelle costruzioni, in particolare quelle di tipo industriale, per le sue prestazioni meccaniche in rapporto al costo, nonché per il suo comportamento facilmente descrivibile, attesa la sua sostanziale omogeneità ed isotropia (indipendenza dalla direzione degli sforzi). Inoltre il suo comportamento è, fino a valori limite di tensione piuttosto elevati, sostanzialmente elastico lineare. A ciò si aggiunge il fatto che l'acciaio può assumersi ugualmente resistente a trazione e compressione, a meno di fenomeni di instabilità che si verificano in elementi snelli – i quali abbattano sensibilmente il valore del limite della tensione di progetto in compressione.

Calcestruzzo, legno e muratura sono invece materiali alquanto eterogenei: difatti il loro comportamento meccanico non è lo stesso in tutte le direzioni, ovvero sono anisotropi. Tale fatto ne complica lo studio, specialmente in campo non lineare. Il **calcestruzzo** è un agglomerato artificiale costituito da tre componenti: l'inerte (sabbia-ghiaia), il legante (cemento o sue varianti) e l'acqua. La **muratura** è analogamente anisotropa, essendo composta da blocchi o mattoni e da malta (a sua volta realizzata con acqua, inerti e legante).

Il calcestruzzo e la muratura sono in grado di sopportare con maggiore efficacia e affidabilità gli sforzi di compressione, mentre quelli di trazione vengono spesso affidati a materiali aggiuntivi: nel calcestruzzo ciò produce la ben nota tecnica costruttiva, il cosiddetto cemento armato, formata da barre metalliche disposte lungo le linee in cui si sviluppano le trazioni. Anche nelle murature esiste una specifica tecnologia, non ancora molto utilizzata, nota come muratura armata, in cui vengono aggiunte barre metalliche verticali (in apposite cavità) e orizzontali (in alcuni giunti

di malta), così da sopperire alla sua carenza di resistenza a trazione. La muratura, infine, è un materiale dal complesso comportamento meccanico, a causa della sua intrinseca eterogeneità dovuta all'alternarsi, talvolta caotico, di blocchi (o mattoni) e giunti di malta. In generale, è un materiale che ha una buona (o ottima) resistenza a compressione ma una scarsa resistenza a trazione. Per la sua caratterizzazione sono sovente necessarie numerose prove sperimentali, essendo ampio l'intervallo di valori dei parametri meccanici che la contraddistinguono, a causa delle molteplici caratteristiche dei materiali che la costituiscono.

Il **legno**, pur essendo un materiale "omogeneo" in senso macroscopico, presenta fibre lungo il senso di crescita della pianta che variano la risposta del materiale a seconda della direzione del carico (trasversale o parallelo alle fibre, in trazione o in compressione).

Si ritiene utile definire le seguenti proprietà meccaniche/di massa caratterizzanti i materiali da costruzione:

- $\sigma_{max}$ , tensione limite di trazione o compressione;
- $\gamma$ , peso specifico;
- $\sigma_{max}/\gamma$ , resistenza specifica, indicativa delle prestazioni strutturali del materiale da costruzione.

Tabella 1.1 – Caratteristiche meccaniche dei principali materiali da costruzione.

	Acciaio	Calcestruzzo	Legno	Muratura
$\sigma_{max}$ [MPa]	160	10-15	10 <sup>1)</sup>	1-5
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	78.5	24	6	16 <sup>2)</sup> -22 <sup>3)</sup>
$\frac{\sigma_{max}}{\gamma}$	≈ 2	≈ 0.6	≈ 0.6	≈ 0.2

<sup>1)</sup> Legno lamellare cioè privo di difetti (nodi)

<sup>2)</sup> Mattoni

<sup>3)</sup> Granito

Si osserva dalla Tabella 1.1 che il materiale acciaio esibisce le migliori prestazioni strutturali a parità di peso, seguito dal legno e dal calcestruzzo. Difatti, la sua resistenza a compressione è di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella del calcestruzzo, al netto di fenomeni di instabilità. Quella del legno è paragonabile a quella del calcestruzzo, mentre la muratura ha valori alquanto inferiori. In riferimento al peso del materiale, che influenza la domanda sismica - essendo quest'ultima funzione della massa - il legno è il materiale che risponderebbe meglio a parità di