



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELLA BASILICATA
Scuola di Ingegneria



Corso di

TECNICA DELLE COSTRUZIONI

STRUTTURE IN ACCIAIO

Docente:

Prof. Ing. Angelo MASI

Collaboratori:

Ing. Vincenzo MANFREDI

Ing. Giuseppe VENTURA

ARGOMENTI

- **L'IMPIEGO DI STRUTTURE METALLICHE: VANTAGGI**
- **FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA**
- **IL MATERIALE "ACCIAIO": CARATTERISTICHE MECCANICHE**
- **VERIFICHE DI ELEMENTI SINGOLI (MEMBRATURE)**
- **COLLEGAMENTO TRA ELEMENTI IN ACCIAIO (UNIONI)**

MATERIALI E TIPOLOGIE STRUTTURALI

EDIFICIO IN CEMENTO ARMATO



EDIFICIO IN MURATURA



EDIFICIO IN ACCIAIO



EDIFICIO IN LEGNO



STRUTTURE IN ACCIAIO

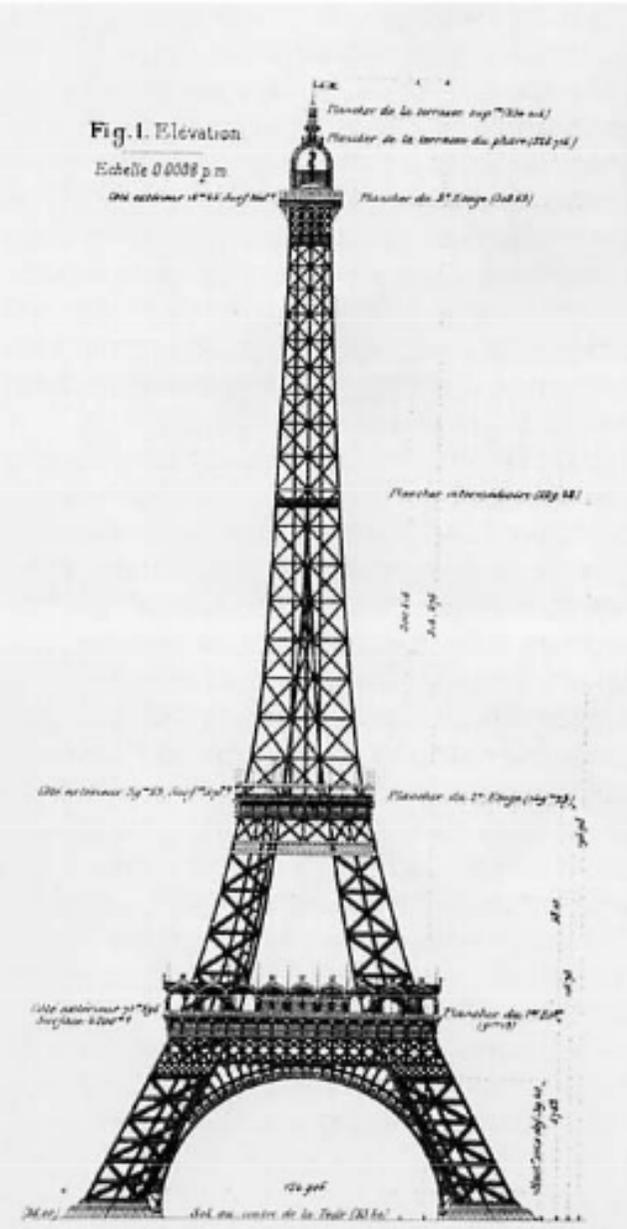
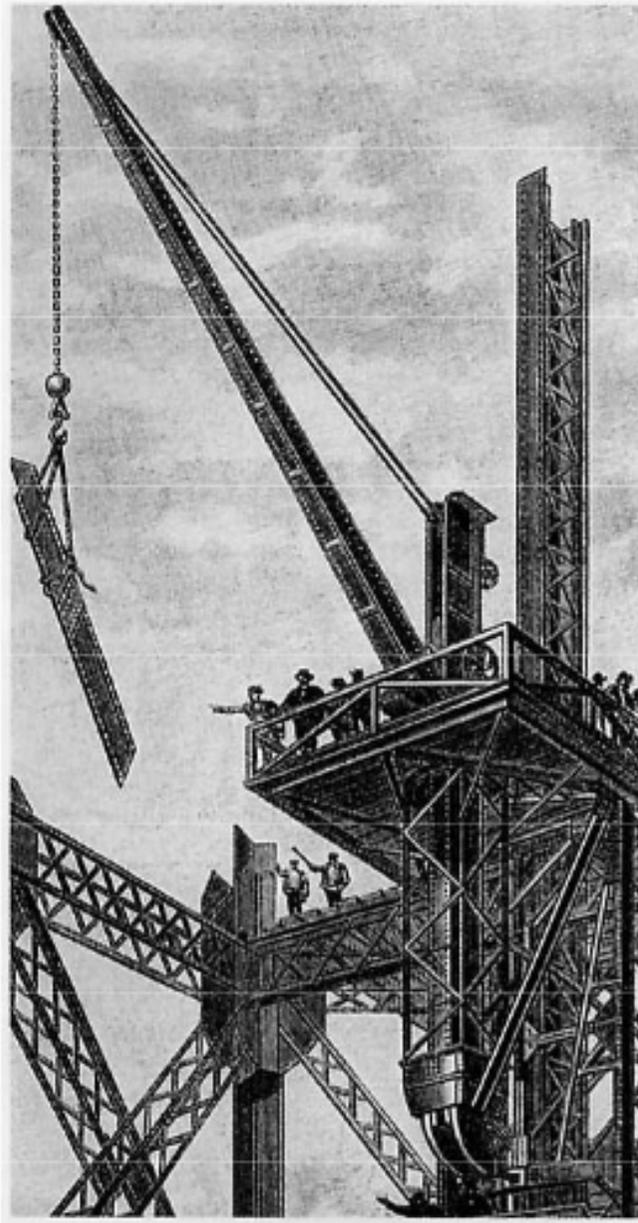
- Nell'ambito delle costruzioni civili (nuove), le strutture portanti, oltre che in cemento armato (cls + acciaio), sono realizzate anche impiegando esclusivamente materiali metallici.
- Si tratta soprattutto di acciai da carpenteria, mentre solo di recente sono state introdotte leghe leggere, tradizionalmente in uso nell'industria aeronautica.
- Il comportamento meccanico delle strutture metalliche è fortemente condizionato dalle proprietà del materiale acciaio, che presenta una elevata resistenza tanto a trazione quanto a compressione, oltre a tenacità ed adattabilità plastica.

STRUTTURE IN ACCIAIO



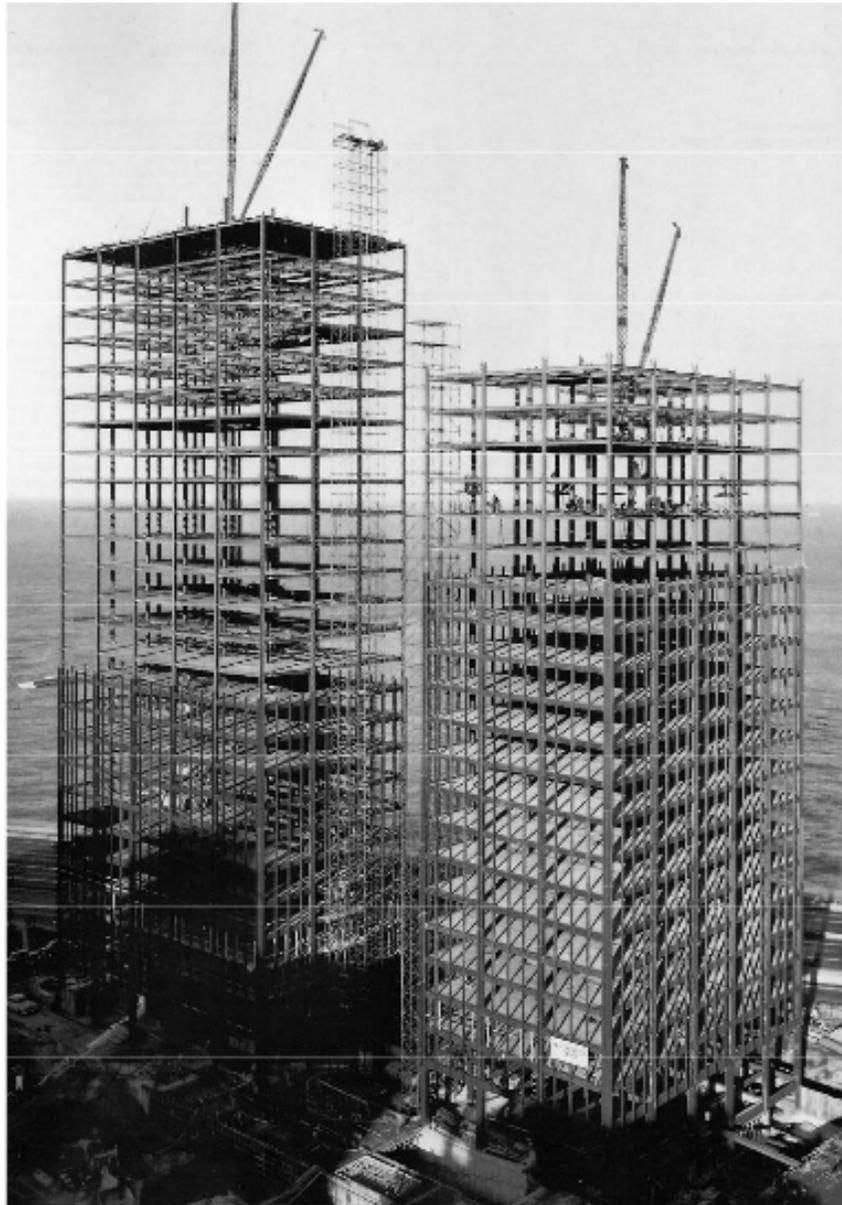
John Paxton, Crystal Palace, Londra 1851

STRUTTURE IN ACCIAIO



Gustave Eiffel, Torre Eiffel, Parigi 1889

STRUTTURE IN ACCIAIO



Grattacieli a Chicago, 1951



World Trade Center a New York, 1973-2001

L'IMPIEGO DI STRUTTURE METALLICHE:

VANTAGGI

Semplicità e maggior affidabilità di modellazione

- In fase di calcolo, il comportamento statico delle membrature in acciaio risente in modo molto limitato delle incertezze di esecuzione, contrariamente a quanto avviene per le costruzioni in c.a.
- Le schematizzazioni teoriche possono soddisfacentemente adattarsi alla struttura reale sia per le caratteristiche fisico-meccaniche del materiale sia per le modalità di esecuzione dei collegamenti e dei vincoli.
- Questi aspetti si riflettono nella possibilità di adottare coefficienti di sicurezza più piccoli e quindi meno penalizzanti di quelli relativi, per esempio, al c.a.

Rapidità di esecuzione

- Il procedimento costruttivo prevede una prima fase di produzione degli elementi strutturali, che si svolge in officina seguendo un processo produttivo di tipo industriale.
- Successivamente, in cantiere si realizza il montaggio mediante il collegamento tra gli elementi già prodotti.
- In questo modo la costruzione non risente delle condizioni stagionali che bloccano i procedimenti “a umido”, come accade nel caso delle costruzioni in muratura e in c.a., determinandosi, conseguentemente, un processo costruttivo più rapido ed efficiente.

Re-impiego

- Accanto alla riduzione dei tempi, si rileva la possibilità di trasformazione futura della struttura, che potrebbe essere richiesta da:
 - esigenze di modifica o ampliamento per variazioni funzionali dell'opera,
 - intervento di rinforzo richiesto da deficienze statiche conseguenti ad una modifica dello schema statico originario e/o dei carichi di esercizio.

L'impiego di strutture metalliche: **VANTAGGI**

Elevato grado di efficienza meccanica

- per i materiali metallici, il rapporto tra la resistenza meccanica (valore di calcolo, f_d) ed il peso specifico PS è molto elevato, e sempre superiore a quello degli altri materiali da costruzione tradizionali, come il c.a.
- ciò consente di impiegare elementi strutturali di dimensioni ridotte e quindi di peso minore, determinando un più razionale uso degli spazi per il minore ingombro degli elementi portanti ed un minore impegno per le strutture di fondazione, soggette a carichi più bassi.

Materiale da Costruzione	f_d Valori tipici [Kg/cm²]	Peso specifico $\delta \times 10^6$ [Kg/cm³]	Gradi di efficienza (f_d/PS) 10^3 [cm]
Muratura di mattoni	10	1800	5.55
Conglomerato cementizio armato	60	2500	24
Legno	120	800	150
Acciaio da carpenteria S325	1600	7850	203.82
S355	2400	7850	305.75
Leghe di alluminio	1400	2800	500

L'impiego di strutture metalliche: **VANTAGGI**

Elevato grado di efficienza costruttiva

- Le costruzioni metalliche si adattano molto bene alle tecniche di produzione in serie consentendo, pertanto, di avere una prefabbricazione industrializzata sempre più spinta.
- Infine, le moderne tecnologie danno la possibilità di introdurre nelle strutture dei materiali con caratteristiche di resistenza differenziate, con la creazione delle cosiddetta “quarta dimensione”, che si accompagna alle tre dimensioni geometriche, fornendo in tal modo un ulteriore elemento di scelta nella progettazione.

Ottima risposta alle azioni dinamiche

- Dimostrato dall'ampio uso di questo materiale per alcuni tipi di costruzioni industriali, nei ponti ferroviari.
- Ciò le rende particolarmente adatta per le costruzioni in zona sismica.

L'IMPIEGO DI STRUTTURE METALLICHE:

SVANTAGGI

L'impiego di strutture metalliche: **SVANTAGGI**

Instabilità, sia locale che globale

- Conseguente proprio alla elevata (maggiore, rispetto ad altre tipologie costruttive) snellezza delle membrature, che diventa uno degli aspetti più significativi in fase di verifica dell'elemento e dell'insieme della struttura metallica.

Elevata deformabilità

- Non consente di sfruttare appieno le capacità resistenti e può porre problemi rilevanti sia di instabilità che di funzionalità dell'opera.
- Per questa ragione si impongono delle limitazioni, oltre che sulle tensioni, anche sulle deformazioni.

L'impiego di strutture metalliche: SVANTAGGI

Degrado per corrosione

- Il materiale acciaio è particolarmente sensibile all'attacco di agenti atmosferici che lo ossidano, pertanto è richiesta una costante ed attenta manutenzione.
- Va rilevato che nel corso degli anni sono stati prodotti tipi di acciaio (COR-TEN^(§), IT-ACOR) nei quali il fenomeno della corrosione si auto-estingue in virtù della presenza di speciali additivi ferro-carbonio, rendendo superflua la protezione.

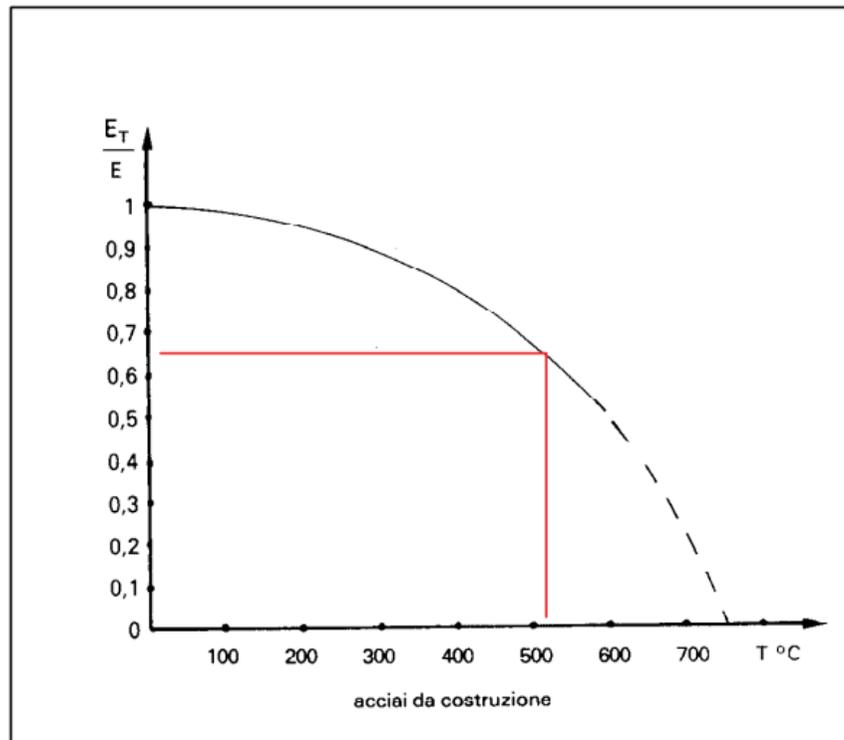
(§) COR-TEN deriva dall'inglese **COR**rosion resistance e **TEN**sile strength (resistenza alla corrosione e alla trazione).

Il naturale processo di ossidazione porta alla formazione di una patina protettiva che impedisce l'ulteriore e progressivo estendersi della corrosione.

L'impiego di strutture metalliche: SVANTAGGI

Vulnerabilità nei confronti del fuoco

- Al crescere della temperatura, nelle strutture metalliche si registra una diminuzione delle caratteristiche meccaniche (resistenza, modulo elastico) più rapida che in analoghe strutture in c.a.
- Ciò richiede accorgimenti e cure particolari nella protezione degli elementi portanti.



Variazione del modulo elastico dell'acciaio all'aumentare della temperatura

L'impiego di strutture metalliche: **SVANTAGGI**

Vulnerabilità nei confronti del fuoco



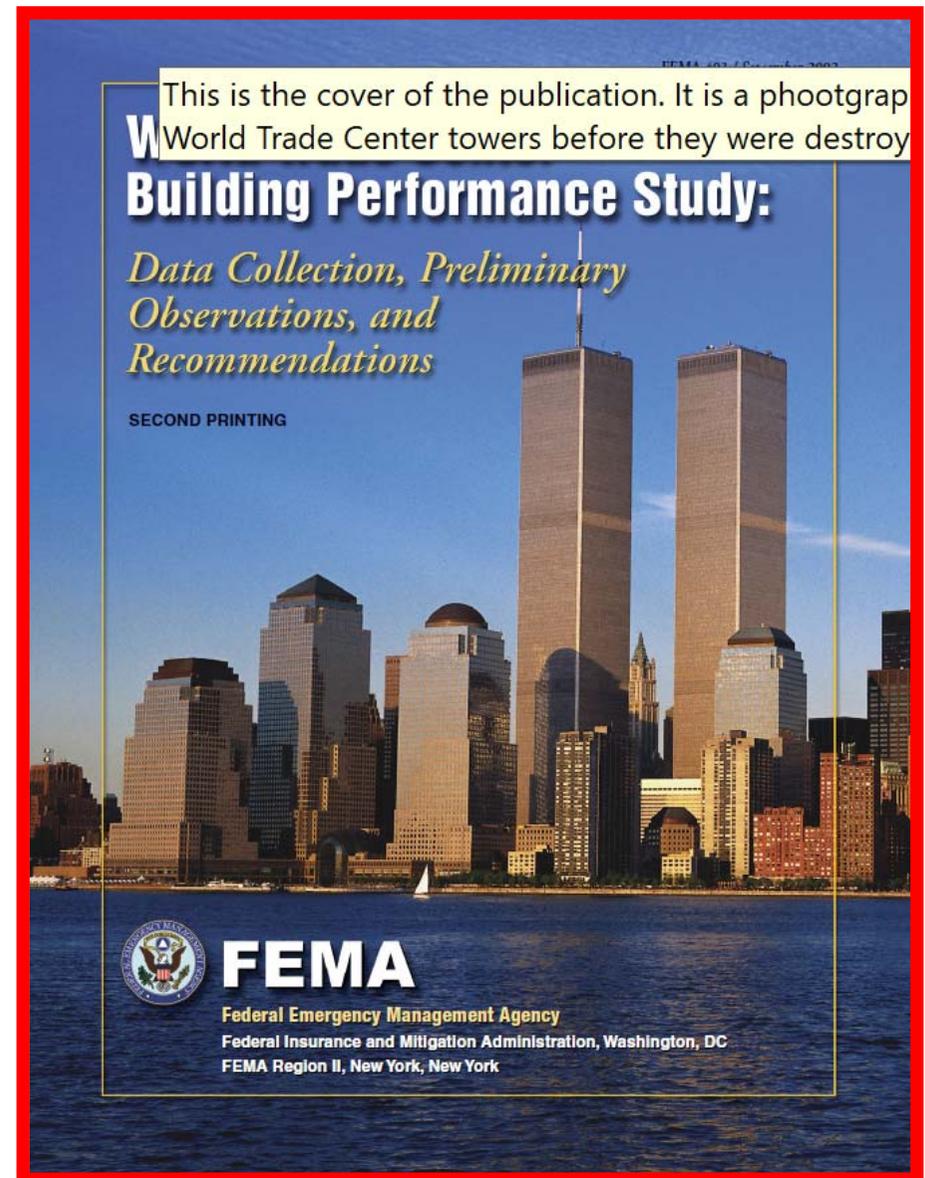
Crollo delle Torri Gemelle a New York conseguente
all'attentato del 11 settembre 2001

L'impiego di strutture metalliche: **SVANTAGGI**

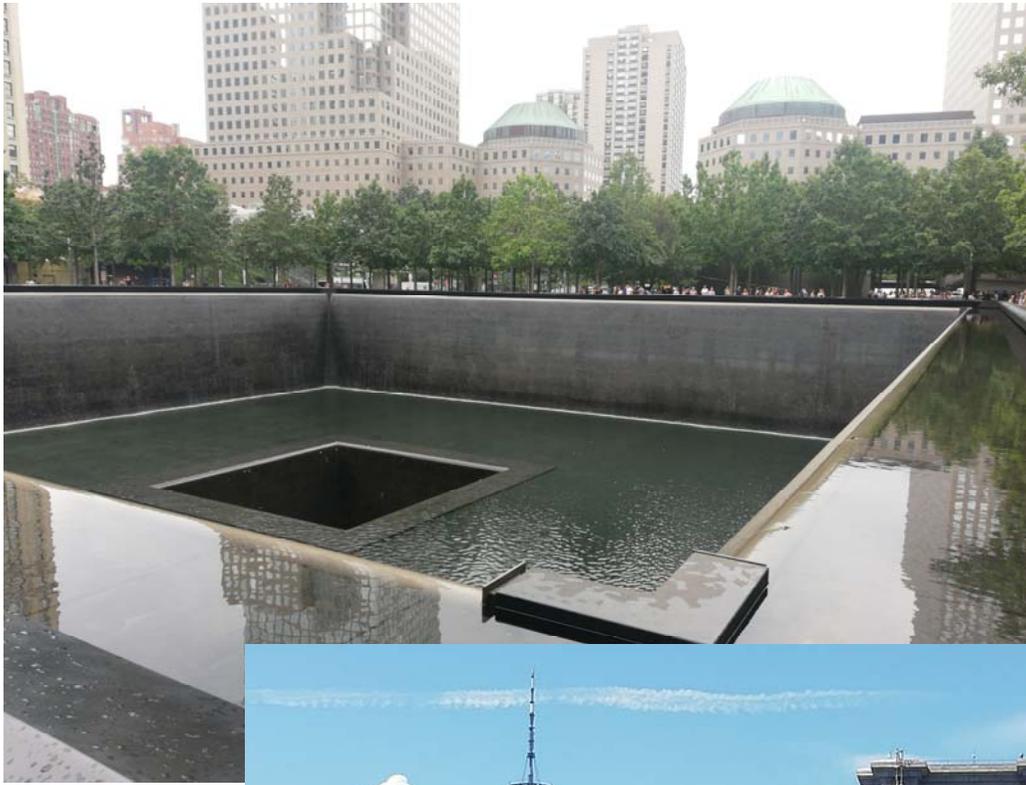
Vulnerabilità nei confronti del fuoco



Crollo delle Torri Gemelle a New York
conseguente all'attentato del
11 settembre 2001



World Trade Center: OGGI



FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA

FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA

Tutti i prodotti impiegati nell'ambito delle costruzioni in acciaio provengono dal processo di **laminazione**, mediante il quale il profilo viene estruso attraverso l'impiego di opportuni dispositivi atti a sagomare le unità di materiale di partenza secondo i rapporti dimensionali e le forme richieste.

Le principali forme adottate nella pratica usuale sono riconducibili a due tipologie:

- **Lamiere**: che rappresentano elementi base con cui è possibile realizzare qualsiasi forma geometrica;
- **Profilati**: i cui tipi e dimensioni derivano da una progettazione che fornisce elementi strutturali già prefabbricati.

FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA

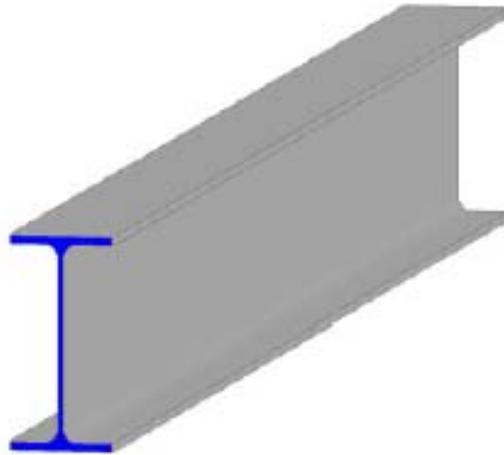
- **Lamiere**
- **Profilati**

Entrambe le tipologie sono classificate sui manuali tecnici di uso corrente.

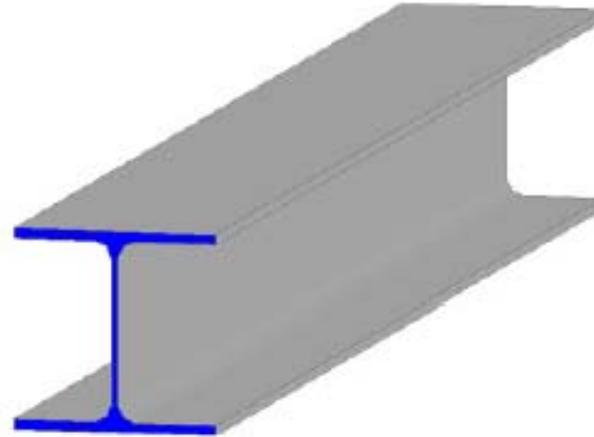
Lamiere	
	<i>Lamierini ($s \leq 1 \text{ mm}$)</i>
	<i>Lamiere sottili, medie e spesse</i>
Profilati	
aperti	<i>Ad I, profilati IPE</i>
	<i>Ad H, profilati HE</i>
	<i>Ad L,T,Z con lati uguali o diseguali</i>
chiusi	<i>Tubi tondi, quadrati, rettangolari</i>

FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA

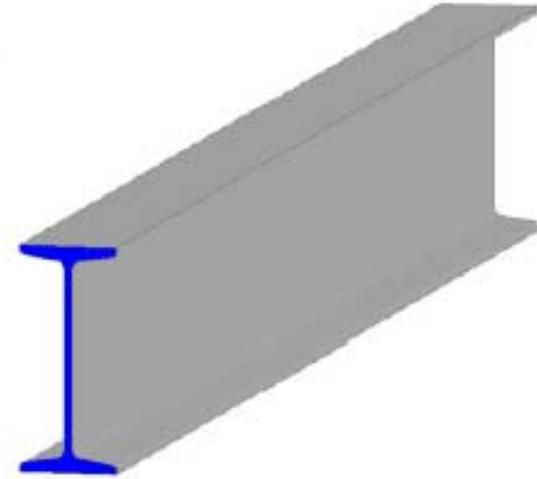
PROFILI SEMPLICI (aperti o chiusi)



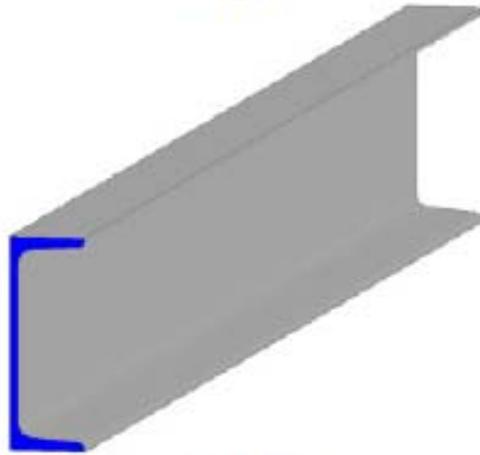
IPE



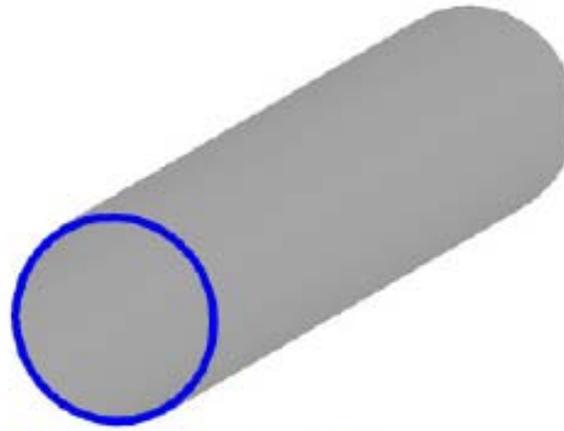
HE



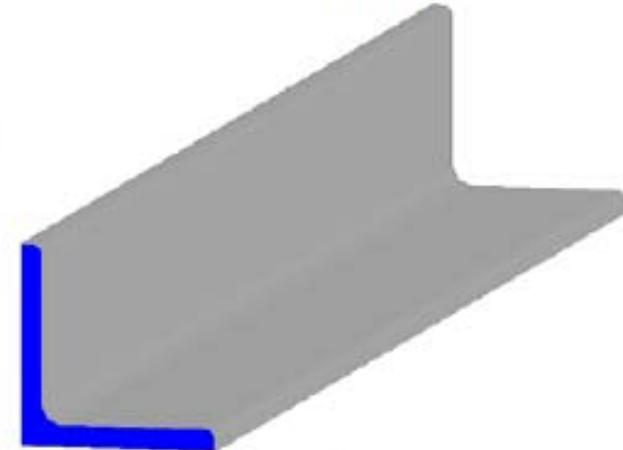
IPN



UPN



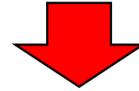
TUBOLARI



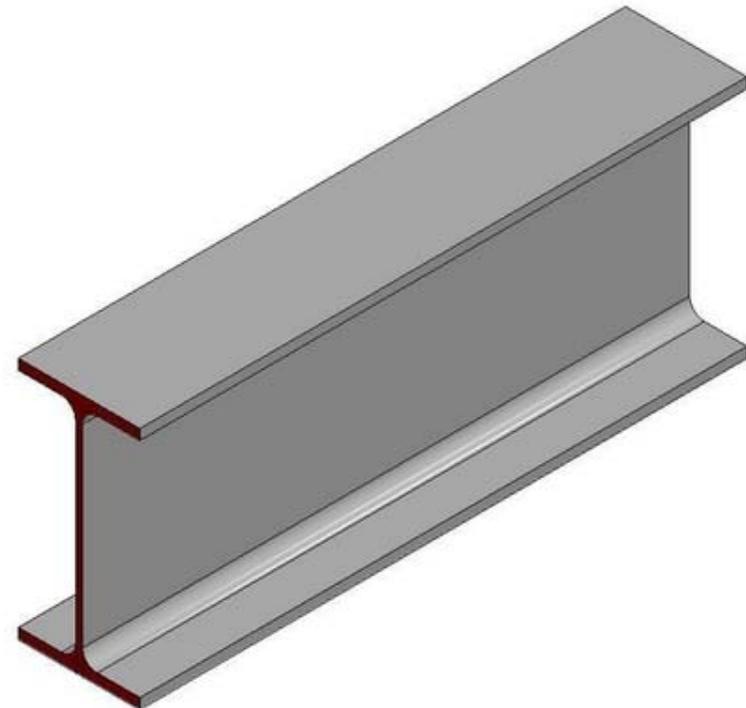
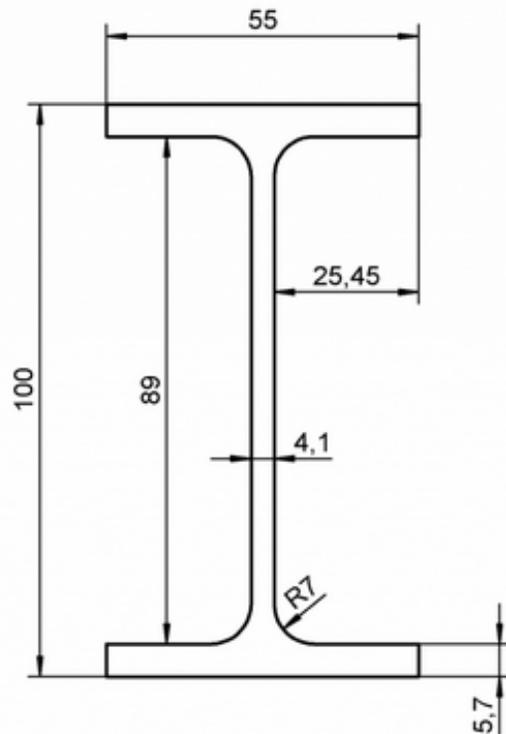
L

FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA

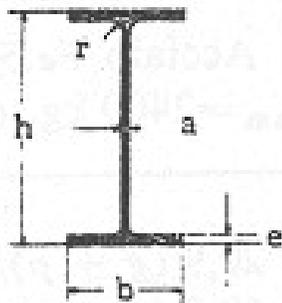
I **profili commerciali** utilizzati sono identificati attraverso una sigla che ne caratterizza la geometria e le dimensioni.



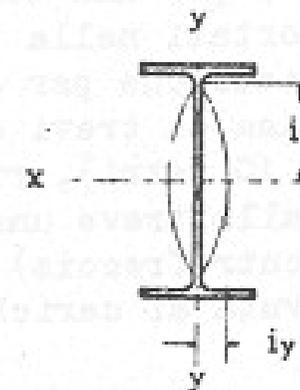
Ad es. **IPE100**: si tratta di una sezione ad I, quindi rientrante nella categoria dei **profili aperti**, e di **altezza pari a 100 mm**.



FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA



Travi IPE
UNI 5398 - 64



designazione profilo h mm	b mm	a mm	e mm	r mm	sezione cm ²	peso kg/m	lungh. max m	valori statici relativi agli assi neutri XX - YY					
								Jx cm ⁴	Jy cm ⁴	Wx cm ³	Wy cm ³	ix cm	iy cm
IPE 80	46	3,8	5,2	5	7,64	6,0	20	80,1	8,49	20,0	3,69	3,24	1,05
IPE 100	55	4,1	5,7	7	10,30	8,1	20	171,0	15,90	34,2	5,79	4,07	1,24
IPE 120	64	4,4	6,3	7	13,20	10,4	20	318,0	27,70	53,0	8,65	4,90	1,45
IPE 140	73	4,7	6,9	7	16,40	12,9	20	541,0	44,90	77,3	12,30	5,74	1,65
IPE 160	82	5,0	7,4	9	20,10	15,8	21	869,0	68,30	109,0	16,70	6,58	1,84
IPE 180	91	5,3	8,0	9	23,90	18,8	21	1317,0	101,00	146,0	22,20	7,42	2,05
IPE 200	100	5,6	8,5	12	28,50	22,4	21	1943,0	142,00	194,0	28,50	8,26	2,24
IPE 220	110	5,9	9,2	12	33,40	26,2	21	2772,0	205,00	252,0	37,30	9,11	2,48
IPE 240	120	6,2	9,8	15	39,10	30,7	21	3892,0	284,00	324,0	47,30	9,97	2,69
IPE 270	135	6,6	10,2	15	45,90	36,1	21	5790,0	420,00	429,0	62,20	11,20	3,02
IPE 300	150	7,1	10,7	15	53,80	42,2	21	8356,0	604,00	557,0	80,50	12,50	3,35
IPE 330	160	7,5	11,5	18	62,60	49,1	21	11770,0	788,00	713,0	98,50	13,70	3,55
IPE 360	170	8,0	12,7	18	72,70	57,1	21	16270,0	1043,00	904,0	123,00	15,00	3,79
IPE 400	180	8,6	13,5	21	84,50	66,3	21	23130,0	1318,00	1160,0	146,00	16,50	3,95
IPE 450	190	9,4	14,6	21	98,80	77,6	21	33740,0	1678,00	1500,0	178,00	18,50	4,12
IPE 500	200	10,2	16,0	21	116,00	90,7	21	48200,0	2142,00	1930,0	214,00	20,40	4,31
IPE 550	210	11,1	17,2	24	134,00	106,0	21	67120,0	2668,00	2440,0	254,00	22,30	4,45
IPE 600	220	12,0	19,0	24	156,00	122,0	21	92080,0	3387,00	3070,0	308,00	24,30	4,66

FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA

HEB TRAVI AD ALI LARGHE PARALLELE
SERIE NORMALE UNI 5397-64



Desi- gnaz.	Peso kg/m	Sez. cm ²	Dimensioni					caratteristiche riferite all'asse neutro					
			h mm	b mm	a mm	e mm	r mm	x - x			y - y		
							J_x cm ⁴	$\frac{J_x}{V_x}$ cm ³	I_x cm	J_y cm ⁴	$\frac{J_y}{V_y}$ cm ³	I_y cm	
100	20,4	26,0	100	100	6	10	12	450	89,9	4,16	167	33,5	2,53
120	26,7	34,0	120	120	6,5	11	12	864	144	5,04	318	52,9	3,06
140	33,7	43,0	140	140	7	12	12	1510	216	5,93	550	78,5	3,58
160	42,6	54,3	160	160	8	13	15	2490	311	6,78	889	111	4,05
180	51,2	65,3	180	180	8,5	14	15	3830	426	7,66	1360	151	4,57
200	61,3	78,1	200	200	9	15	18	5700	570	8,54	2000	200	5,07
220	71,5	91,0	220	220	9,5	16	18	8090	736	9,43	2840	258	5,59
240	83,2	106	240	240	10	17	21	11260	938	10,3	3920	327	6,08
260	93,0	118	260	260	10	17,5	24	14920	1150	11,2	5130	395	6,58
280	103	131	280	280	10,5	18	24	19270	1380	12,1	6590	471	7,09
300	117	149	300	300	11	19	27	25170	1680	13,0	8560	571	7,58
320	127	161	320	300	11,5	20,5	27	30800	1930	13,8	9240	616	7,57
340	134	171	340	300	12	21,5	27	36660	2160	14,6	9690	646	7,53
360	142	181	360	300	12,5	22,5	27	43190	2400	15,5	10140	676	7,49
400	155	198	400	300	13,5	24	27	57680	2880	17,1	10820	721	7,40
450	171	218	450	300	14	26	27	79890	3550	19,1	11720	781	7,33
500	187	239	500	300	14,5	28	27	107200	4290	21,2	12620	842	7,27
550	199	254	550	300	15	29	27	136700	4970	23,2	13080	872	7,17
600	212	270	600	300	15,5	30	27	171000	5700	25,2	13500	902	7,08
650	225	286	650	300	16	31	27	210600	6480	27,1	13980	932	6,99
700	241	306	700	300	17	32	27	256900	7340	29,0	14440	963	6,87
800	262	334	800	300	17,5	33	30	359100	8980	32,8	14900	994	6,68
900	291	371	900	300	18,5	35	30	494100	10980	36,5	15820	1050	6,53
1000	314	400	1000	300	19	36	30	644700	12890	40,1	16280	1090	6,38

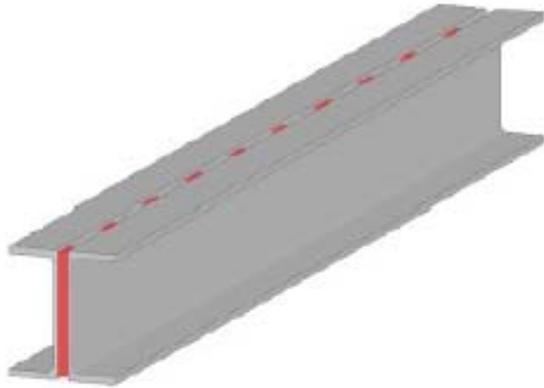
HEA TRAVI AD ALI PARALLELE
SERIE ALLEGGERITA UNI 5397-64



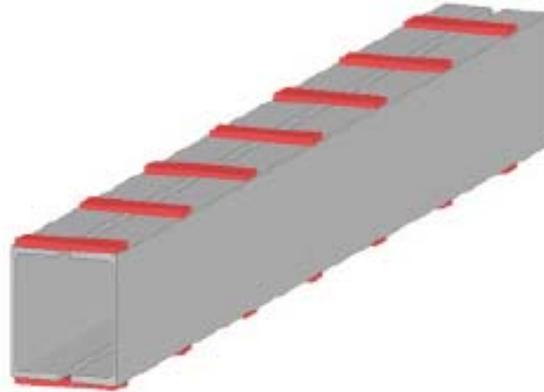
Desi- gnaz.	Peso kg/m	Sez. cm ²	Dimensioni					caratteristiche riferite all'asse neutro					
			h mm	b mm	a mm	e mm	r mm	x - x			y - y		
								J_x cm ⁴	$\frac{J_x}{V_x}$ cm ³	I_x cm	J_y cm ⁴	$\frac{J_y}{V_y}$ cm ³	I_y cm
100	16,7	21,2	96	100	5	8	12	349	72,8	4,06	134	26,8	2,51
120	19,9	25,3	114	120	5	8	12	606	106	4,89	231	38,5	3,02
140	24,7	31,4	133	140	5,5	8,5	12	1030	155	5,73	389	55,6	3,52
160	30,4	38,8	152	160	6	9	15	1670	220	6,57	616	76,9	3,98
180	35,5	45,3	171	180	6	9,5	15	2510	294	7,45	925	103	4,52
200	42,3	53,8	190	200	6,5	10	18	3690	389	8,28	1340	134	4,98
220	50,5	64,3	210	220	7	11	18	5410	515	9,17	1950	178	5,51
240	60,3	76,8	230	240	7,5	12	21	7760	675	10,1	2770	231	6,00
260	68,2	86,8	250	260	7,5	12,5	24	10450	836	11,0	3670	282	6,50
280	76,4	97,3	270	280	8	13	24	13670	1010	11,9	4760	340	7,00
300	88,3	113	290	300	8,5	14	27	18260	1260	12,7	6310	421	7,49
320	97,6	124	310	300	9	15,5	27	22930	1480	13,6	6990	466	7,49
340	105	133	330	300	9,5	16,5	27	27690	1680	14,4	7440	496	7,46
360	112	143	350	300	10	17,5	27	33090	1890	15,2	7890	526	7,43
400	125	159	390	300	11	19	27	45070	2310	16,8	8560	571	7,34
450	140	178	440	300	11,5	21	27	63720	2900	18,9	9470	631	7,29
500	155	198	490	300	12	23	27	86970	3550	21,0	10370	691	7,24
550	166	212	540	300	12,5	24	27	111900	4150	23,0	10820	721	7,15
600	178	226	590	300	13	25	27	141200	4790	25,0	11270	751	7,05
650	190	242	640	300	13,5	26	27	175200	5470	26,9	11720	782	6,97
700	204	260	690	300	14,5	27	27	215300	6240	28,8	12180	812	6,84
800	224	286	790	300	15	28	30	303400	7680	32,6	12640	843	6,65
900	252	321	890	300	16	30	30	422100	9480	36,3	13550	903	6,50
1000	272	347	990	300	16,5	31	30	553800	11190	40,0	14000	934	6,35

FORME E TIPI DEI PRODOTTI DA CARPENTERIA

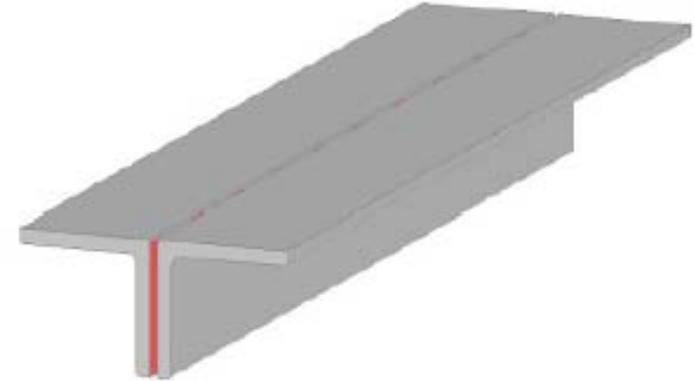
PROFILI COMPOSITI



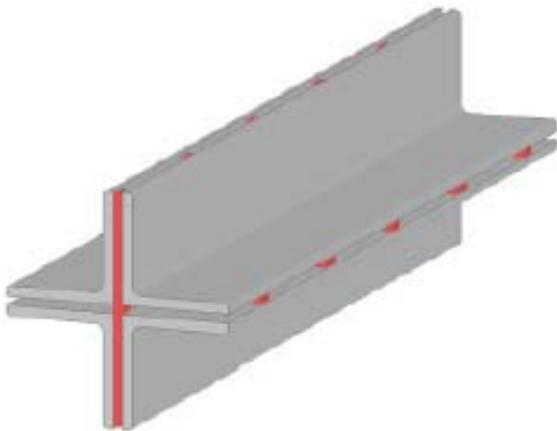
2C ACCOPPIATI DI SPALLA



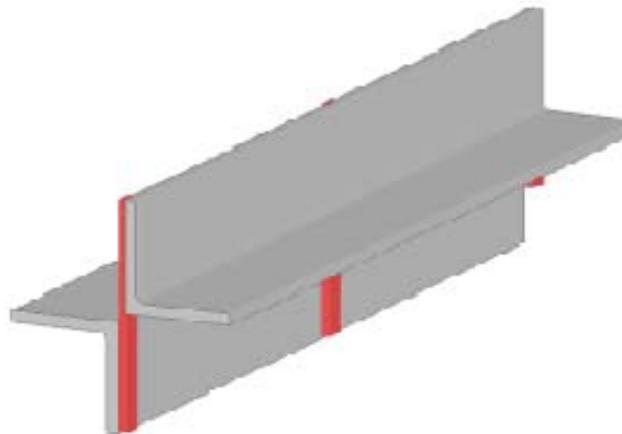
2C ACCOPPIATI DI FRONTE



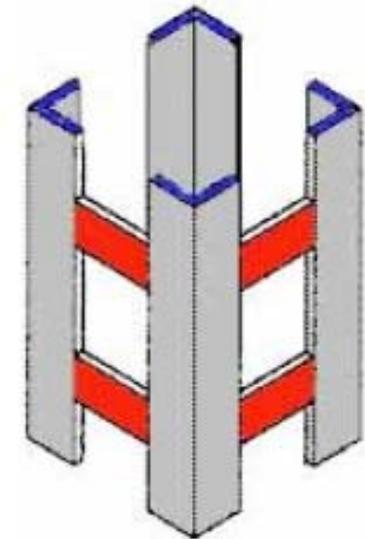
2L ACCOPPIATI DI SPALLA



4L ACCOPPIATI A CROCE



2L ACCOPPIATI A FARFALLA



4L CALASTRELLATI

IL MATERIALE "ACCIAIO": CARATTERISTICHE MECCANICHE

Le caratteristiche meccaniche dei materiali vengono valutate attraverso prove di qualificazione e le modalità del loro svolgimento, di natura convenzionale (standard), vengono fissate dalle Normative vigenti.

Per gli acciai da carpenteria le principali prove di qualificazione sono :

- a) prova completa di trazione**
- b) analisi chimica**
- c) esame macrografico (impronte Bauman)**
- d) esame micrografico**
- e) prova di durezza**

....

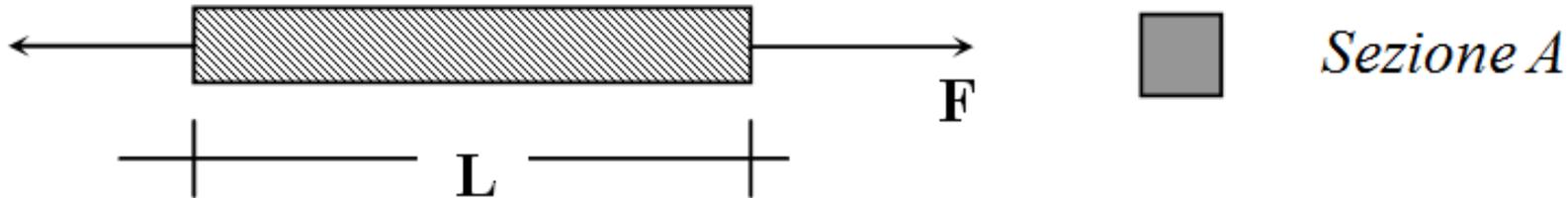
.... segue da slide precedente:

- f) prova di resilienza**
- g) prova di piegatura**
- h) prova di compressione globale**
- i) prove di fatica**
- j) determinazione delle tensioni residue**

La prova più significativa, per il tipo ed il numero delle informazioni che è in grado di fornire, è senz'altro quella di **trazione**.

PROVA DI TRAZIONE

Consideriamo una barra metallica di lunghezza “utile” L e sezione A , soggetta ad uno stato di sollecitazione monoassiale (forza F):



con opportuna strumentazione, si ricavano i diagrammi di carico - allungamento ($P-\Delta L$) da cui, note le caratteristiche della macchina di prova e della geometria del provino, sono deducibili i diagrammi tensione – deformazione ($\sigma-\varepsilon$), dai quali si evince il comportamento meccanico dei materiali.

PROVA DI TRAZIONE

La lunghezza “utile” della barra, ossia la parte di barra utilizzata nella prova e sulla quale si misurano le deformazioni, è standard e pari a:

$$L = 5.65 (A)^{0.5}$$

Si consideri che la lunghezza totale della barra da usare per il test è maggiore poiché sono richiesti anche tratti per l’inserimento nella macchina di prova

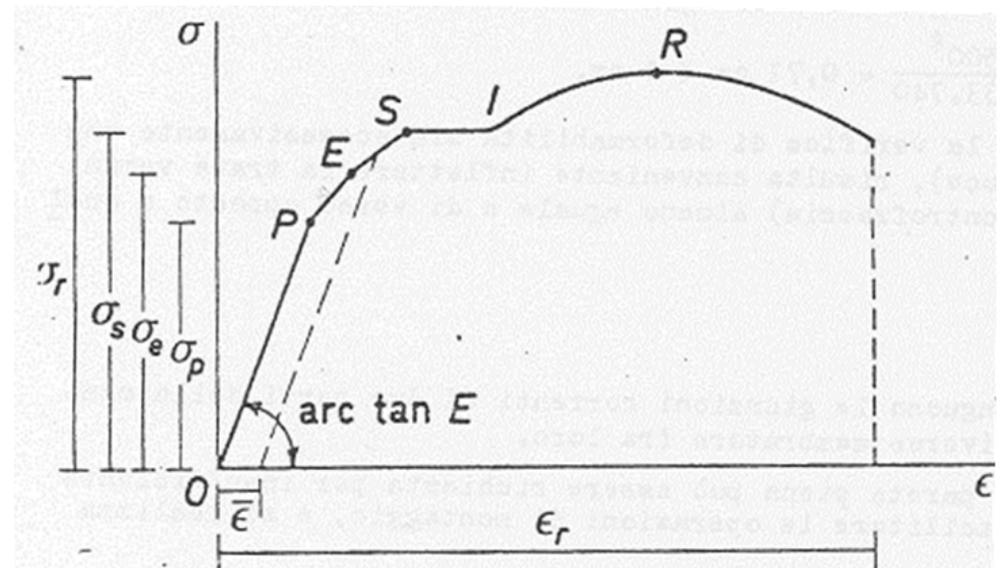
Ad es. per $A=3\text{cm}$ si ottiene L pari a circa 10cm, ma la lunghezza da usare sarà pari a circa 50-60m

Valgono le relazioni:

$$\sigma = F / A$$

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

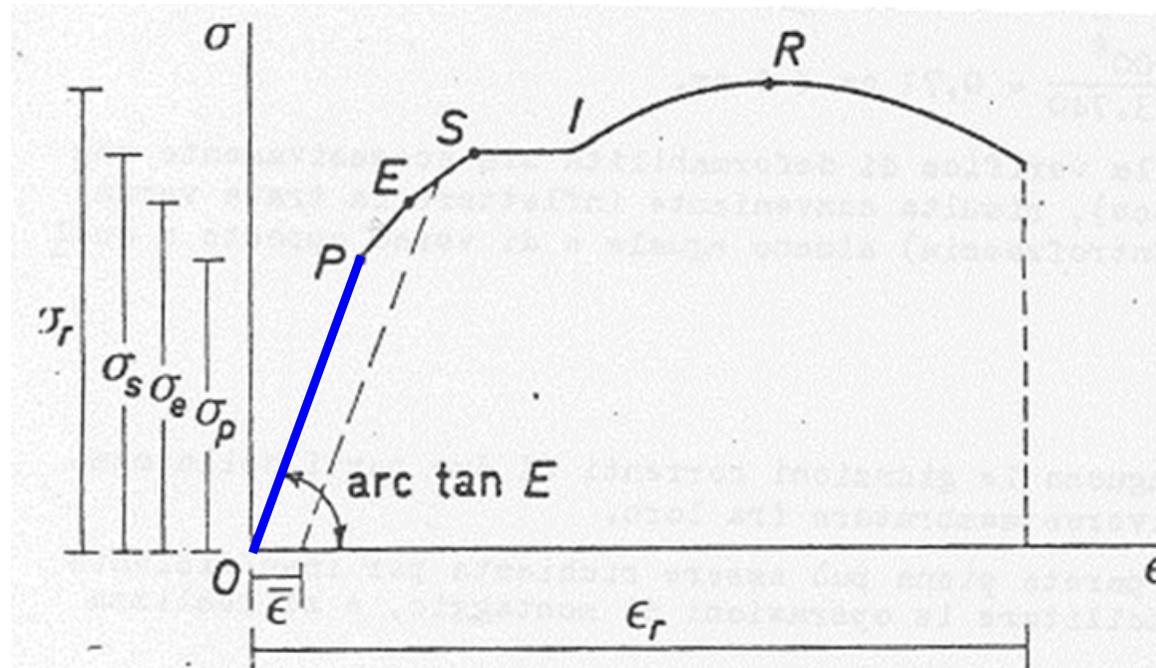
- diagramma tensione/deformazione, tipico di una prova a trazione
- ogni campo individua uno specifico comportamento del materiale



PROVA DI TRAZIONE

Intervallo OP [0, σ_p]

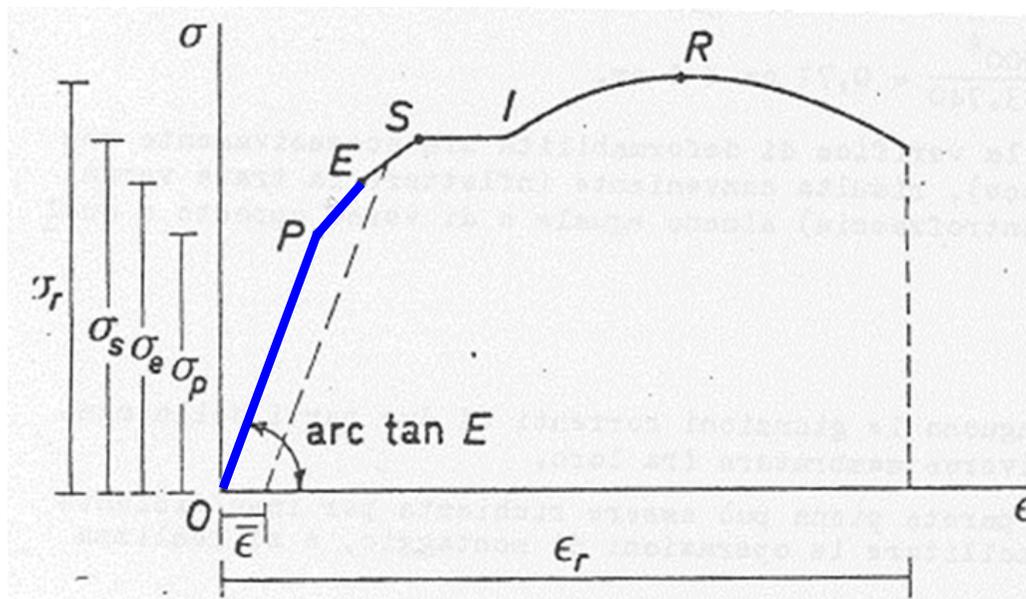
- l'andamento del diagramma è lineare con pendenza $E = \sigma/\varepsilon$ (modulo di elasticità lineare); entro questo intervallo il comportamento del materiale è elastico.
- Il valore σ_p è definito **tensione limite di proporzionalità** e rappresenta il valore oltre il quale il materiale entra nel campo non elastico.



PROVA DI TRAZIONE

Intervallo PE [σ_p, σ_e]

- entro questo intervallo il comportamento del materiale è ancora elastico ma non lineare ed è definito dal modulo tangente $E_t = d\sigma/d\varepsilon$.
- Il valore σ_e è definito **tensione limite di elasticità** e rappresenta il valore oltre il quale il materiale entra nel campo non elastico.

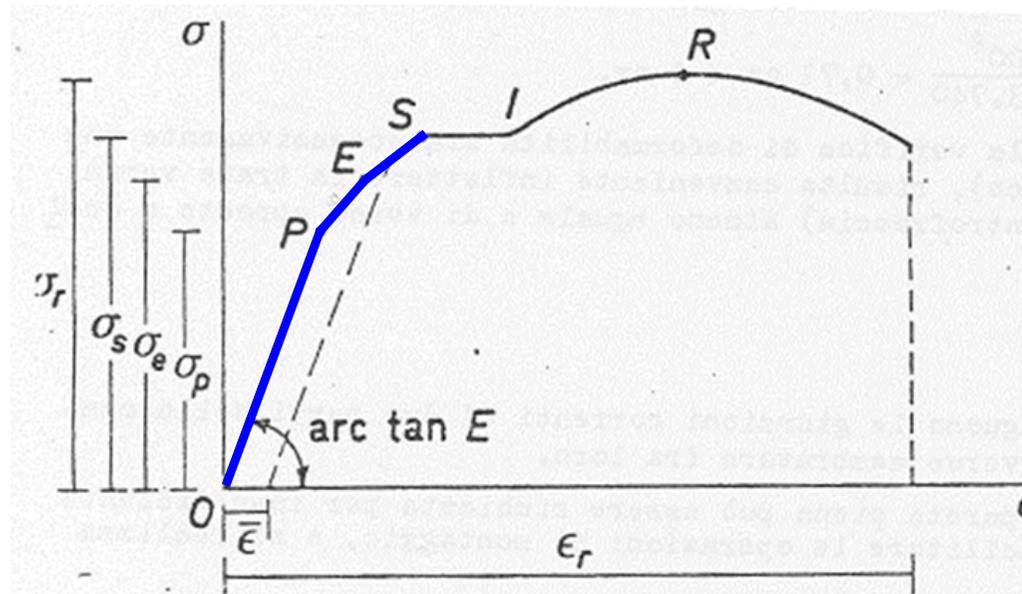


- Operativamente è molto difficile distinguere i due punti σ_e e σ_p e pertanto si suole considerarli coincidenti.

PROVA DI TRAZIONE

Intervallo ES [σ_e , σ_s]

- l'andamento del diagramma è non lineare; entro questo intervallo l'acciaio impegna le sue riserve plastiche fino alla soglia indicata con σ_s che viene denominata tensione di snervamento.
- Inoltre, scaricando il provino, si registra una deformazione residua ϵ : il diagramma di scarico è ancora rettilineo e parallelo al tratto iniziale OP.



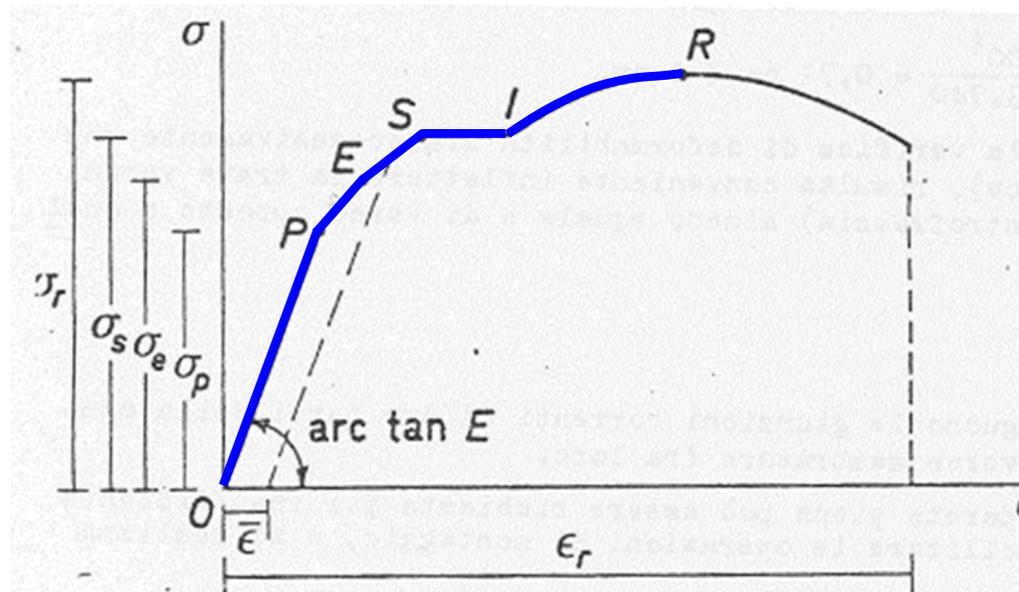
PROVA DI TRAZIONE

Intervallo SI [σ_s]

La tensione rimane costante e pari quella di snervamento mentre si ha un incremento di deformazione. Questa fase è detta **snervamento**.

Intervallo IR [σ_s, σ_r]

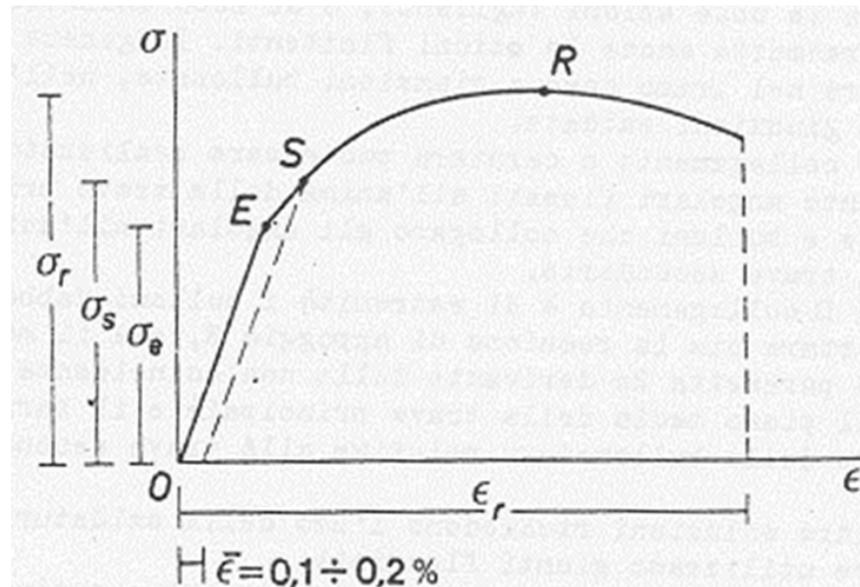
La tensione rimane costante e pari quella di snervamento mentre si ha un incremento di deformazione. Questa fase è detta **incrudimento**.



PROVA DI TRAZIONE

L'andamento decrescente dell'ultimo tratto **R-...** è solo apparente in quanto la macchina di prova non tiene conto del fatto che, a causa della contrazione laterale del provino, lo stato tensionale non è più mono-assiale e la strizione (fenomeno di riduzione della sezione trasversale) prevale sull'incrudimento.

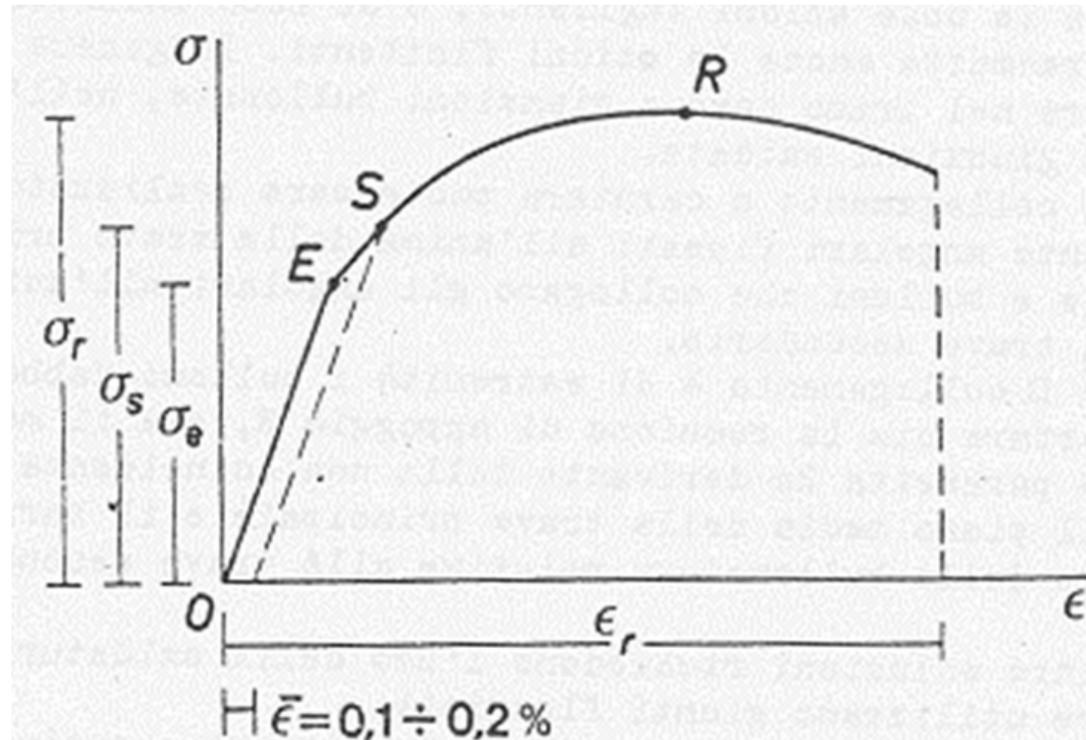
Il valore ϵ_r è un indice importante dell'adattabilità plastica del materiale.



PROVA DI TRAZIONE

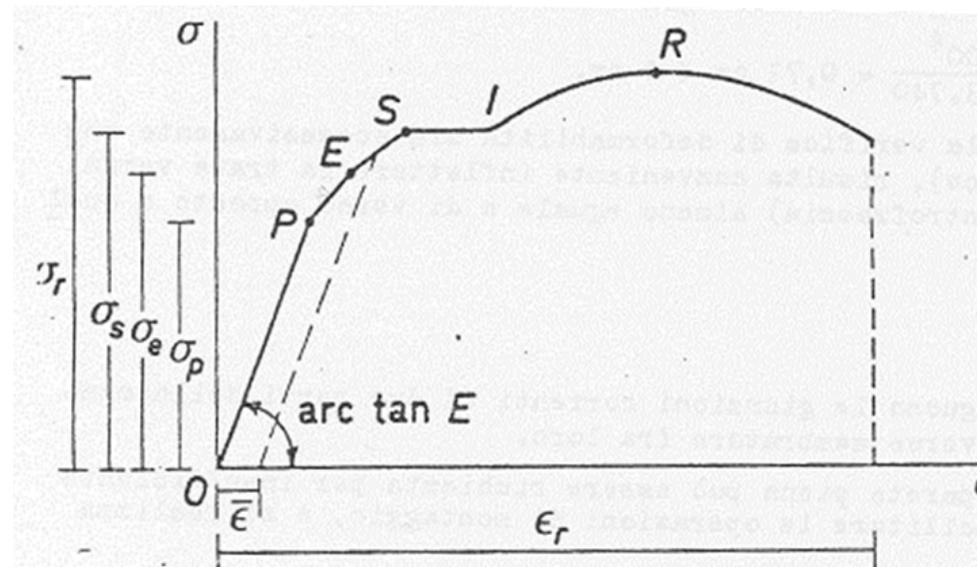
Individuazione «convenzionale» della tensione di snervamento σ_s

Per gli acciai speciali e per le leghe di alluminio un limite di snervamento vero e proprio non esiste ed il limite di elasticità viene convenzionalmente individuato in quel valore della tensione cui corrisponde una deformazione residua ε pari a: **0.1%** ($\sigma_{0,1}$) o allo **0.2 %** ($\sigma_{0,2}$), come indicato nella figura successiva.



PROVA DI TRAZIONE

- Gli acciai per i quali si distingue nettamente il valore di σ_s vengono definiti "**dolci**"
- Gli acciai per i quali il valore σ_s non è deducibile direttamente ma in maniera convenzionale si definiscono "**duri**"
- Solo per gli acciai "**extra dolci**" si presenta un allungamento spontaneo senza incrementi di tensione (fenomeno dello snervamento), caratterizzato da un tratto sub – orizzontale **S-I**.



TIPI DI ACCIAIO

- Le caratteristiche degli acciai da carpenteria metallica sono elencate al punto 11.3.4 delle NTC 2018.
- Nell'ambito delle costruzioni metalliche è previsto l'impiego di più tipologie di acciaio, classificate in Normativa.
- Quelle più comunemente utilizzate nelle strutture civili sono: **S235** (ex Fe 360), **S275** (ex Fe 430), **S355** (ex Fe 510).
- Il numero che segue la sigla “**S**” rappresenta il valore caratteristico della tensione di snervamento (f_{yk}) in N/mm² (per elementi con spessore minore di 40mm).
- f_{tk} è il valore caratteristico della tensione di rottura.

TIPI DI ACCIAIO

Tabella 11.3.IX – 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_{vk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]	f_{vk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]
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

TIPI DI ACCIAIO

In sede di progettazione si possono assumere convenzionalmente i seguenti valori nominali delle proprietà dei materiali:

- Modulo Elastico $E=210000 \text{ N/mm}^2$
- Modulo di elasticità trasversale $G=E/[2(1+\nu)]=80750 \text{ N/mm}^2$
- Coefficiente di Poisson $\nu=0.3$
- Coefficiente di espansione termica lineare $\alpha=12 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}^{-1}$
(per temperature fino a $100 \text{ } ^\circ\text{C}$)
- Densità $\gamma_s=7850 \text{ kg/m}^3$

RESISTENZA DI CALCOLO DEGLI ACCIAI DA CARPENTERIA

Ricordando che le tipologie di acciaio di impiego corrente nell'ambito delle costruzioni metalliche sono designate attraverso le sigle **S235**, **S275**, **S355**, si indica come resistenza di calcolo il valore f_d , ovvero la tensione di snervamento f_{yk} (precedentemente indicata con il simbolo σ_s) ridotto considerando il suo valore caratteristico f_{yk} diviso di un opportuno coefficiente γ_M :

$$f_d = f_{yk} / \gamma_M$$

Il valore di γ_M dipende dalle modalità con cui si effettua la verifica della sezione (punto 4.2.4.1.1 del DM 17.01.2018).

RESISTENZA DI CALCOLO DEGLI ACCIAI DA CARPENTERIA

Si riporta di seguito la tabella delle NTC 2018 che elenca i valori di γ_M :

Tabella 4.2.V Coefficienti di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità

Resistenza delle Sezioni di Classe 1-2-3-4	$\gamma_{M0} = 1,05$
Resistenza all'instabilità delle membrature	$\gamma_{M1} = 1,05$
Resistenza all'instabilità delle membrature di ponti stradali e ferroviari	$\gamma_{M1} = 1,10$
Resistenza, nei riguardi della frattura, delle sezioni tese (indebolite dai fori)	$\gamma_{M2} = 1,25$

Per i casi di maggiore interesse (Resistenza delle sezioni di classe 1-2-3-4, e Resistenza all'instabilità) si deve adottare un valore di γ_M pari a 1.05.

Es. per un acciaio S275: $f_d = f_{yk}/\gamma_M = 275/1.05 = 261.9 \text{ MPa}$

VERIFICA DEL MATERIALE ACCIAIO

- La prova di trazione fornisce un **valore di resistenza** (f_y o f_t) **di tipo monoassiale**, dunque anche la resistenza di calcolo f_d sarà un valore monoassiale.
- La verifica di resistenza deriverà dal confronto tra la tensione massima indotta dalle azioni e la resistenza di calcolo.

In presenza di **stati tensionali pluriassiali** si considera una **tensione ideale** σ_{id} che tiene conto dell'azione contemporanea di più tensioni, in modo da fornire un **valore monoassiale convenzionale**, che si assume essere equivalente all'effetto prodotto da uno stato tensionale pluriassiale.

VERIFICA DEL MATERIALE ACCIAIO

La tensione ideale viene calcolata come segue:

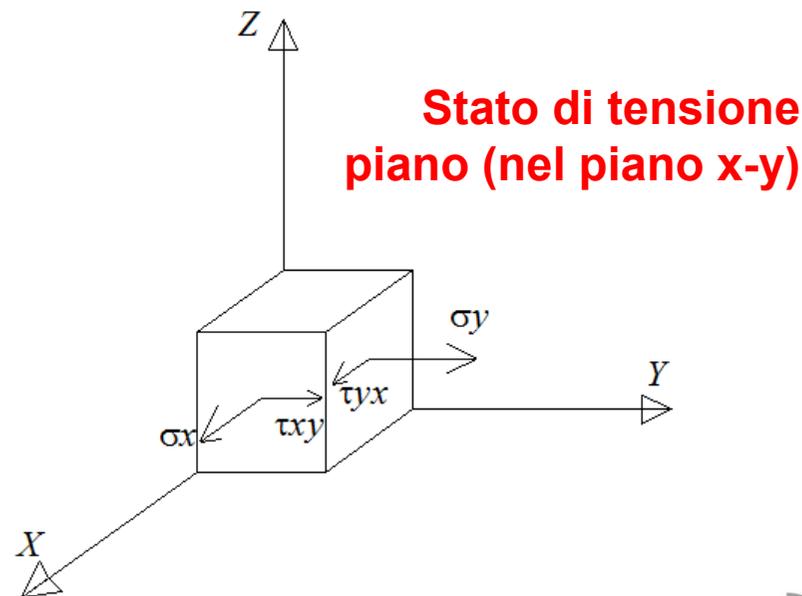
Stato tensionale piano: $\sigma_{id} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2)^{0.5}$

Flessione e taglio : $\sigma_{id} = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{0.5}$

Taglio puro : $\sigma_{id} = \tau_{xy} (3)^{0.5}$

La verifica consiste nel controllare:

$$\sigma_{id} \leq f_d (= f_{yk} / \gamma_{M0})$$

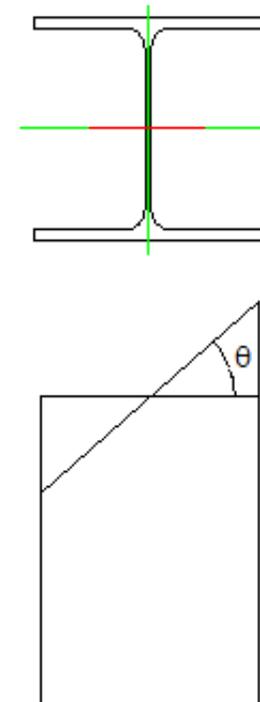
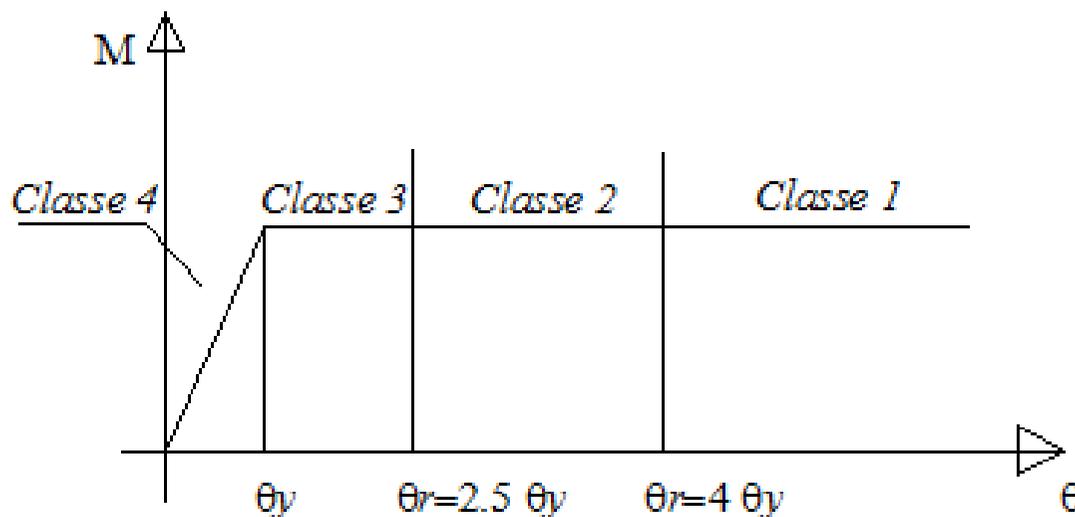


CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI IN ACCIAIO

Le sezioni trasversali degli elementi strutturali si classificano in funzione della loro capacità rotazionale C_θ definita come:

$$C_\theta = (\theta_r / \theta_y) - 1$$

essendo θ_y e θ_r le curvature corrispondenti rispettivamente al raggiungimento della deformazione al limite elastico (snervamento) e ultima.

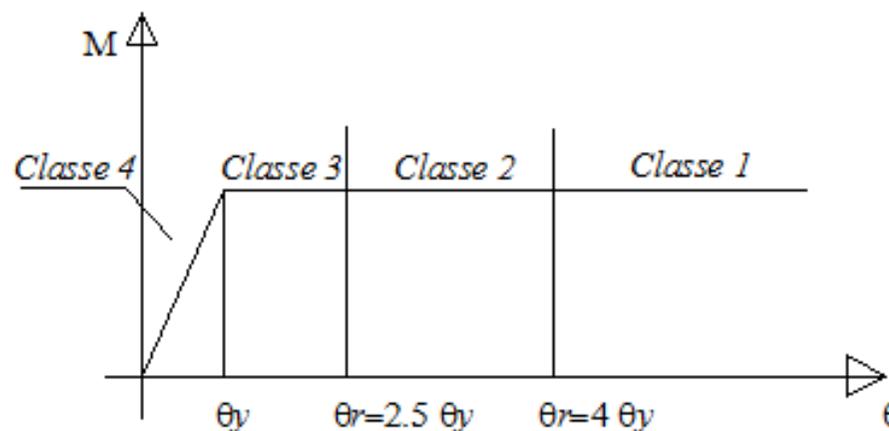


CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI IN ACCIAIO

Si distinguono le seguenti 4 classi di sezioni:

classe 1 quando la sezione, dopo lo snervamento, è in grado di sviluppare una «cerniera plastica» avente la capacità rotazionale richiesta per l'analisi strutturale condotta con il metodo plastico di cui al §4.2.3.2 del DM 14.01.2008 senza subire riduzioni della resistenza. Possono generalmente classificarsi come tali le sezioni con capacità rotazionale $C_{\theta} \geq 3$

classe 2 quando la sezione è in grado di sviluppare il proprio momento resistente plastico, ma con capacità rotazionale limitata. Possono generalmente classificarsi come tali le sezioni con capacità rotazionale $C_{\theta} \geq 1.5$



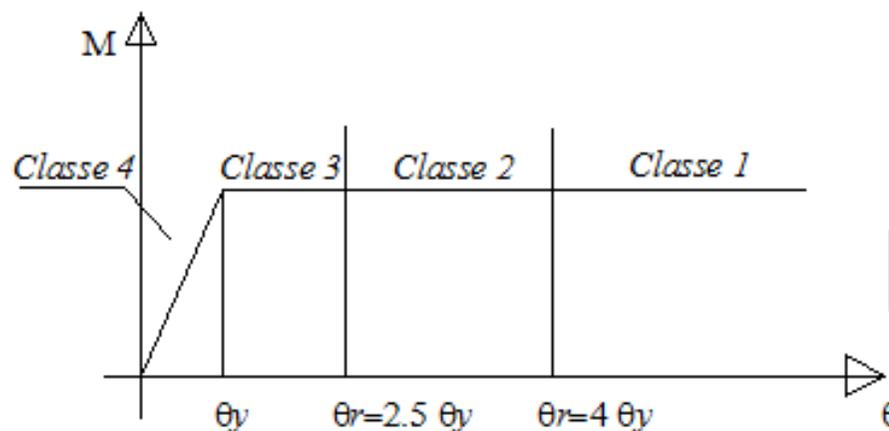
$$C_{\theta} = (\theta_r / \theta_y) - 1$$

CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI IN ACCIAIO

Si distinguono le seguenti 4 classi di sezioni:

classe 3 quando nella sezione le tensioni calcolate nelle fibre estreme compresse possono raggiungere la tensione di snervamento, ma l'instabilità locale impedisce lo sviluppo del momento resistente plastico;

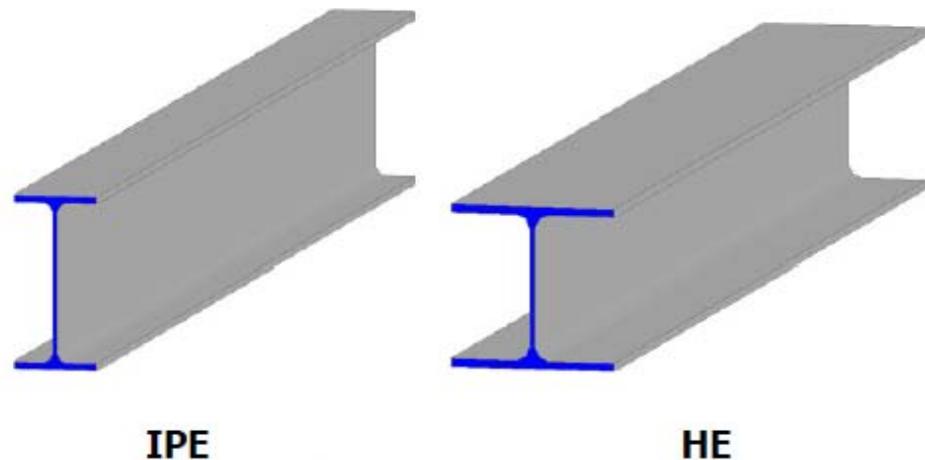
classe 4 quando, per determinarne la resistenza flettente, tagliante o normale, è necessario tener conto degli effetti dell'instabilità locale in fase elastica nelle parti compresse che compongono la sezione.



$$C_{\theta} = (\theta_r / \theta_y) - 1$$

CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI IN ACCIAIO

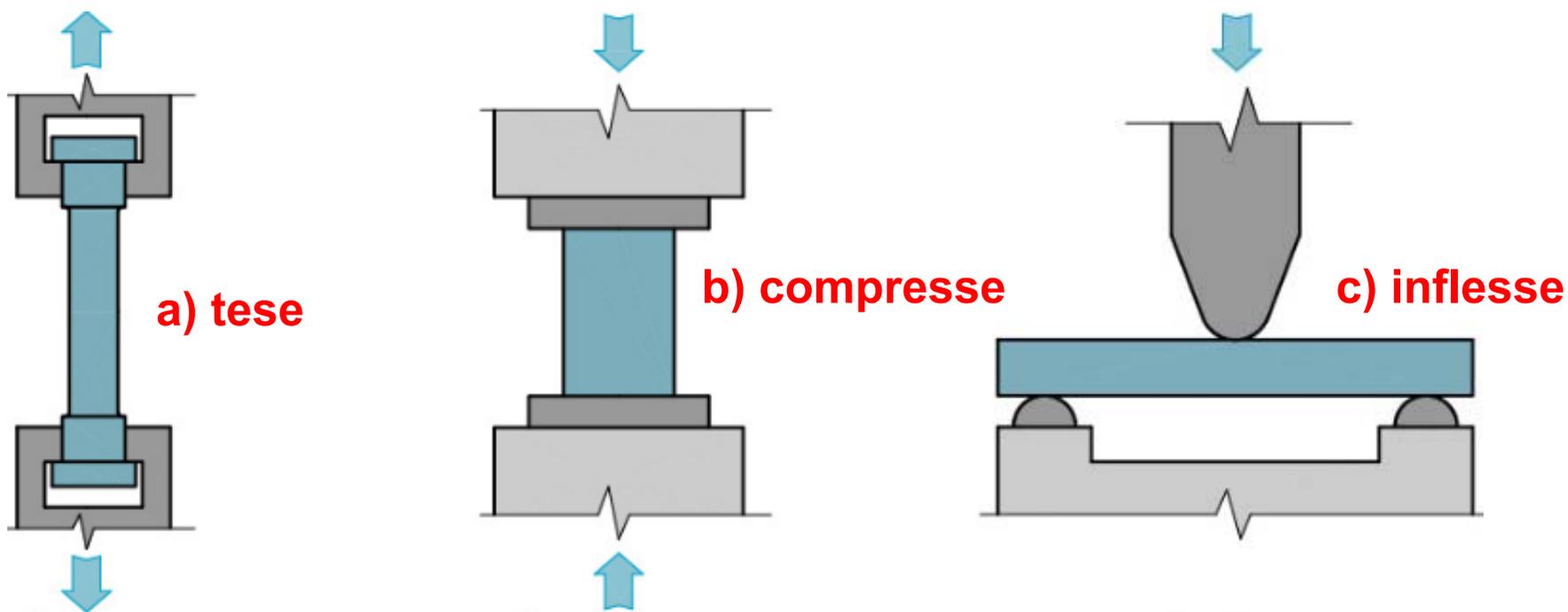
- Le sezioni di classe 1 e 2 si definiscono compatte, quelle di classe 3 moderatamente snelle e quelle di classe 4 snelle.
- Al crescere della classe di appartenenza della sezione diminuisce la duttilità cioè la capacità rotazionale dopo aver raggiunto il primo snervamento.
- Le sezioni più comunemente utilizzate in carpenteria metallica, ossia i profilati tipo IPE e HE, sono di classe 1.



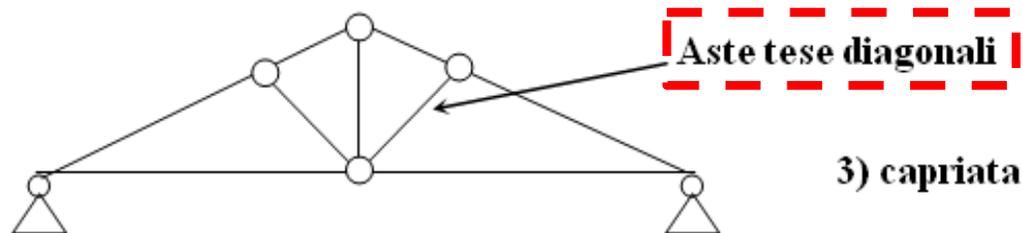
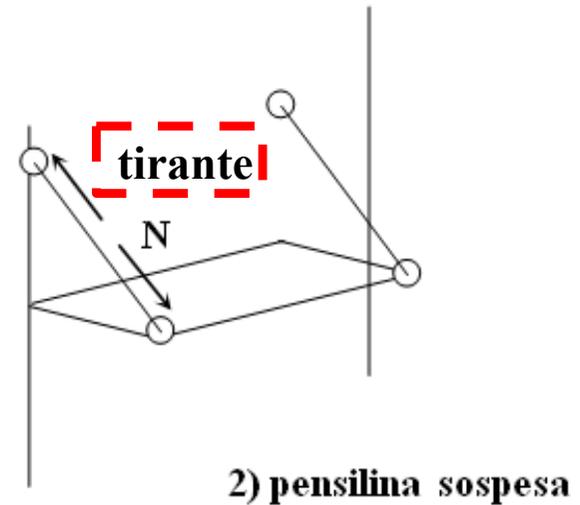
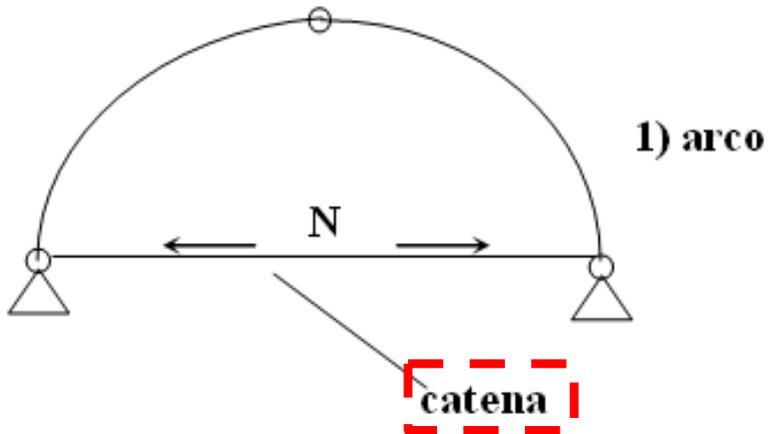
VERIFICA DELLE MEMBRATURE

VERIFICHE DELLE MEMBRATURE

- La verifica delle membrature d'acciaio si caratterizza in funzione dello stato tensionale prodotto dai carichi applicati.
- Si dettaglierà pertanto di seguito il procedimento di verifica delle membrature **tese (a)**, di quelle **compresse (b)** e di quelle **inflexe (c)**, cercando di coglierne il comportamento fisico ed applicando i dettami di norma.



MEMBRATURE TESE



- per la realizzazione di catene e tiranti (tipologie 1) e 2)) si adottano generalmente fili, cavi e tubi;
- per la tipologia 3) si adottano profilati singoli e profilati accoppiati (ad esempio 2 profili a L).

MEMBRATURE TESE: VERIFICA

L'azione assiale di calcolo N_{Ed} , dovuta ai carichi applicati alla struttura, deve rispettare la seguente condizione:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

(§4.2.4.1.2.1, NTC 2018)

dove $N_{t,Rd}$ è la resistenza di calcolo a trazione che, nel caso di membrature con sezioni indebolite da fori per collegamenti bullonati o chiodati, **deve essere assunta pari al minore dei valori $N_{pl,Rd}$ e $N_{u,Rd}$**

a) $N_{pl,Rd}$ è la resistenza plastica della **sezione lorda A**

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (\gamma_{M0} = 1.05)$$

b) $N_{u,Rd}$ è la resistenza a rottura della **sezione netta A_{net}** in corrispondenza dei fori per i collegamenti

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}}$$

dove, con A_{net} si intende l'area netta della sezione, depurata delle filettature (tondini) o dai fori (profilati) e $\gamma_{M2} = 1.25$

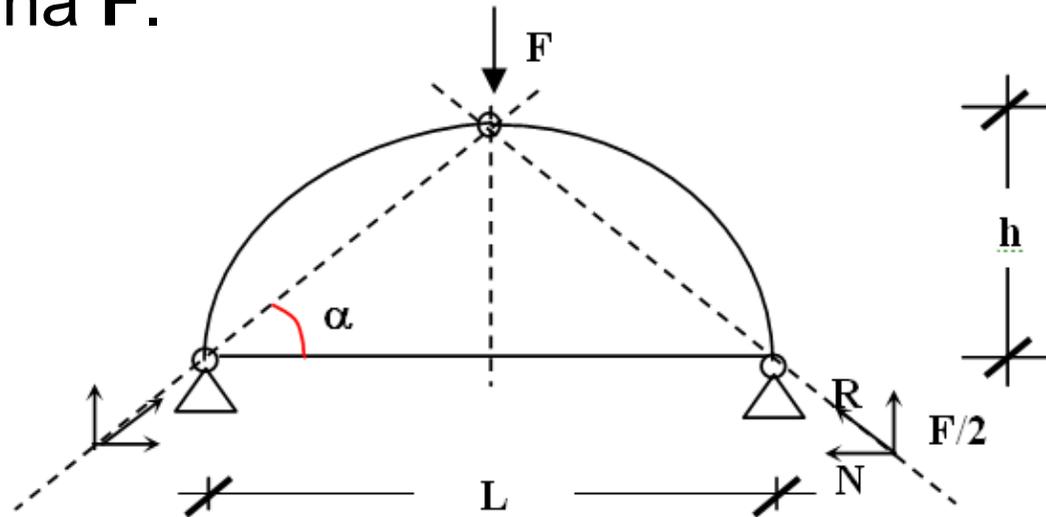
MEMBRATURE TESE: APPLICAZIONE

Si consideri il sistema seguente (arco a tre cerniere) soggetto alla forza esterna F .

Reazioni vincolari

$$R = F/2 * 1/\sin\alpha$$

(con $\text{tg}\alpha = h/(L/2)$)



Sollecitazioni di trazione

nella catena

$$N_{Ed} = R \cos\alpha = F/(2 * \text{tg}\alpha)$$

$$N_{Ed} = (F/2) (L/2h) = FL/(4h)$$

La verifica consiste nel controllare che il valore minore tra $N_{pl,Rd}$ e $N_{u,Rd}$ sia maggiore dell'azione N_{Ed} .

In assenza di fori si verifica direttamente che: $N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}$.

Gli elementi inflessi sono soggetti prevalentemente ad un regime di sollecitazioni flesso-taglianti.

L'esempio più comune è rappresentato da una trave appoggiata alle estremità e soggetta a carichi verticali concentrati o distribuiti.

Dimensionamento e verifiche

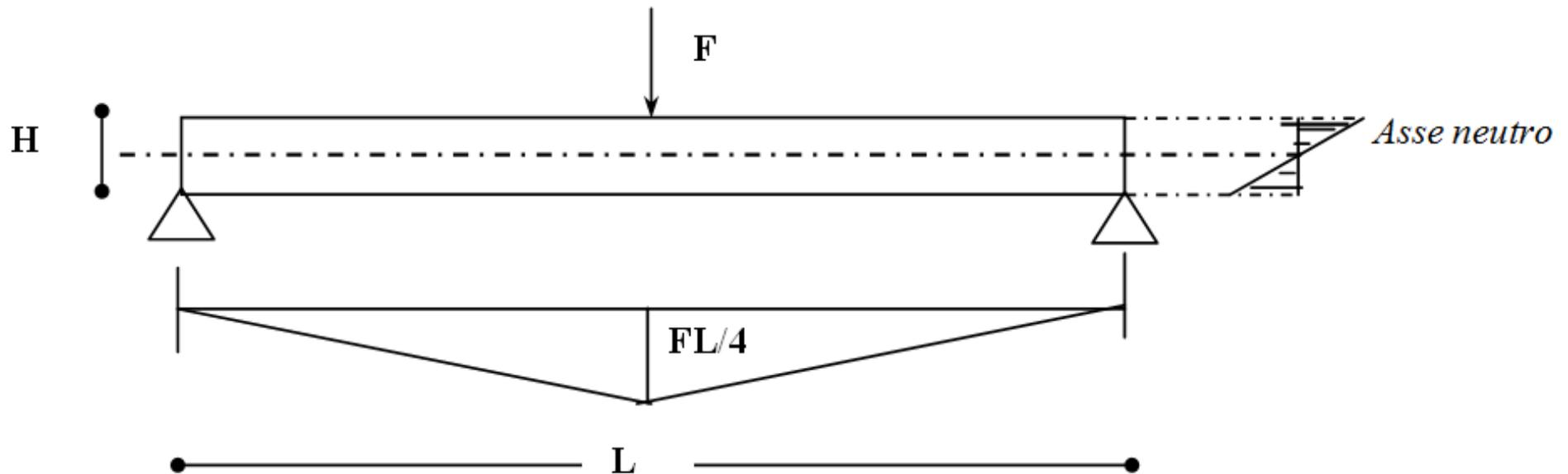
Per gli elementi inflessi si considerano le seguenti verifiche:

- **verifica di resistenza**
- **verifica di deformabilità**

Prima di descrivere come vadano svolte, si confronta la risposta a sollecitazioni flettenti di sezioni aventi forma diversa.

MEMBRATURE INFLESSE

Confronto della resistenza a flessione al variare della sezione



Si consideri lo schema, sopra rappresentato, di trave appoggiata soggetta all'azione di una forza concentrata F in corrispondenza della mezzeria.

Il massimo valore del momento flettente è pari a $FL/4$.

MEMBRATURE INFLESSE

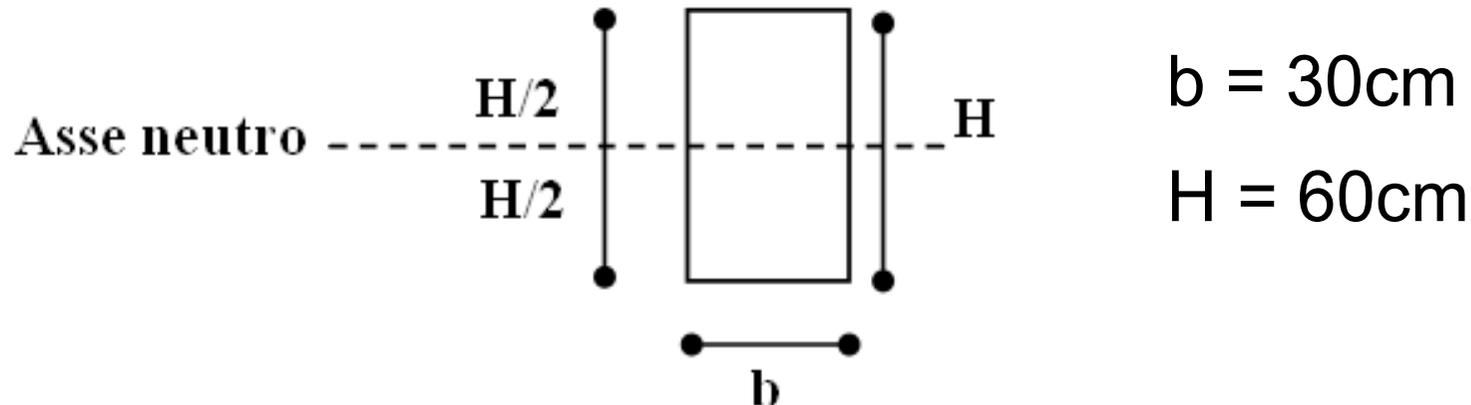
Si vuole confrontare di seguito l'effetto del momento flettente **a parità di area totale** di sezione ma **variandone la morfologia**.

Si ipotizza di adottare una sezione simmetrica rispetto all'asse x (orizzontale) e pertanto le tensioni normali indotte dalla forza F avranno andamento bi-triangolare con asse neutro collocato a metà altezza della sezione $H/2$.

Consideriamo i 3 casi seguenti:

- **Caso 1: sezione rettangolare**
- **Caso 2: sezione tipo HE**
- **Caso 3: sezione tipo IPE**

Caso 1: sezione rettangolare



L'area della sezione ed il momento di inerzia valgono:

$$A_{\text{rett}} = 1800 \text{ cm}^2$$

$$I_{\text{rett}} = 1/12 bH^3 = 54 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

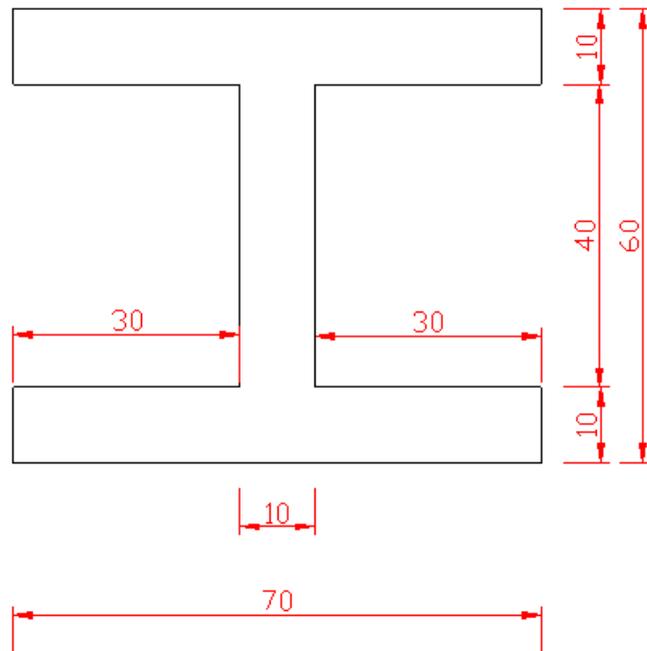
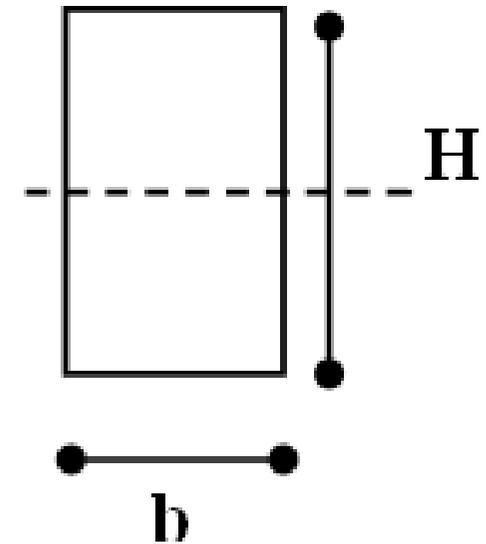
da cui si ottiene

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{I_{\text{rett}}} \frac{H}{2} = \frac{FL/4}{I_{\text{rett}}} \frac{H}{2}$$

MEMBRATURE INFLESSE

Caso 2: sezione tipo HE

Rispetto alla sezione rettangolare si mantengono costanti l'area ($A_{HE}=1800\text{cm}^2$) e l'altezza ($H=60\text{cm}$). Le altre dimensioni sono indicate in figura.



$$I_{HE} = (70 \cdot 60^3 / 12) - 2 \cdot (40 - 30^3) / 12 = 108 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

Si noti che: $I_{HE} / I_{rett} = 2$

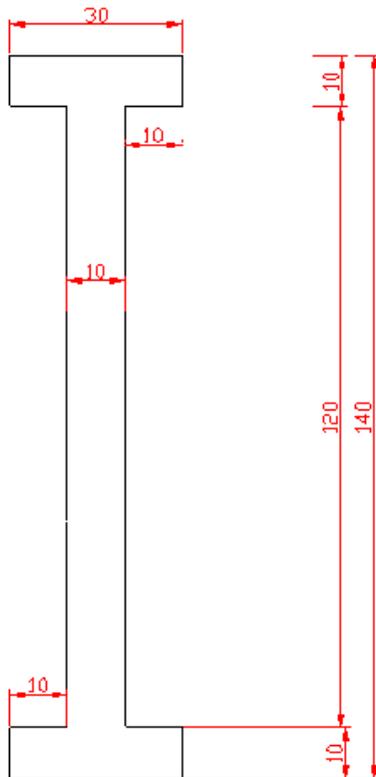
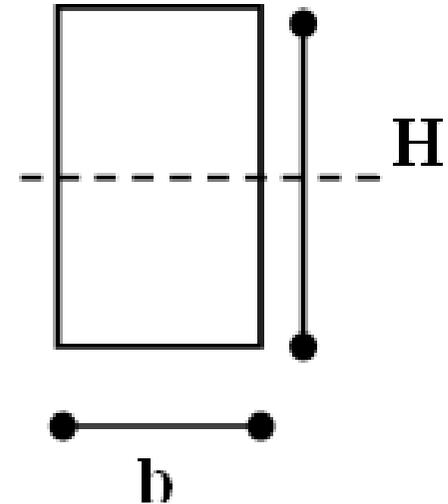
Essendo $\sigma_{max} = \frac{M}{I_{HE}} \frac{H}{2}$ si ottiene:

$$\sigma_{max,HE} = 0.5 \cdot \sigma_{max,rett}$$

MEMBRATURE INFLESSE

Caso 3: sezione tipo IPE

Rispetto alla sezione rettangolare si mantengono costanti l'area ($A_{HE}=1800\text{cm}^2$) e la base ($B=30\text{cm}$). Le altre dimensioni sono indicate in figura.



$$I_{IPE} = (30 \cdot 140^3 / 12) - 2 \cdot (10 \cdot 120^3) / 12 = 398 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

$$I_{IPE} / I_{rett} = 398 \times 10^4 / 54 \times 10^4 = 7.3$$

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I_{IPE}} \frac{H}{2}$$

$$\sigma_{max, IPE} = (1/3.2) \cdot \sigma_{max, rett}$$

MEMBRATURE INFLESSE

Pertanto, pur mantenendo costante l'area A della sezione, ossia la quantità di materiale, si possono avere inerzie ed effetti molto diversi modificando la geometria della sezione.

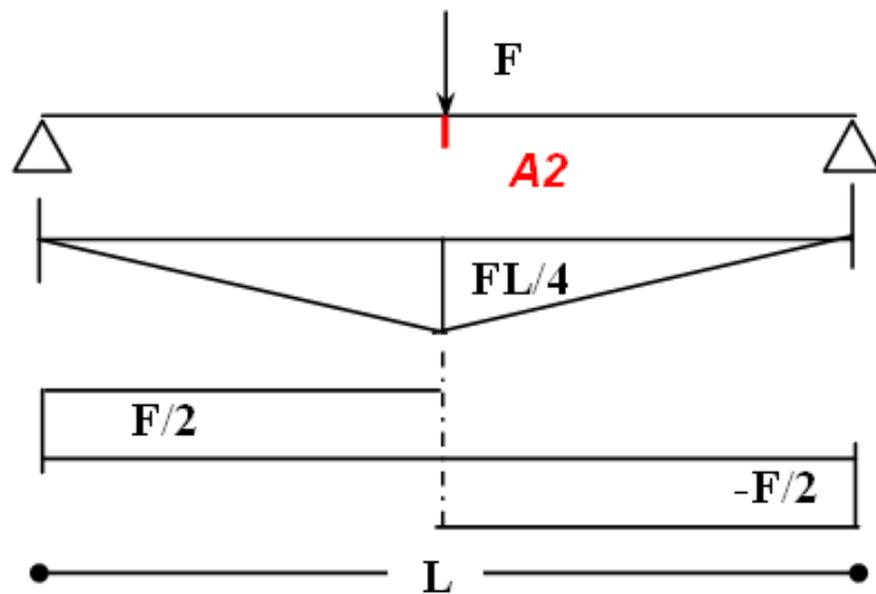
	I_{rett}	I_{HE}	I_{IPE}
	54×10^4	108×10^4	398×10^4
I / I_{rett}	1	2	7.3
$\sigma / \sigma_{\text{rett}}$	1	0.5	0.31

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI RESISTENZA

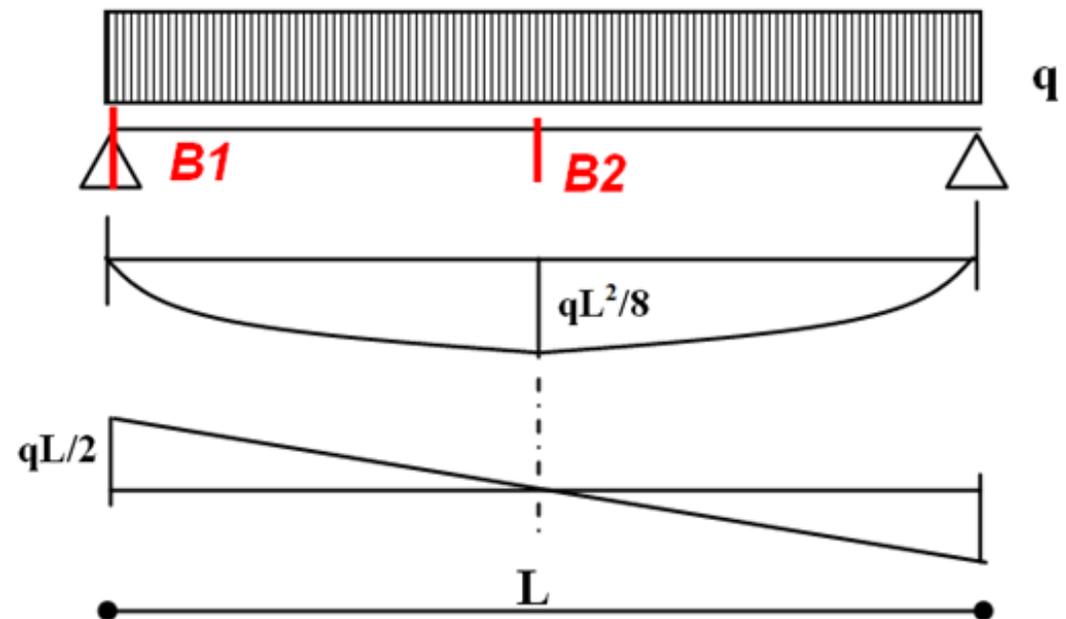
Si consideri la trave appoggiata di luce L rappresentata di seguito.

Calcolando le sollecitazioni si ottiene che le sezioni critiche sono:

- la A_2 per il caso a)
- la B_1 (taglio max) e la B_2 (momento flettente max) per il caso b).



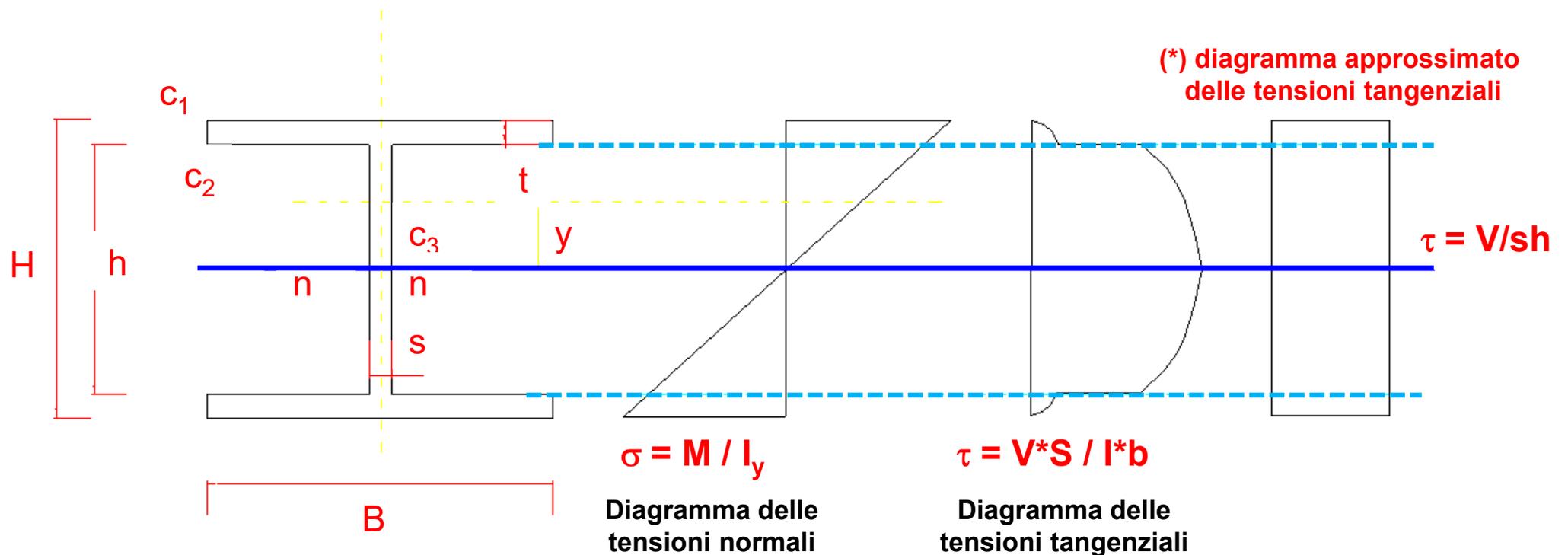
Caso a)



Caso b)

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI RESISTENZA

Diagrammi delle tensioni normali e tangenziali nella generica sezione



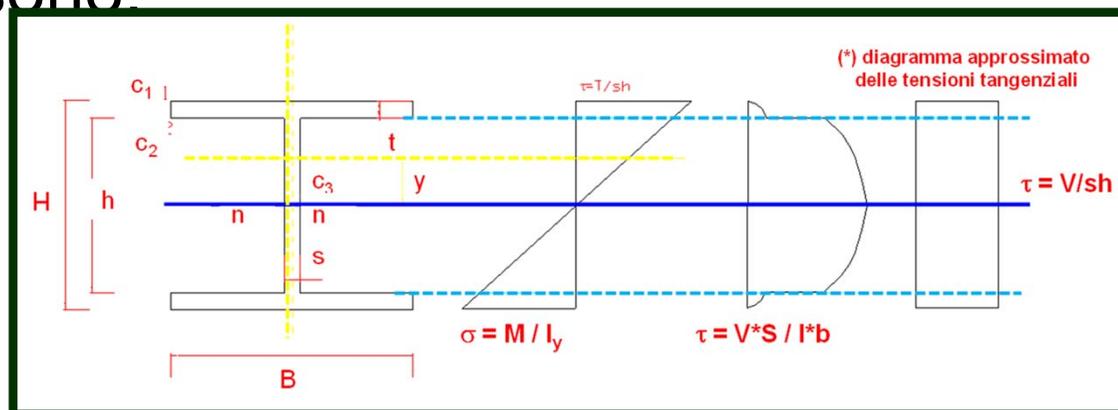
MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI RESISTENZA

Spostando l'attenzione dall'intera trave alla singola sezione, le fibre critiche sono:

C₁ → σ_{\max}

C₂ → $\sigma_{\text{id}} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{0.5}$

C₃ → τ_{\max}



Il valore della massima tensione normale è:

$$\sigma_{\max} = (M/I) H/2 \quad \rightarrow \quad \sigma_{\max} = M/W$$

$$W = I/(H/2)$$

$$I = [B t (H/2)^2] * 2 + sh^3/12$$

$$W = (BtH^2/2 + sh^3/12) * 2/H$$



$$W \approx BtH$$

$$\sigma_{\max} = M/(BtH)$$

W ≈ BtH assumendo $H \approx h$ e trascurando il termine $(sh/6)$ rispetto al termine (Bt)

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI RESISTENZA

Per quanto riguarda l'effetto del taglio, in fase di dimensionamento si può anche assumere (vedi diagramma (*)) che:

$$\tau_{\max} = V/(sh)$$

VERIFICHE

Per le fibre c_1 e c_3 bisogna, rispettivamente, controllare che:

$$\begin{aligned}\sigma_{id} &= \sigma_{\max} \leq f_d \\ \sigma_{id} &= \tau_{\max}(3)^{0.5} \leq f_d\end{aligned}$$

Per le fibre c_2 :

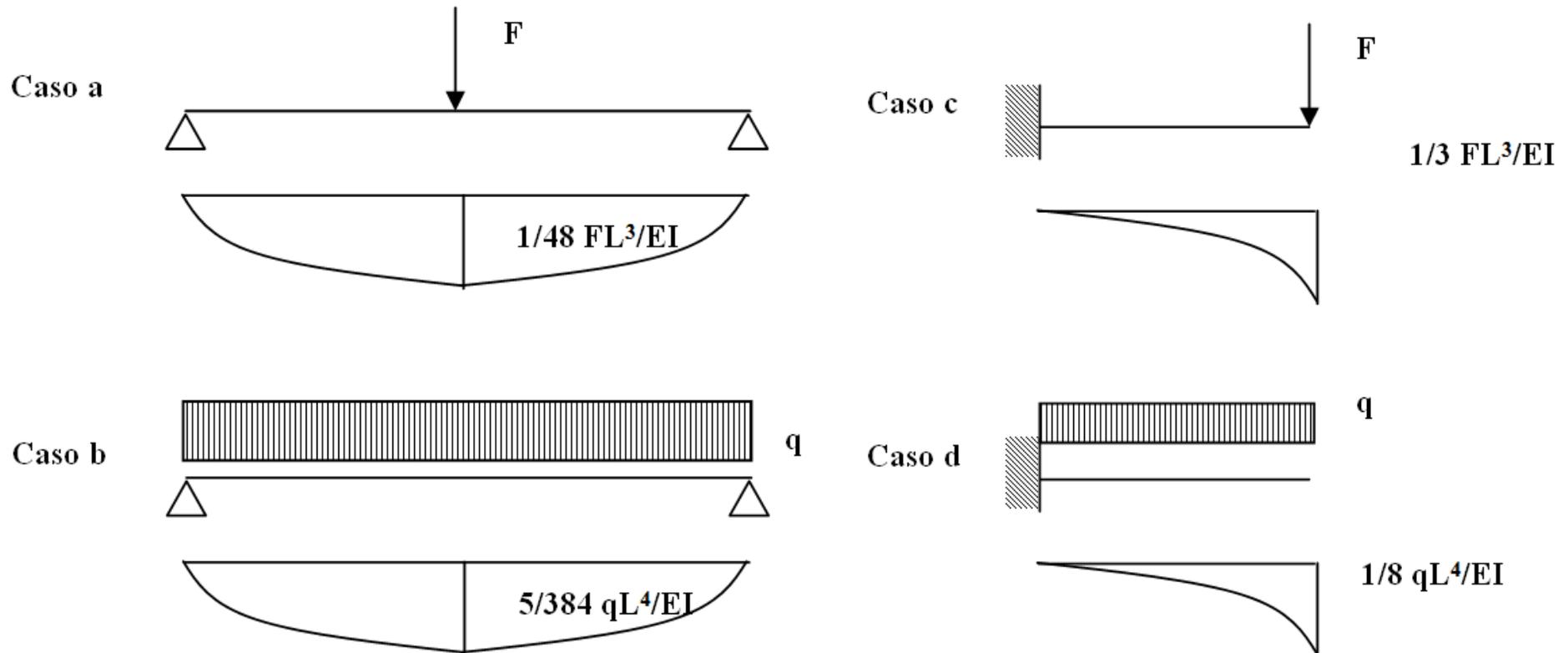
$$M \rightarrow \sigma_{c2}$$

$$V \rightarrow \tau_{c2}$$

$$\sigma_{id} = [(\sigma_{c2})^2 + 3(\tau_{c2})^2]^{0.5} \leq f_d$$

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI DEFORMABILITÀ

Per gli schemi statici di seguito riportati sono disponibili nella manualistica corrente i valori degli spostamenti massimi δ_{\max} prodotti da un assegnato carico applicato:



MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI DEFORMABILITÀ

Le NTC 2018 stabiliscono dei valori limite per δ_{\max} , derivanti da:

- esigenza di garantire la funzionalità delle strutture
- evitare danni alle opere complementari (impianti, intonaci, tamponature...).

Le indicazioni riguardo i massimi valori degli spostamenti verticali sono riportati al punto 4.2.4.2.1 delle NTC in termini di frazioni α della lunghezza L dell'elemento da verificare.

La verifica di deformabilità si ritiene soddisfatta allorquando si ha:

$$\delta_{\max} \leq \alpha L$$

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI DEFORMABILITÀ

Nel calcolo della freccia totale deve tenersi in conto anche la eventuale contro freccia δ_c fornita in fase di progetto al fine di limitare il valore dell'abbassamento.

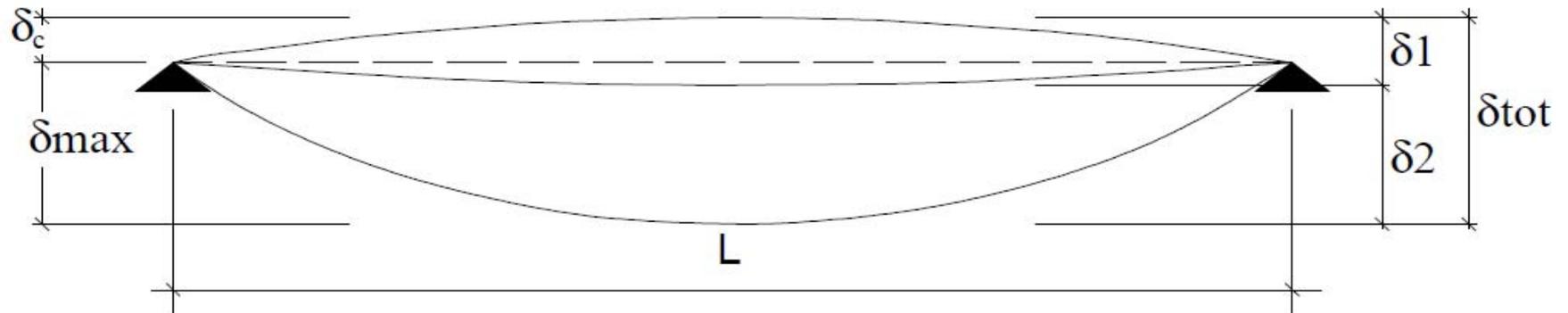


Figura 4.2.1 - Definizione degli spostamenti verticali per le verifiche in esercizio

essendo:

- δ_c la monta iniziale della trave,
- δ_1 lo spostamento elastico dovuto ai carichi permanenti,
- δ_2 lo spostamento elastico dovuto ai carichi variabili,
- δ_{max} lo spostamento nello stato finale, depurato della monta iniziale = $\delta_{tot} - \delta_c$.

$$\text{Verifica: } \delta_{max} \leq \alpha L$$

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI DEFORMABILITÀ

Limiti di deformabilità

Tabella 4.2.X Limiti di deformabilità per gli elementi di impalcato delle costruzioni ordinarie

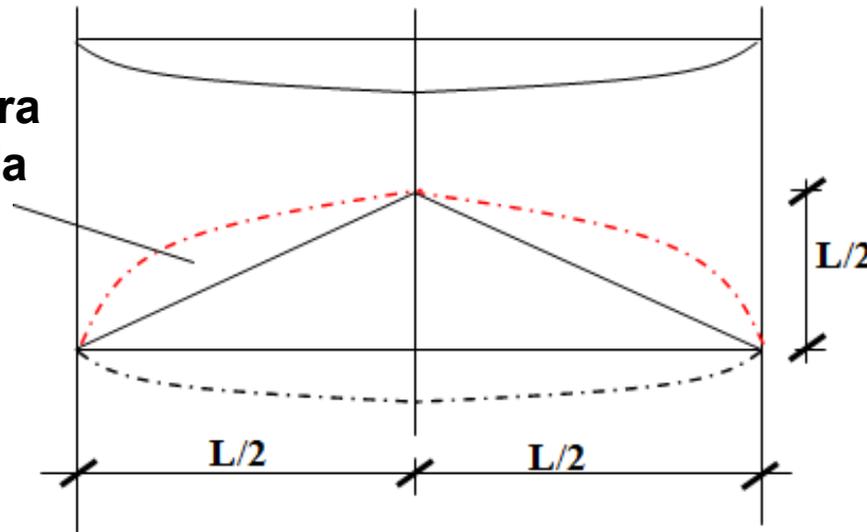
Elementi strutturali	Limiti superiori per gli spostamenti verticali	
	$\frac{\delta_{\max}}{L}$	$\frac{\delta_2}{L}$
Coperture in generale	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{250}$
Coperture praticabili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai in generale	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai o coperture che reggono intonaco o altro materiale di finitura fragile o tramezzi non flessibili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{350}$
Solai che supportano colonne	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$
Nei casi in cui lo spostamento può compromettere l'aspetto dell'edificio	$\frac{1}{250}$	

In caso di specifiche esigenze tecniche e/o funzionali tali limiti devono essere opportunamente ridotti.

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI DEFORMABILITÀ

Esempio: max spostamento in una trave portante tamponature

Parte di muratura che scarica sulla trave

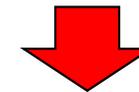
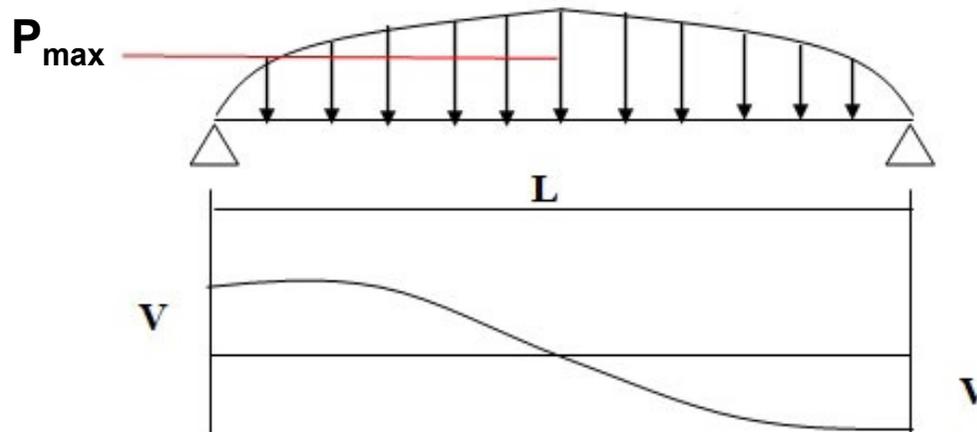


$$M_{\max} = 0.1042 P_{\max} L^2$$

$$T = P_{\max} L/3$$

$$\delta = 0.01059 P_{\max} L^4/EI$$

Peso del muro
(effetto arco)



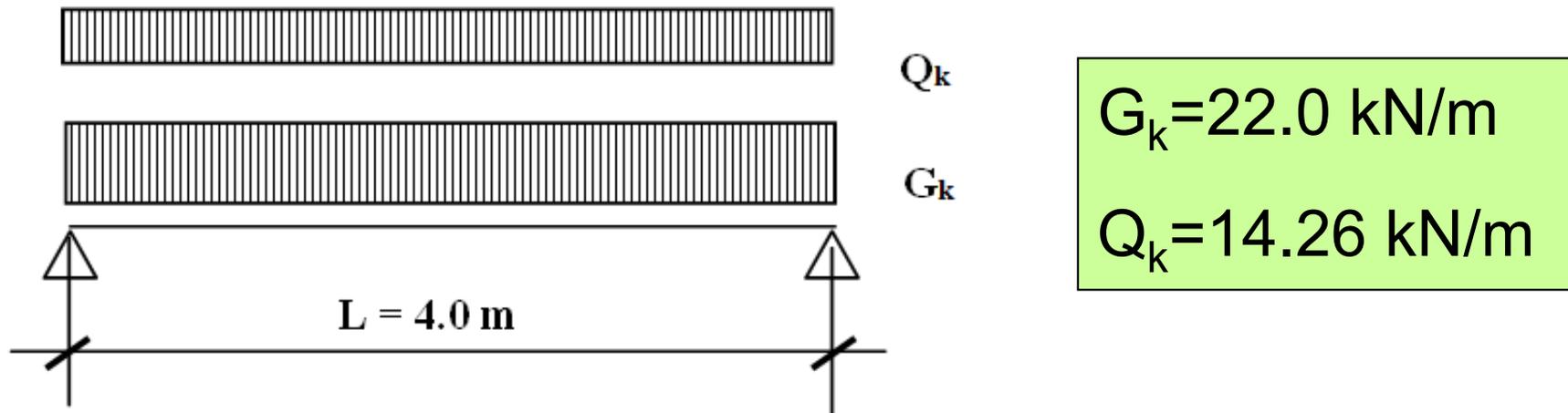
Deve risultare

$$\delta \leq \delta_{\max}$$

$$\text{ossia } \delta \leq 1/250 L$$

Applicazione: verifica di una trave appoggiata

Si riporta di seguito un esempio di verifica di una trave appoggiata, applicando le relazioni generali descritte ai punti precedenti, secondo il metodo degli SL.



Si ipotizza di utilizzare un profilo **IPE240** in acciaio **S355**:

$$f_{yk} = 355 \text{ MPa}$$

$$f_d = f_{yk} / \gamma_{M0} = 355 / 1.05 = 338 \text{ MPa}$$

MEMBRATURE INFLESSE: VERIFICHE DI DEFORMABILITÀ

Combinazioni di carico:

S.L.U. $F_{d,SLU} = 1.3 G_k + 1.5 Q_k = 50 \text{ kN/m}$

$$M_{sd,SLU} = F_d L^2/8 = 100.0 \text{ kNm}$$

S.L.E. (rara) $F_{d,SLE} = G_k + Q_k = 36.26 \text{ kN/m}$

Freccia max da norma (elementi fragili):

$$\delta_{\max} \leq 1/250 L = 400/250 = 1.60 \text{ cm}$$

$$\delta_2 \leq 1/350 L = 400/350 = 1.14 \text{ cm}$$

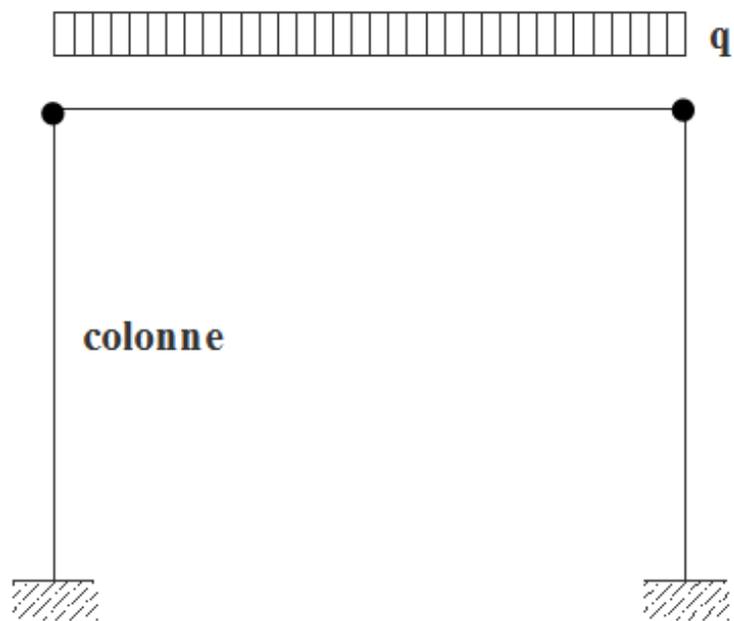
Verifica IPE240 ($I=3890 \text{ cm}^4$):

$$\sigma_{\max} = (M_{sd}/I) * H/2 = 308.5 \text{ MPa} < f_d \quad \text{ok}$$

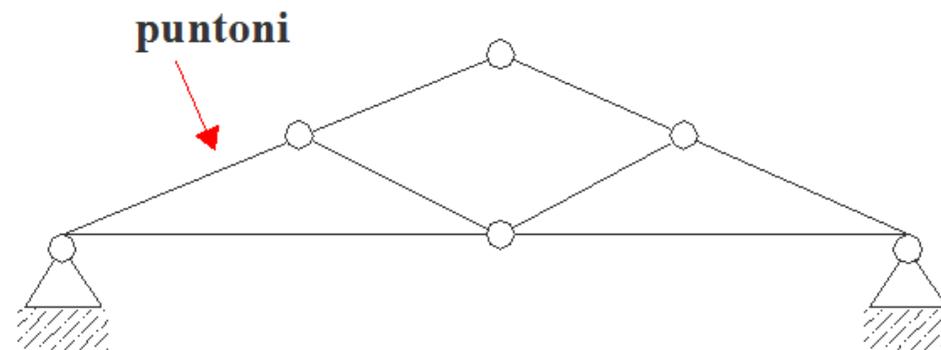
$$\delta_{\max} = 5/384 * F_{d,SLE} * L^4/EI = 1.48 \text{ cm} < 1.60 \text{ cm} \quad \text{ok}$$

$$\delta_2 = 5/384 * F_{d,Qk} * L^4/EI = 0.58 \text{ cm} < 1.14 \text{ cm} \quad \text{ok}$$

MEMBRATURE COMPRESSE

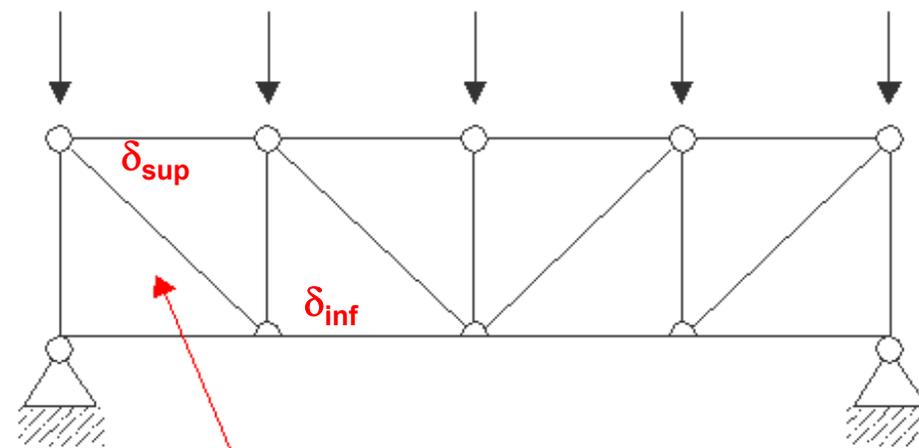
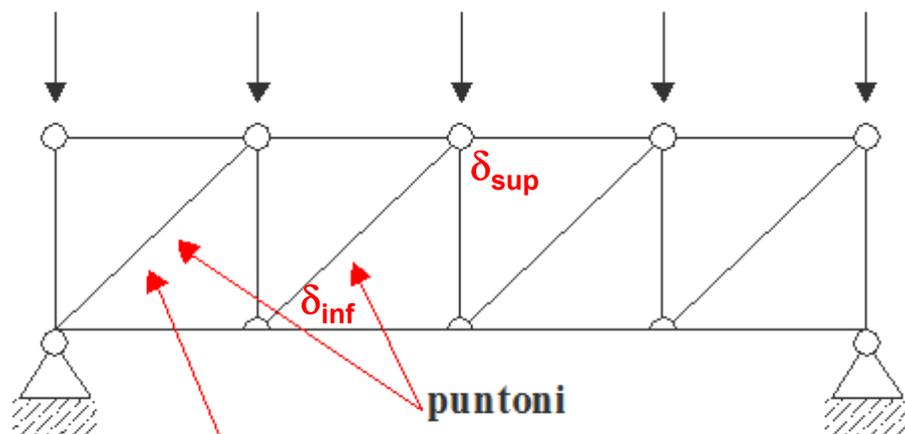


Esempi di strutture con elementi compressi



$\delta_{sup} > \delta_{inf} \rightarrow$ elemento compresso

$\delta_{sup} < \delta_{inf} \rightarrow$ elemento teso



Disposizione "errata"

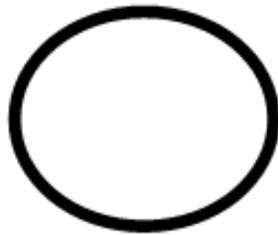
Disposizione corretta

MEMBRATURE COMPRESSE: VERIFICHE DI RESISTENZA

Per le colonne destinate a sopportare carichi di compressione si adottano generalmente i profili indicati di seguito:

Sezioni chiuse

(prevalenza di carichi verticali)



Sezioni aperte

(anche per carichi orizzontali)



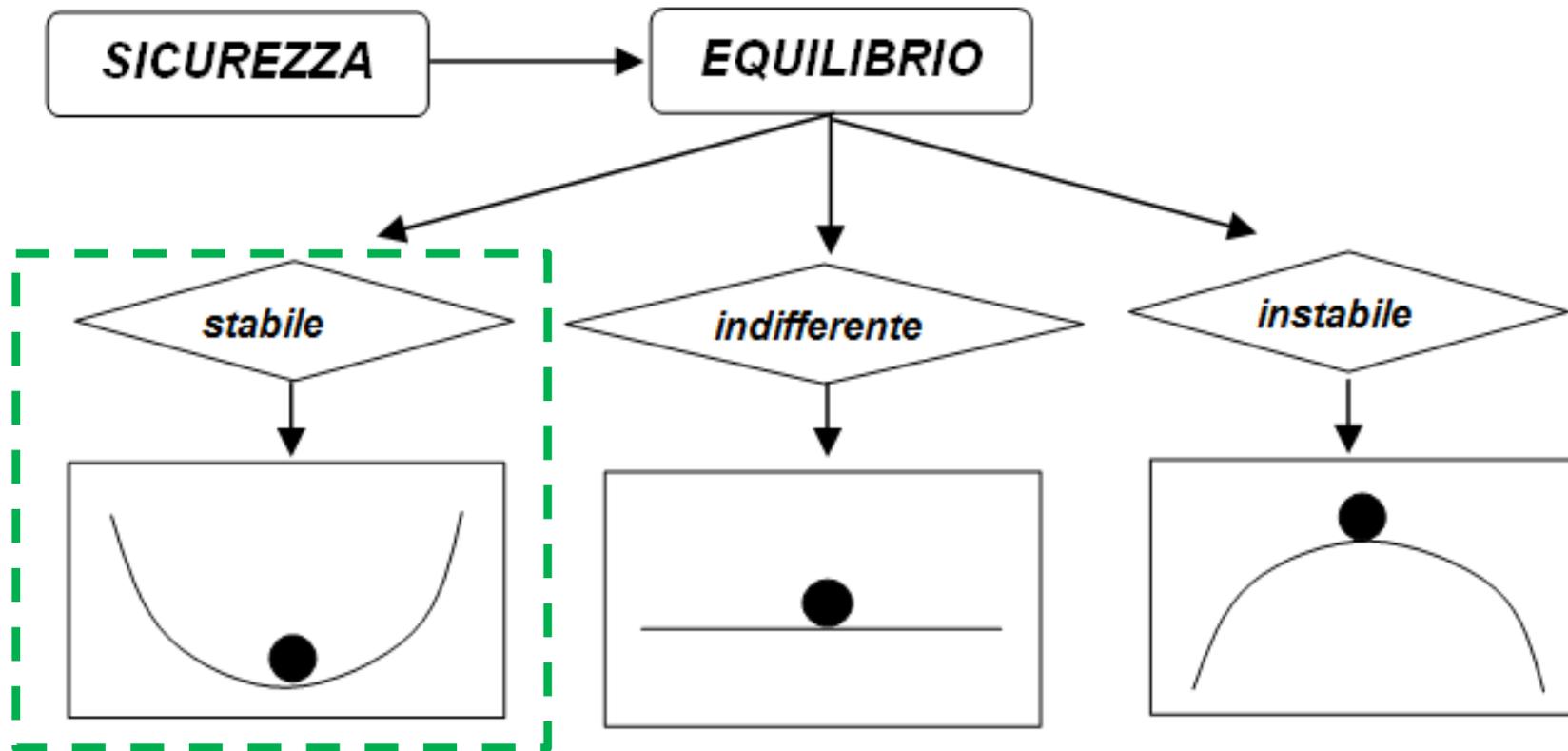
La relazione da controllare ai fini della **verifica a compressione semplice** è:

$$\sigma = N/A_n \rightarrow \sigma \leq f_d$$

In realtà una «normale verifica di resistenza» non si effettua praticamente mai poiché il comportamento di un'asta compressa è essenzialmente condizionato dal fenomeno dell'instabilità.

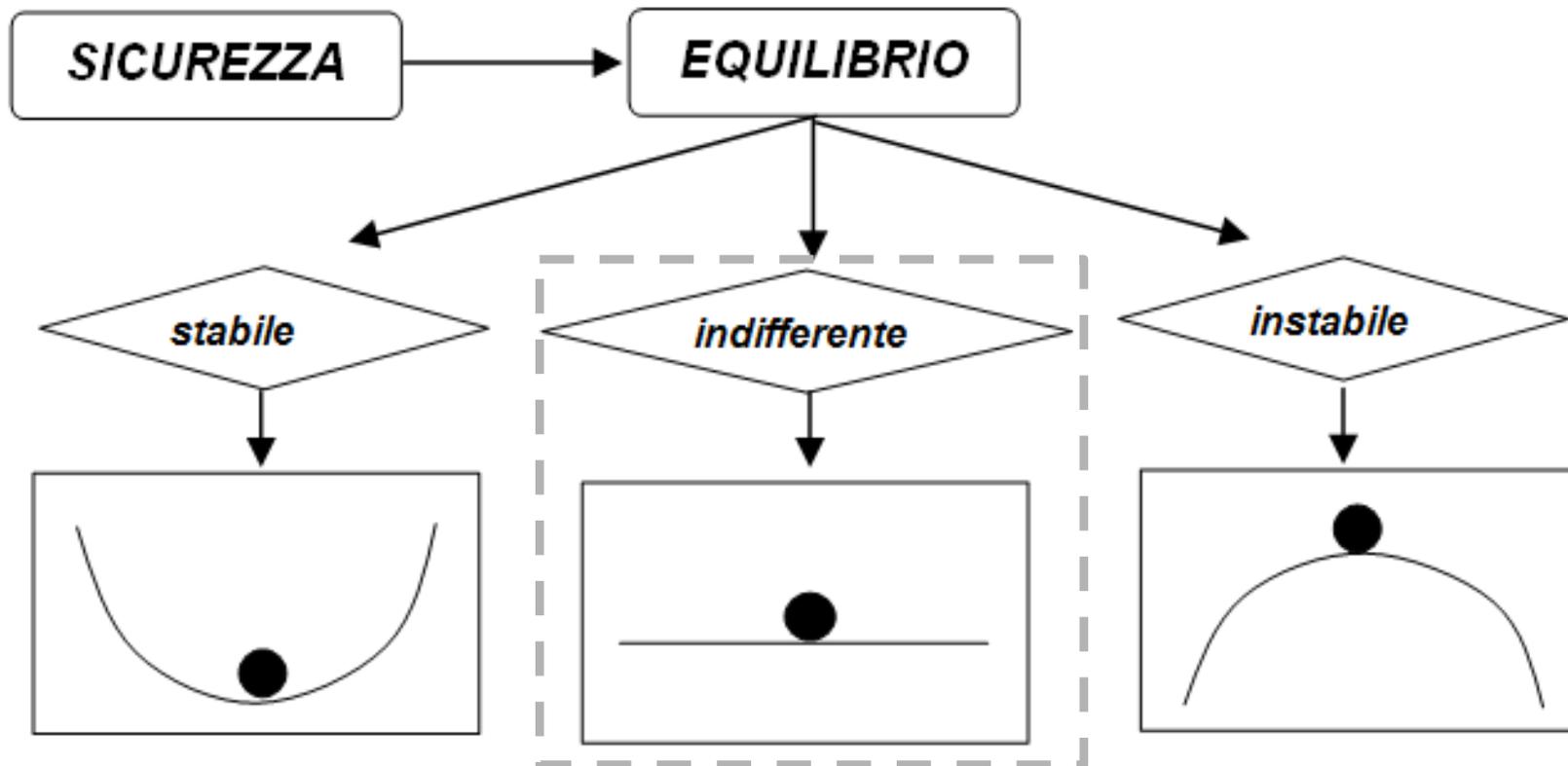
In genere ci occupiamo di sicurezza dando per scontato che la struttura sia in equilibrio.

MEMBRATURE COMPRESSE: QUALITÀ DELL'EQUILIBRIO



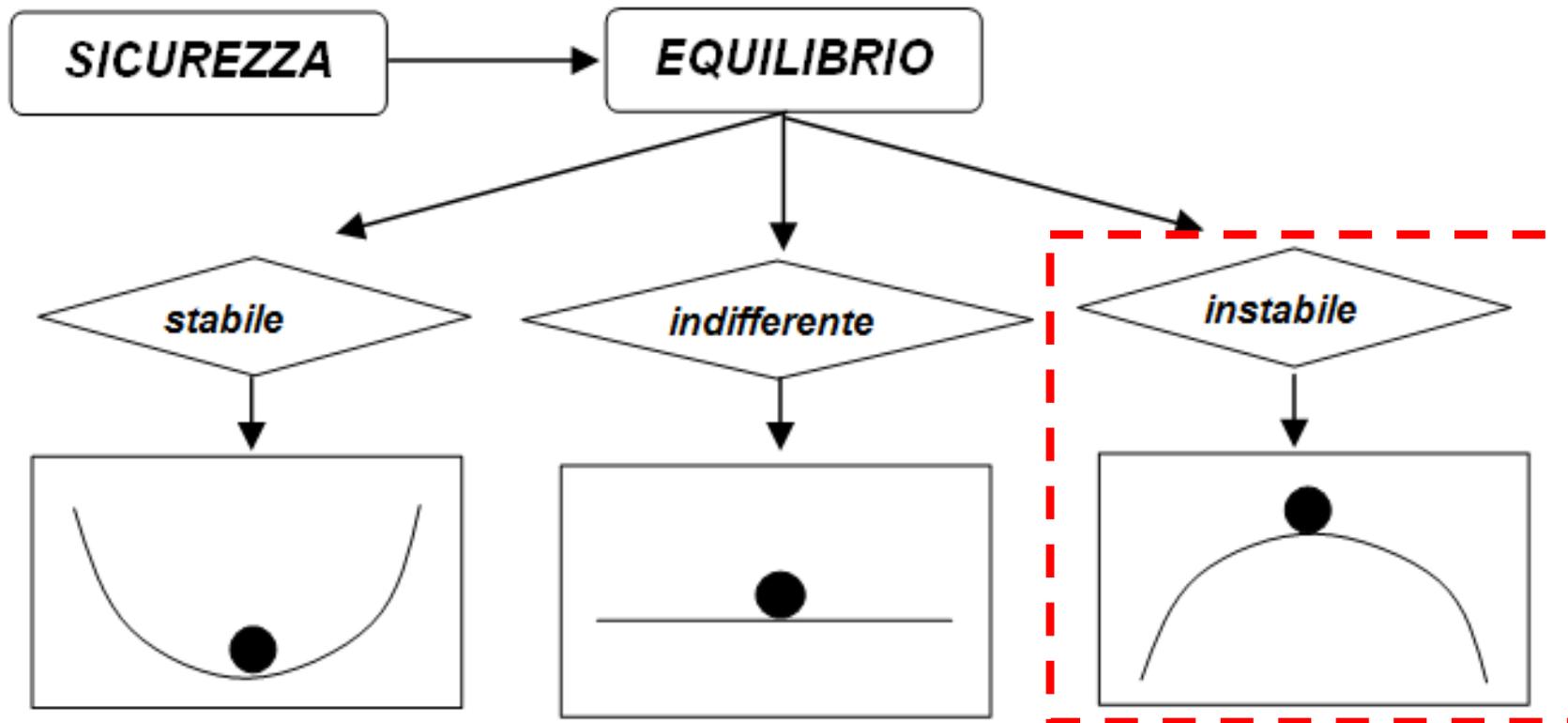
L'equilibrio **stabile** è indicativo del comportamento per il quale ad un allontanamento del corpo dal punto di potenziale minimo corrisponde il ritorno nella posizione di partenza.

MEMBRATURE COMPRESSE: QUALITÀ DELL'EQUILIBRIO



L'equilibrio **indifferente** è proprio del corpo che non risente dello spostamento dalle condizioni iniziali ossia, una volta rimossa la forza che ha determinato l'allontanamento, il corpo resta dove è stato spostato e non ritorna nella posizione di partenza.

MEMBRATURE COMPRESSE: QUALITÀ DELL'EQUILIBRIO



L'equilibrio **instabile** è caratterizzato dal fatto che una perturbazione delle condizioni iniziali, anche molto piccola, allontana irreversibilmente il corpo da tali condizioni iniziali.

MEMBRATURE COMPRESSE: VERIFICHE DI RESISTENZA

Nelle verifiche «classiche» di resistenza abbiamo sempre a che fare con una condizione di **equilibrio stabile**.

Al contrario, la stabilità dell'equilibrio può NON essere garantita nel caso delle aste compresse snelle.

CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

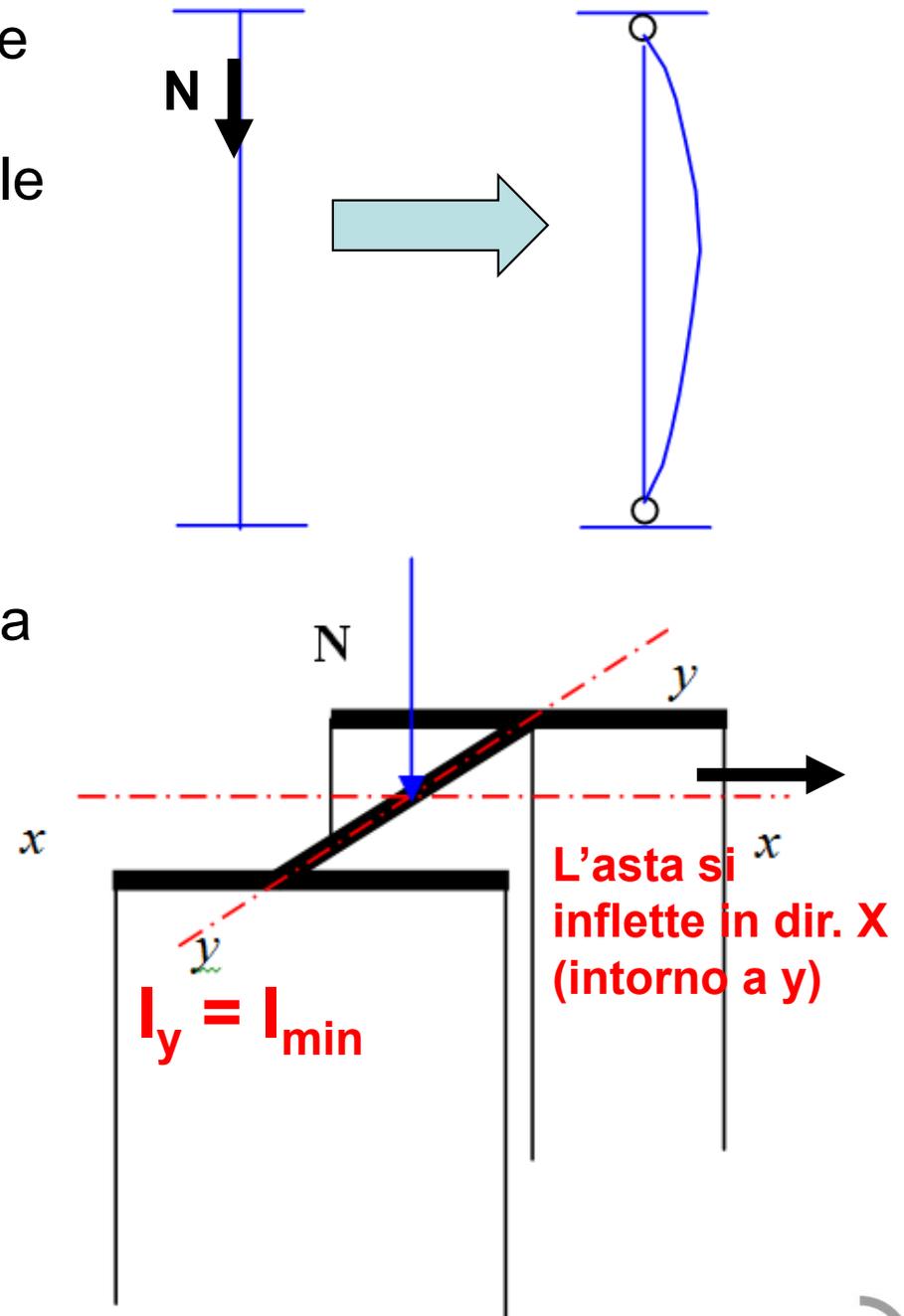
Un'asta metallica soggetta ad un'azione di compressione, se eccessivamente snella, può instabilizzarsi in rapporto alle condizioni di:

- (i) Carico
- (ii) Geometriche
- (iii) Vincolari

Ossia può inflettersi ruotando attorno all'asse in cui presenta la minore inerzia flessionale I_{\min} .

Esempio 1: elemento soggetto a compressione (N)

La direzione di minore inerzia è la x, pertanto l'asta si infletterà in dir. x, ossia attorno all'asse y.



CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

Il parametro meccanico che maggiormente condiziona il fenomeno dell'instabilità è la **snellezza**, indicata con λ .

La snellezza di un'asta è funzione:

- della sua **lunghezza libera di inflessione L_0** (a sua volta dipendente dalla lunghezza geometrica L e dalle condizioni di vincolo dell'asta)
- del **raggio di inerzia minimo ρ_{\min}** , che porta in conto l'inerzia della sezione trasversale

$$\lambda = L_0 / \rho_{\min}$$

CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

Nel caso della colonna dell'esempio 1 si ha:

$$I_y = I_{\min} \rightarrow \rho_{\min} = (I_{\min} / A)^{0.5}$$

dove **A** è l'area della sezione trasversale.

Per ogni asta, nota la sua lunghezza geometrica L , la sua sezione e le condizioni di vincolo in testa ed al piede, è possibile calcolare il valore dell'azione di compressione N che la instabilizzerebbe.

Questo valore è definito **carico critico** N_{crit} .

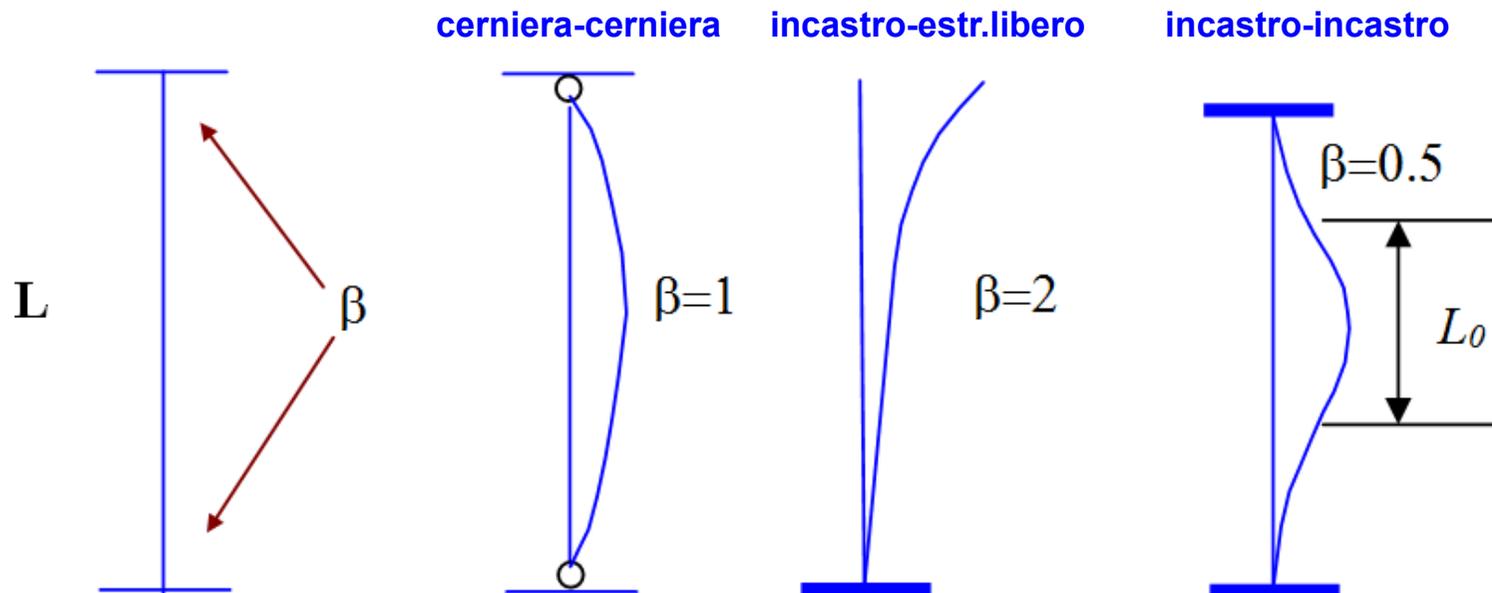
$$N_{\text{crit}} = \pi^2 E I_{\min} / (\beta L)^2$$

(definizione di carico critico Euleriano)

CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

$$N_{\text{crit}} = \pi^2 E I_{\text{min}} / (\beta L)^2$$

- E è il modulo elastico normale del materiale di cui è fatta l'asta (es. acciaio: $E=210.000 \text{ MPa}$)
- β tiene conto delle condizioni di vincolo
- $L_0 = \beta L$ è la lunghezza libera di inflessione, ossia la distanza tra due punti di flesso consecutivi della deformata



CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

Le ipotesi poste alla base della espressione fornita da Eulero sono le seguenti:

- 1) **Asta ideale** (ossia priva di imperfezioni)
- 2) **Materiale a comportamento elastico - lineare**
- 3) **Materiale infinitamente resistente**

L'espressione di Eulero: $N_{\text{crit}} = \pi^2 E I_{\text{min}} / (\beta L)^2$
può essere riscritta nella seguente forma:

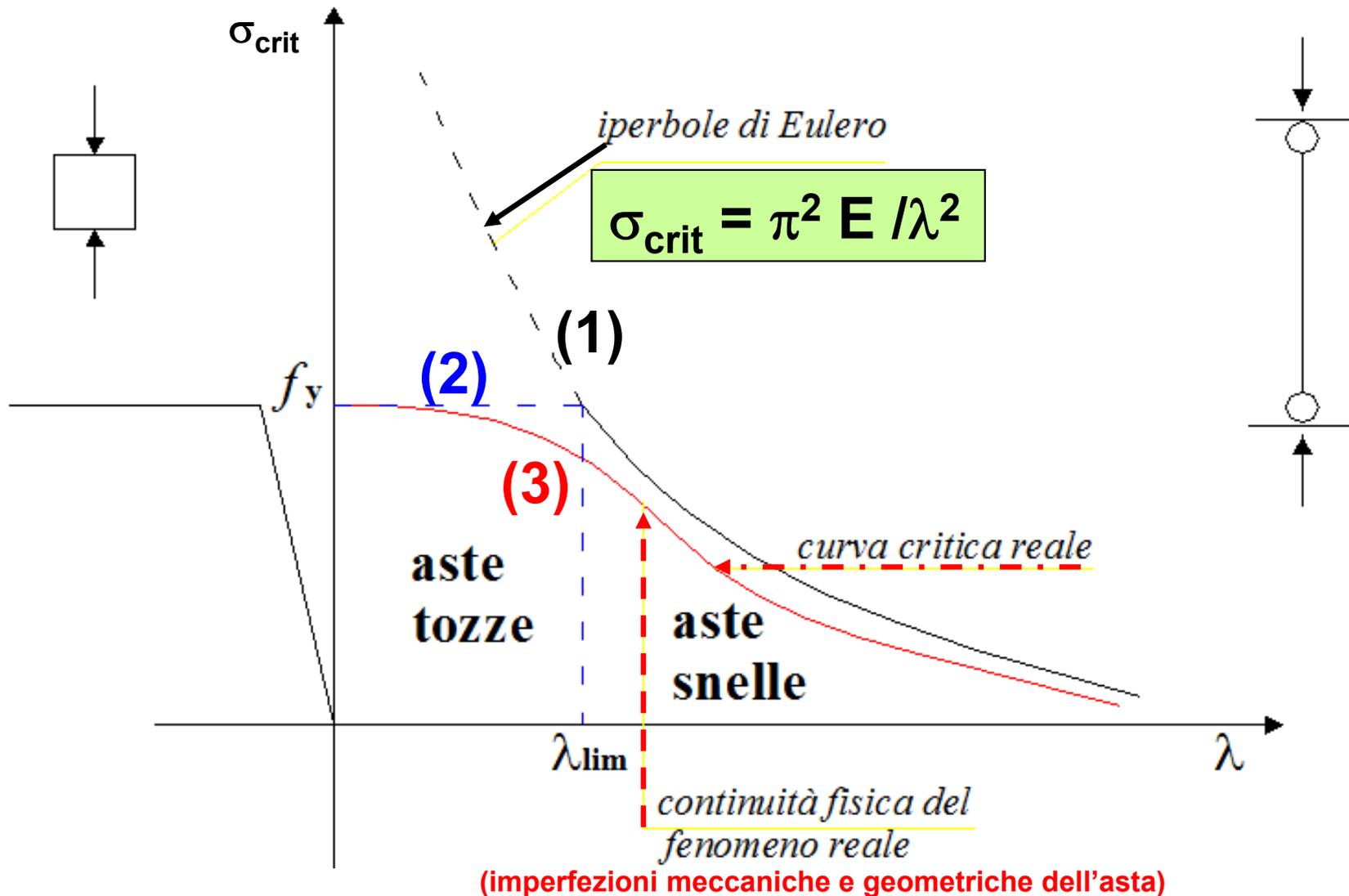
$$\sigma_{\text{crit}} = N_{\text{crit}} / A \rightarrow \sigma_{\text{crit}} = \pi^2 E I_{\text{min}} / (A L_0^2)$$

Da cui, ricordando la definizione di snellezza $\lambda = L_0 / \rho_{\text{min}}$:

$$\sigma_{\text{crit}} = \pi^2 E A \rho_{\text{min}}^2 / (A L_0^2) \quad \longrightarrow \quad \sigma_{\text{crit}} = \pi^2 E / \lambda^2$$

CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

Le variabili in gioco, ossia σ_{crit} e λ , sono legate da una relazione iperbolica denominata **iperbole di Eulero**.



(imperfezioni meccaniche e geometriche dell'asta)

CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

In realtà il materiale è **elasto-plastico** con resistenza finita f_y , per cui esiste una snellezza limite λ_{lim} in corrispondenza della quale si ha il passaggio dalle cosiddette **aste tozze**, che vanno in crisi al superamento della resistenza f_y , alle **aste snelle** nelle quali la crisi si verificherà per **instabilità**.

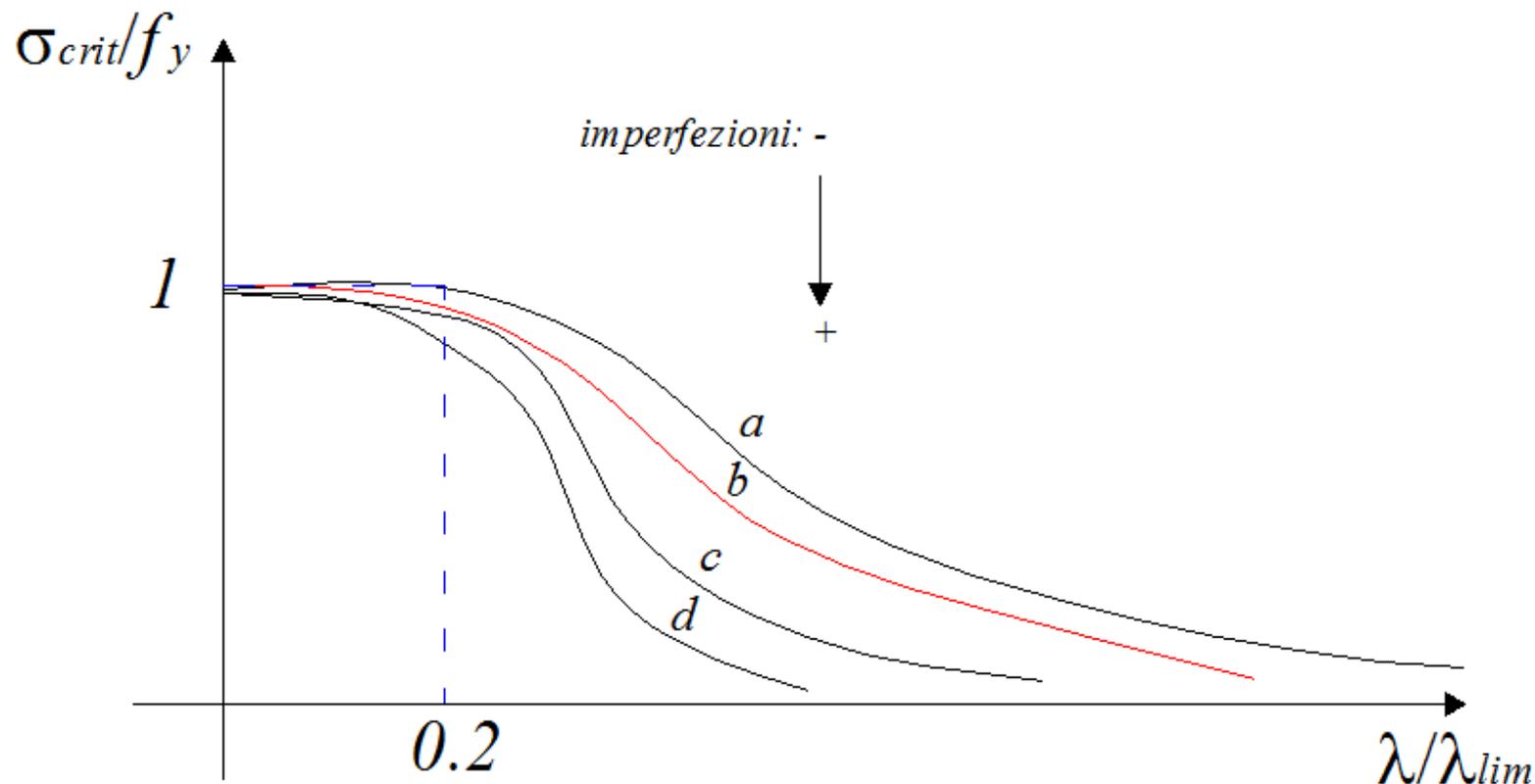
La **snellezza limite** si ottiene a partire dalla espressione della σ_{crit} sostituendovi il valore f_y :

$$\lambda_{lim} = \pi (E / f_y)^{0.5}$$

Per tenere conto delle imperfezioni (passaggio da asta ideale ad aste reali) vanno considerate le **curve critiche** adimensionalizzate.

CENNI AL PROBLEMA DELL'INSTABILITÀ

- Le **curve critiche** (reali) **a**, **b**, **c**, **d** sono state ricavate sulla base di studi teorici e sperimentali per i tipi di sezione più frequentemente usati per elementi compressi
- Le curve **a**, **b**, **c**, **d** sono fornite in forma analitica dalla normativa.



VERIFICA ALL'INSTABILITÀ

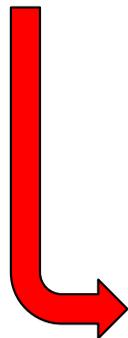
La verifica all'instabilità si effettua ai sensi delle NTC2018 (punto 4.2.4.1.3.1.)

Deve risultare che:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

- N_{Ed} è l'azione di compressione di calcolo

- $N_{b,Rd}$ è la resistenza all'instabilità dell'asta compressa



$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{per sezioni di classe 1, 2, 3})$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{per sezioni di classe 4})$$

VERIFICA ALL'INSTABILITÀ

Significato dei simboli utilizzati nelle espressioni di verifica:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

χ è un coefficiente riduttivo:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0$$

$$\Phi = 0.5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

α è il fattore di imperfezione (Tab.4.2.VIII NTC-2018)

$\bar{\lambda}$ è la snellezza adimensionale:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yk}}{N_{cr}}}$$

(classe 1,2,3)

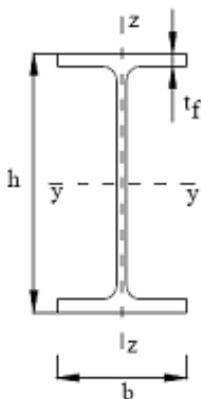
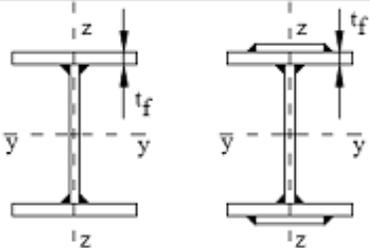
(classe 4)

N_{cr} è il valore del carico critico euleriano:

$$N_{cr} = \pi^2 E I_{min} / (\beta L)^2$$

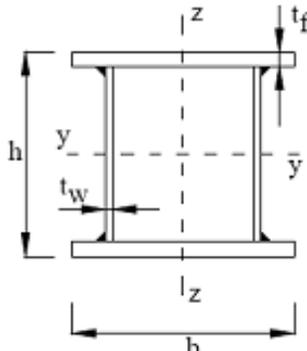
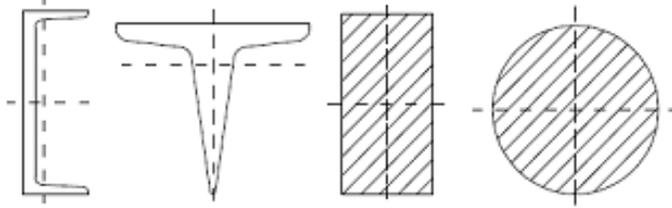
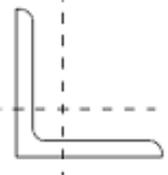
VERIFICA ALL'INSTABILITÀ

Tabella 4.2.VIII Curve d'instabilità per varie tipologie di sezioni e classi di acciaio, per elementi compressi (parte 1)

Sezione trasversale		Limiti	Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità	
				S235, S275, S355, S420	S460
Sezioni laminare		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ y-y z-z	a	a_0
				$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$ y-y z-z	b
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$ y-y z-z		b
				$t_f > 100 \text{ mm}$ y-y z-z	d
Sezioni ad I saldate		$t_f \leq 40 \text{ mm}$ y-y z-z	b		b
			$t_f > 40 \text{ mm}$ y-y z-z	c	c
Sezioni cave		Sezione formata "a caldo"		qualunque	a
			Sezione formata "a freddo"	qualunque	c

VERIFICA ALL'INSTABILITÀ

Tabella 4.2.VIII Curve d'instabilità per varie tipologie di sezioni e classi di acciaio, per elementi compressi (parte 2)

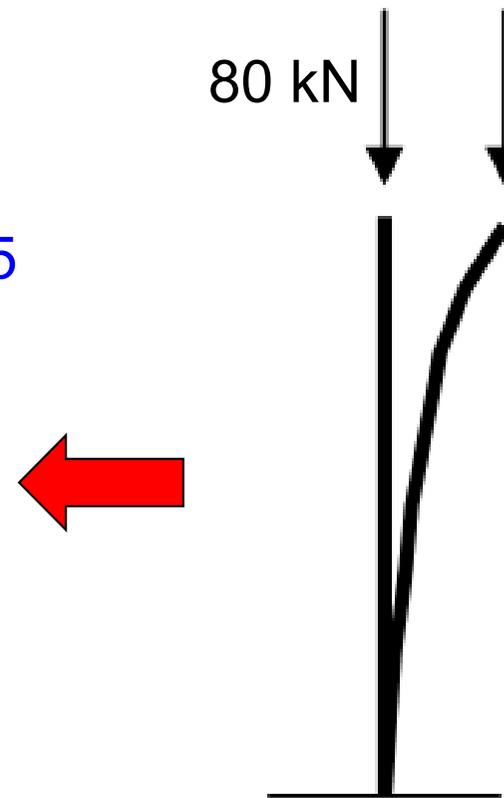
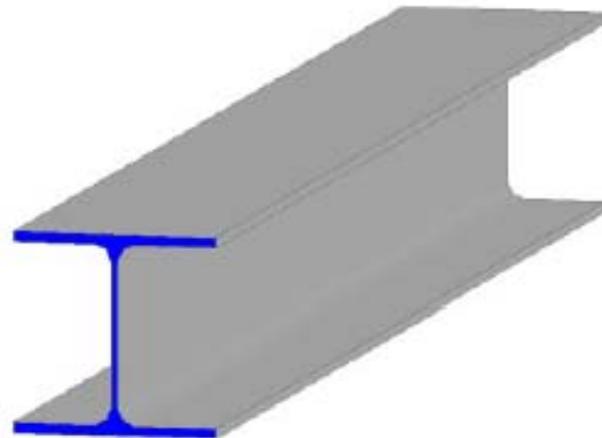
Sezione trasversale		Limiti	Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità	
				S235, S275, S355, S420	S460
Sezioni scatolari saldate		In generale	qualunque	b	b
		saldature "spesse": $a > 0.5t_f$ $b/t_f < 30$; $h/t_w < 30$	qualunque	c	c
Sezioni piene, ad U e T			qualunque	c	c
Sezioni ad L			qualunque	b	b
Curva di instabilità	a_0	a	b	c	d
Fattore di imperfezione α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

VERIFICA ALL'INSTABILITÀ

Applicazione numerica: verifica di una colonna compressa

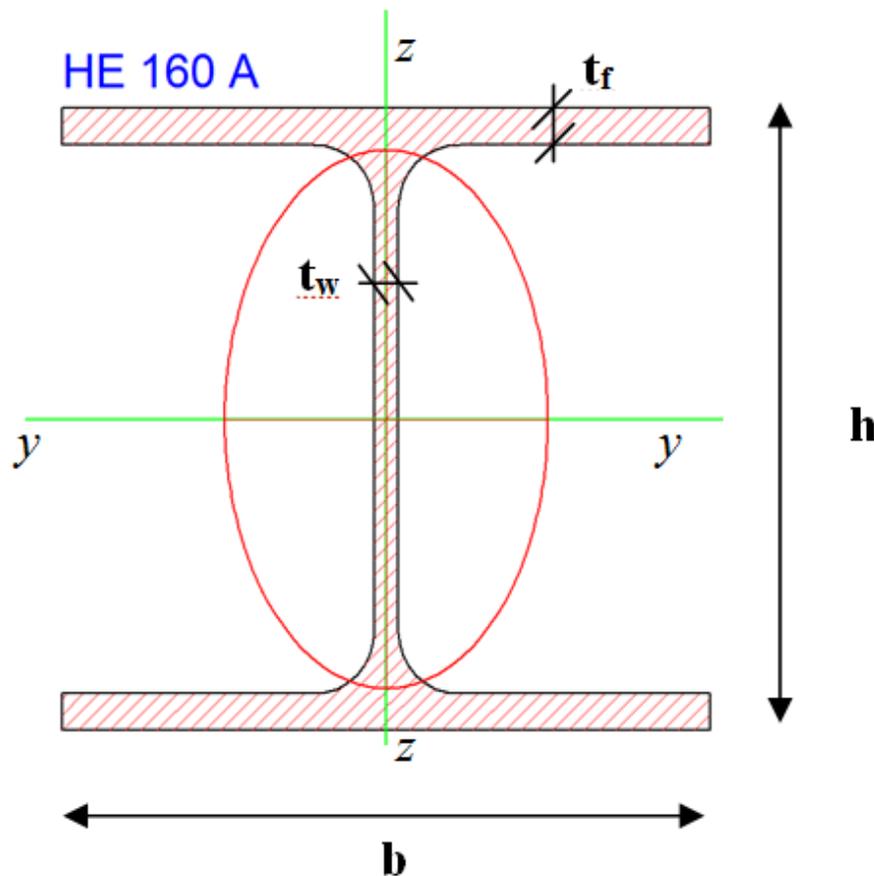
Si vuole effettuare la verifica di instabilità di una colonna di altezza $h=3.5\text{m}$, soggetta ad un carico assiale $N_{Ed}=80\text{kN}$, vincolata con un incastro perfetto alla base.

Assumiamo preliminarmente che la colonna sia realizzata con un profilo della serie HEA160, acciaio tipo S275



(Modalità di instabilizzazione)

VERIFICA ALL'INSTABILITÀ



Colonna HEA160 (S275):

- Altezza sezione (h) = 152mm
- Base sezione (b) = 160mm
- Spessore anima (t_w) = 6mm
- Spessore ali (t_f) = 9mm



$$h/b < 1.2$$

$$t_f < 100\text{mm}$$

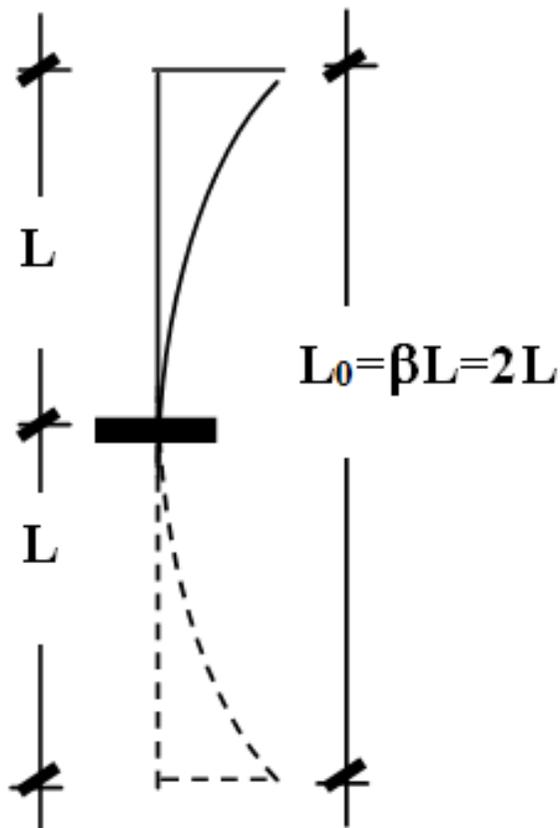
La curva di instabilità è la “c” (inflexione intorno all’asse z - z), a cui corrisponde $\alpha = 0.49$ (Tab.4.2.VIII NTC-2018)

VERIFICA ALL'INSTABILITÀ

- Valutazione della snellezza λ

$$\lambda = (\beta L) / \rho_{\min}$$

in cui $\beta=2$ (in funzione dei vincoli presenti), L è la lunghezza dell'asta, e $\rho_{\min} = 3.98\text{cm}$ è il raggio di inerzia relativo all'asse debole (cioè di inerzia minore).



L'inerzia minima è quella individuata da I_z
(l'inflessione si verificherà nel piano y-y)
e si adotterà: $\rho_{\min} = \rho_z = 3.98 \text{ cm}$

$$\lambda = \beta L / \rho_{\min} = 2 * 350 / 3.98 = 176$$

VERIFICA ALL'INSTABILITÀ

- Valutazione del carico critico N_{cr}

$$N_{cr} = \pi^2 E I_{\min} / (\beta L)^2$$

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot 210000 \cdot 615.6 \cdot 10^4 / (2 \cdot 3500)^2 = 260,388 \text{ kN}$$

- Valutazione della snellezza adimensionale $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3877 \cdot 275}{260388}} = 2.02$$

- Verifica all'instabilità

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] = 0.5[1 + 0.49(2.02 - 0.2) + 2.02^2] = 2.98$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.19$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_{yk}}{\gamma_{M1}} = \frac{0.23 \cdot 3877 \cdot 275}{1.05} = 192926 \text{ N} = 192.9 \text{ kN} > N_{Ed} = 80 \text{ kN}$$

UNIONI TRA ELEMENTI IN ACCIAIO



UNIONI TRA ELEMENTI

- Una delle peculiarità delle costruzioni metalliche risiede nella tecnologia di assemblaggio delle singole membrature.
- Il corretto dimensionamento delle unioni tra gli elementi è un punto essenziale ai fini della progettazione e verifica delle strutture.

L'assemblaggio degli elementi metallici può essere effettuato mediante diversi tipi di collegamento:

- a) unioni saldate**
- b) unioni chiodate (ormai in disuso)**
- c) unioni bullonate**

UNIONI TRA ELEMENTI



a)



b)

- a) unione saldata
- b) unione chiodata
- c) unione bullonata



c)

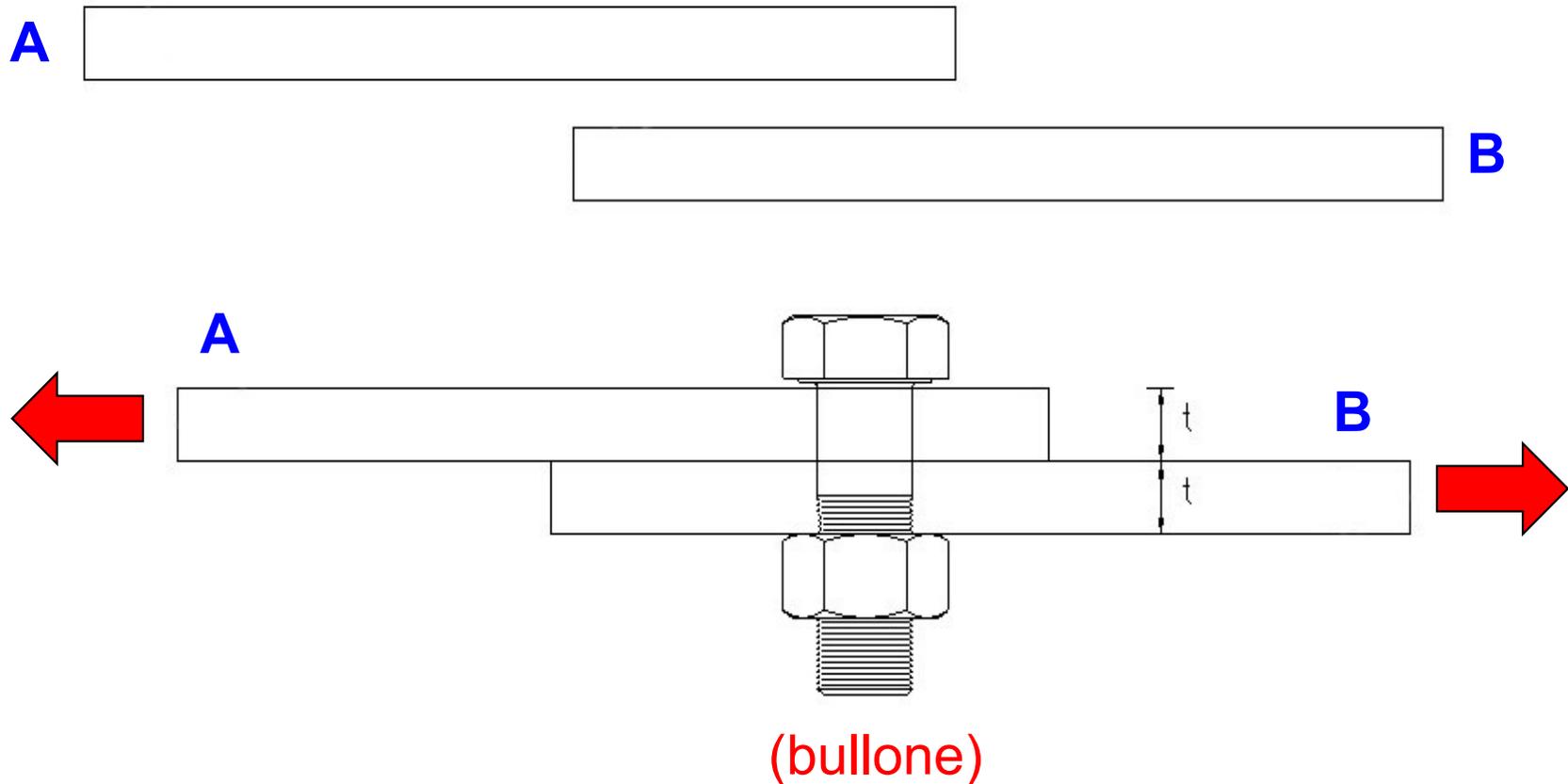
UNIONI TRA ELEMENTI

- Con queste tecniche vengono realizzati sia i collegamenti tra diverse membrature che, in casi particolari (es. esigenza di avere elementi con dimensioni molto elevate, non standard), le singole membrature stesse.
- In alcuni casi l'assemblaggio avviene adottando diversi tipi di unione, generalmente concentrando le operazioni di assemblaggio mediante saldatura in officina e riservando quelle di bullonatura al cantiere.
- Rispetto alle unioni bullonate le unioni saldate sono più rigide e non rimovibili.

- Le unioni bullonate presentano, rispetto a quelle saldate, una maggiore indipendenza dalle condizioni atmosferiche e minore esigenza di manodopera specializzata.
- Per le loro caratteristiche hanno un largo impiego anche nella realizzazione di strutture provvisorie, in modo da consentire il successivo smontaggio ed eventuale trasformazione.
- L'obiettivo che l'unione bullonata deve realizzare è il collegamento strutturale tra due o più elementi, pertanto deve essere progettata in modo da risultare staticamente efficace, cioè essere in grado di trasferire le sollecitazioni agenti da un elemento all'altro.

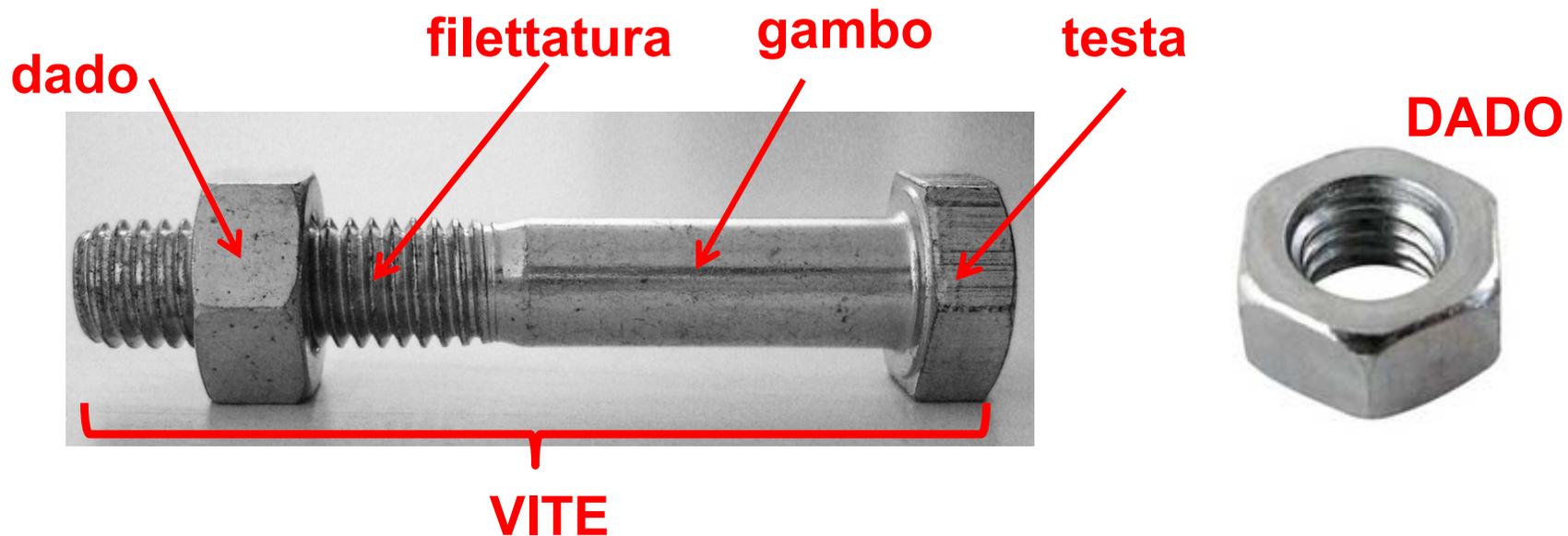
UNIONI BULLONATE: TECNOLOGIA

Per collegare due elementi (A e B) occorre sovrapporli, forarli e inserire un elemento (**bullone**) in modo da consentire alle singole unità di diventare un unico corpo strutturale.



UNIONI BULLONATE: TECNOLOGIA

Il bullone è costituito da una **vite** (a testa esagonale) e da un **dado** (esagonale) da inserire nel gambo filettato della vite.



Nei giunti bullonati assume grande importanza il gioco gambo – foro, da cui discendono prescrizioni precise di norma sulla foratura e la disposizione dei vuoti rispetto agli spessori impiegati.

UNIONI BULLONATE: TECNOLOGIA

I fori devono avere diametro uguale a quello del bullone maggiorato al massimo di:

- 1 mm per bulloni sino a 20 mm di diametro
- 1.5 mm per bulloni di diametro maggiore di 20 mm

In presenza di vibrazioni è indispensabile l'uso di controdadi, di rosette di tipo elastico o di altri sistemi speciali.

Il bullone è caratterizzato meccanicamente da:

- **diametro d**
- **classe di resistenza**

UNIONI BULLONATE: TECNOLOGIA

La normativa italiana considera 5 classi di bulloni, ossia:

- bulloni normali (classi **4.6**, **5.6**, **6.8**)
- bulloni ad alta resistenza (classi **8.8**, **10.9**)

Le caratteristiche meccaniche sono riportate nella Tabella 11.3.XIII.b delle NTC 2018:

Classe	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{tb} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

- f_{yb} è la tensione di snervamento
- f_{tb} è la tensione di rottura

UNIONI BULLONATE: TECNOLOGIA

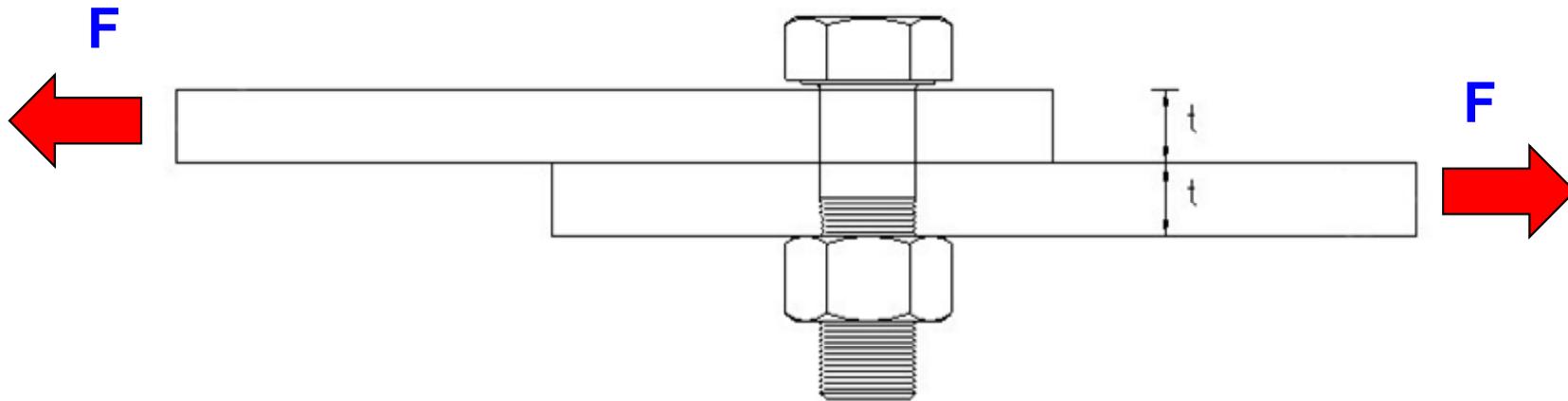
La resistenza complessiva dipende anche dal diametro del bullone: i diametri commerciali sono compresi tra 12 e 30 mm.

d [mm]	A_{nom} , area nominale [mm ²]	A_{res} , area resistente [mm ²]
12	113	84
14	154	115
16	201	157
18	254	192
20	314	245
22	380	303
24	452	353
27	572	459
30	707	561

La scelta di una classe di resistenza, abbinata al diametro opportuno, consente di ottenere la resistenza necessaria per sopportare una determinata sollecitazione.

UNIONI BULLONATE: COMPORTAMENTO MECCANICO

Consideriamo due lamiere soggette ad un carico di trazione F :



Per effetto della forza applicata, tende a verificarsi uno spostamento relativo tra le due lamiere.

Per comprendere il comportamento dell'unione occorre considerare il modo in cui il bullone realizza il collegamento.

UNIONI BULLONATE: COMPORTAMENTO MECCANICO

Un primo aspetto da considerare è legato alla forza di **precarico** o **pretrazione** con la quale si stringe il bullone (**serraggio del bullone**).

Il serraggio è effettuato con chiave dinamometrica che consente di controllare l'entità dello sforzo prodotto nel bullone ($F_{p,cd}$) in modo compatibile con la resistenza del bullone stesso.

$$F_{p,cd} = 0,7 \cdot \frac{f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M7}}$$

- f_{tb} è la resistenza a rottura del bullone
- A_{res} l'area resistente del bullone che tiene conto della presenza della filettatura
- $\gamma_{M7} = 1.10$.

UNIONI BULLONATE: COMPORTAMENTO MECCANICO

Avvitando il dado le due lamiere tendono ad avvicinarsi, quindi il bullone tende a schiacciare queste lamiere che sono compresse dalla forza $F_{p,cd}$.



Per reazione il bullone è teso dalla forza $F_{p,cd}$ poiché vorrebbe accorciarsi ma non lo può fare: le lamiere sono compresse ed il bullone, nell'accorciamento impedito, rimane teso.

Si noti anche che, per effetto della forza di contatto tra le lamiere si determina una resistenza per attrito che si oppone allo spostamento relativo tra le lamiere.

UNIONI BULLONATE: COMPORTAMENTO MECCANICO

Per realizzare lo sforzo $F_{p,c,d}$ è necessario applicare una coppia di serraggio M_S , pari a:

$$M_S = k * F_{p,c,d} * d = k * 0.7 * f_{tb} * A_{res} * d$$

I valori di M_S e $F_{p,c}$ sono forniti nelle NTC 2018

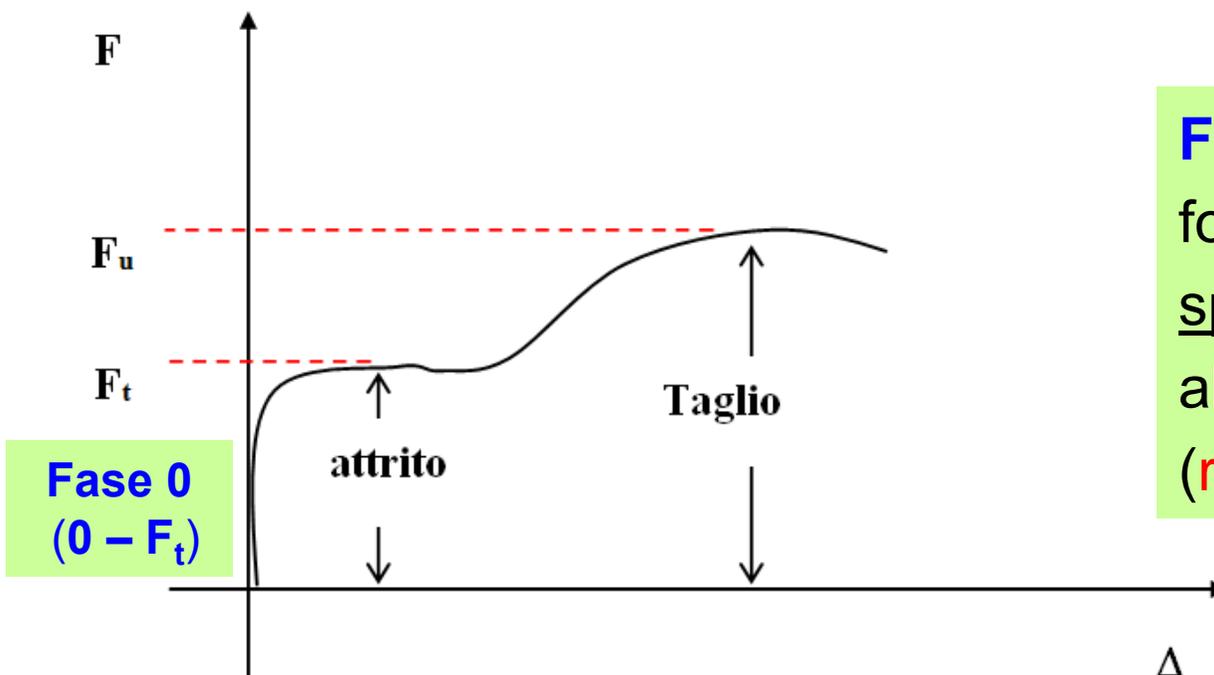
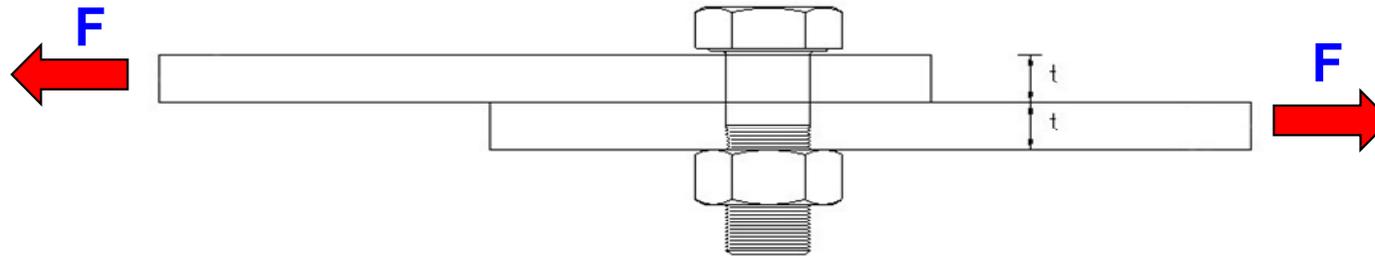
Tabella 4.2.XVII Coppie di serraggio per bulloni 10.9

Viti 10.9 – Momento di serraggio M [N m]						
Vite	k=0.10	k=0.12	k=0.14	k=0.16	$F_{p,c}$ [kN]	A_{res} [mm ²]
M12	70.8	85.0	99.1	113	59.0	84.3
M14	113	135	158	180	80.5	115
M16	176	211	246	281	110	157
M18	242	290	339	387	134	192
M20	343	412	480	549	172	245
M22	467	560	653	747	212	303
M24	593	712	830	949	247	353
M27	868	1041	1215	1388	321	459
M30	1178	1414	1649	1885	393	561
M36	2059	2471	2882	3294	572	817

- Ad es. per bulloni ad alta resistenza (classe 10.9) i valori sono riportati nella tabella 4.2.XVII.
- Il valore del fattore k è indicato sulle targhette delle confezioni (dei bulloni, oppure delle viti)

UNIONI BULLONATE: COMPORTAMENTO MECCANICO

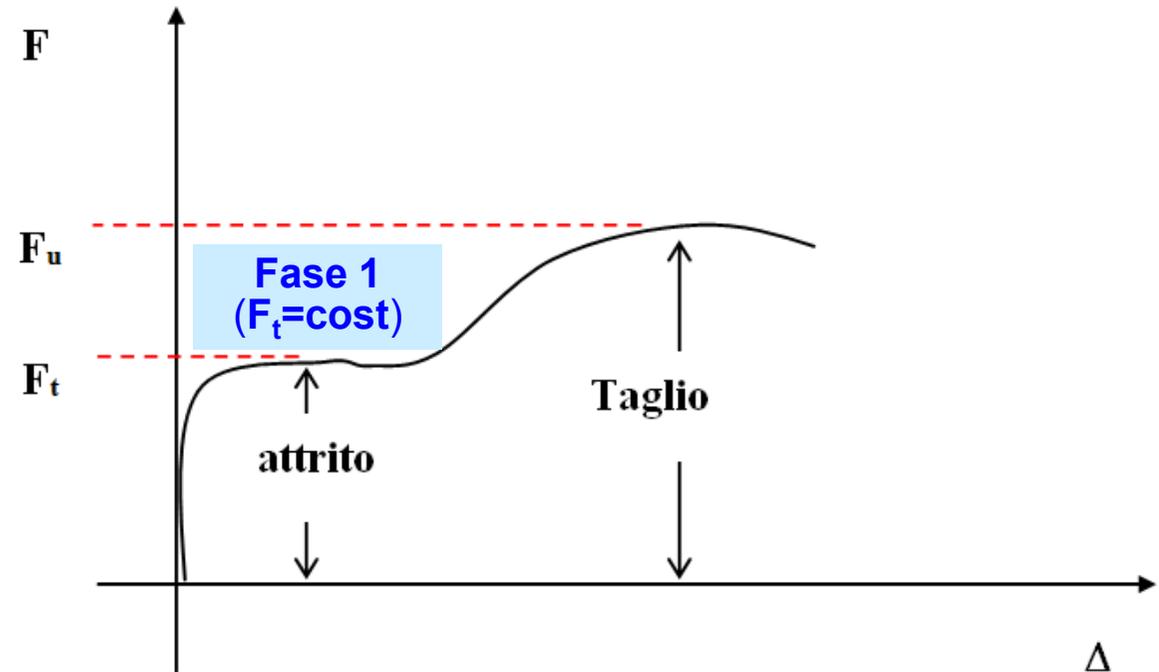
Il **comportamento di una unione bullonata** è illustrato nella figura seguente in cui si indica con Δ lo spostamento relativo tra le lamiere.



Fase 0 - Sotto l'azione della forza F non si registrano spostamenti apprezzabili all'aumentare della forza (**resistenza per attrito**).

UNIONI BULLONATE: COMPORTAMENTO MECCANICO

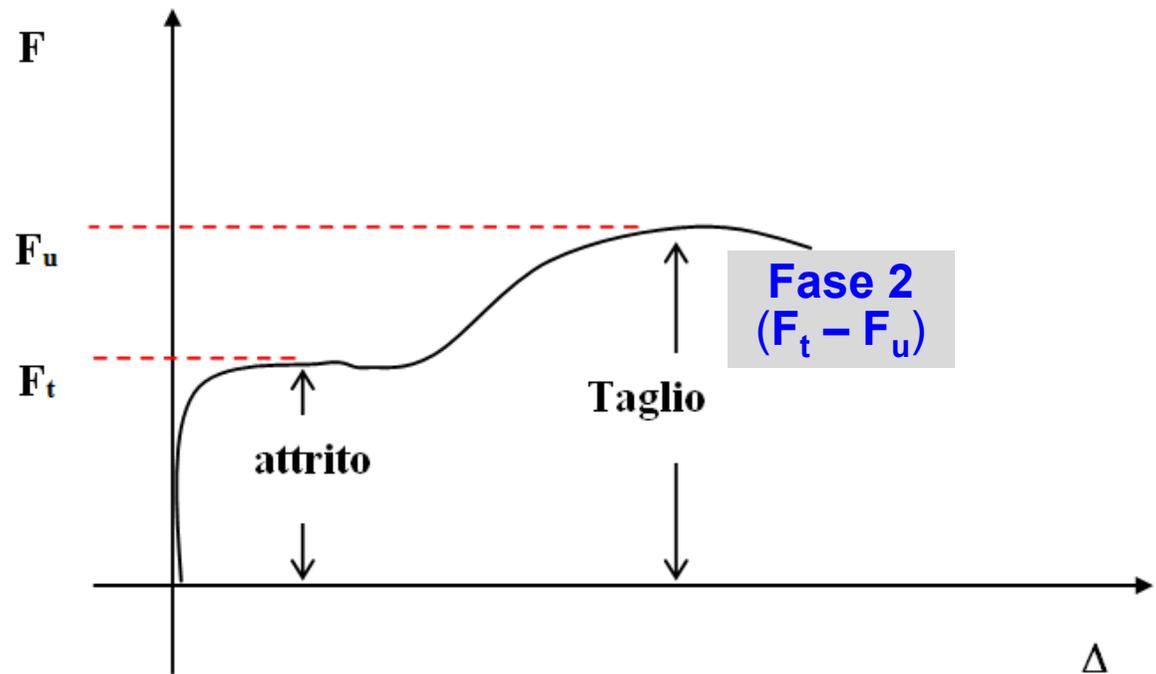
Fase 1 - In corrispondenza di un certo valore F_t della forza, il comportamento dell'unione cambia bruscamente: lo spostamento aumenta in maniera consistente, senza che la forza esterna aumenti.



Con la forza F_t è stata superata la resistenza per **attrito** tra le lamiere, originata dalla forza di serraggio per il collegamento tra bullone e lamiera. L'incremento di spostamento a forza costante si interrompe quando la superficie del bullone viene a contatto con la parete interna del foro nel quale è inserito (come detto, per esigenze di montaggio il foro ha sempre un diametro leggermente maggiore, ossia 1.0-1.5 mm, di quello del bullone).

UNIONI BULLONATE: COMPORTAMENTO MECCANICO

Fase 2 – Quando il bullone viene a contatto con la parete del foro nelle lamiere inizia ad opporsi allo spostamento relativo, non più per effetto dell'attrito ma per effetto del taglio, lavorando sostanzialmente come un perno.



Per avere ulteriori spostamenti la forza applicata deve aumentare, fino ad arrivare ad un valore F_u (forza ultima) oltre il quale si ha la crisi definitiva dell'unione bullonata che può essere causata da diversi meccanismi di rottura.

- **Nelle fasi 0 e 1 l'unione bullonata lavora per attrito**
- **Nella fase 2 l'unione bullonata lavora a taglio**

Resistenza per attrito

$$F_t = F_{p,cd} \mu$$

Il coefficiente di attrito μ è tanto più grande quanto più le superfici sono trattate (**scabre**)

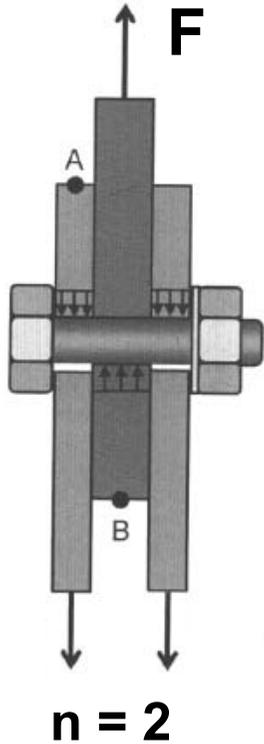
Generalmente il valore di μ è assunto pari a:

- **0.45** quando le giunzioni siano sabbiate al metallo bianco e protette sino al serraggio dei bulloni
- **0.30** in tutti gli altri casi.

Quanto più il bullone è resistente, tanto più grande è la forza di pretrazione e quindi maggiore sarà la F_t .

Nel caso di giunzioni che lavorino (solo) ad attrito le norme tecniche italiane prescrivono l'utilizzo di bulloni ad alta resistenza.

UNIONI BULLONATE AD ATTRITO: VERIFICHE



$$F \leq F_{S,Rd} = n \mu F_{p,cd} / \gamma_{M3}$$

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot \frac{f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M7}}$$

- F è la forza agente
- $F_{S,Rd}$ è la forza resistente per attrito
- n è il numero di superfici a contatto
- $\mu = 0.30-0.45$
- $\gamma_{M3} = 1.25$ (SLU) ovvero 1.10 (SLE)

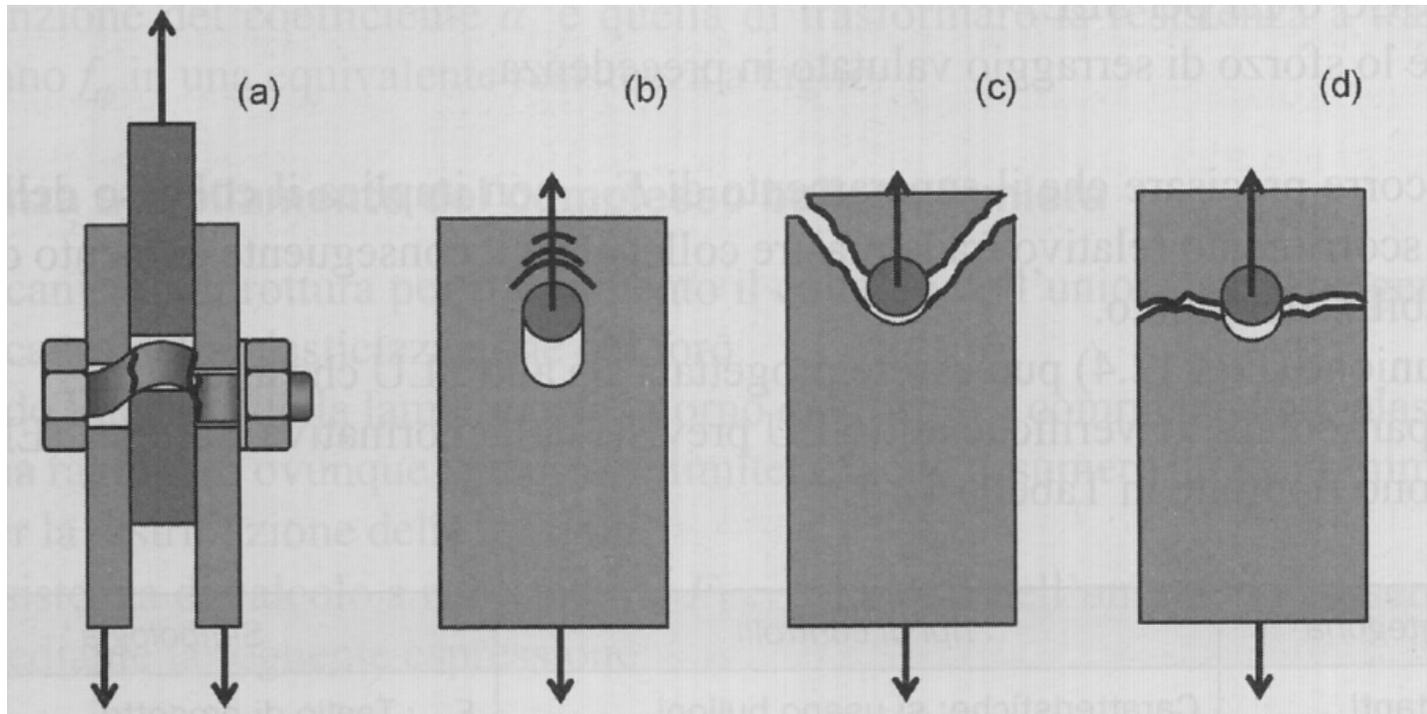
In caso di serraggio controllato (**utilizzando la chiave dinamometrica**) si può assumere $\gamma_{M7} = 1.0$ anziché 1.1

Utilizzando bulloni ad alta resistenza, cioè delle classi 8.8 e 10.9, attesi gli elevati valori delle tensioni di snervamento, si possono applicare elevati sforzi di pretrazione $F_{p,cd}$ e quindi realizzare forti condizioni di precompressione delle lamiere a contatto.

UNIONI BULLONATE A TAGLIO

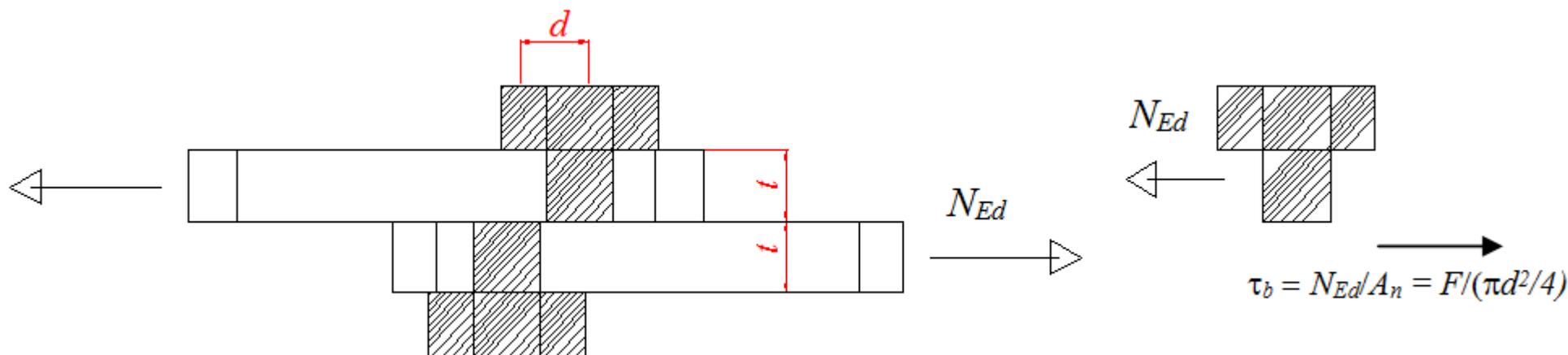
Superata la resistenza per attrito F_t , in una unione bullonata possono verificarsi diversi meccanismi di collasso:

- rottura a taglio del bullone (a)
- rottura per rifollamento della lamiera (b)
- rottura a taglio della lamiera (c)
- rottura a trazione della lamiera (d)



UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

a) Rottura a taglio del bullone



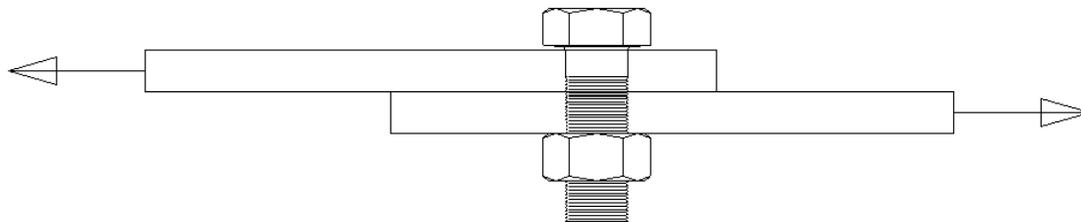
La resistenza di calcolo a taglio dei bulloni $F_{v,Rd}$, per ogni piano di taglio che interessa il gambo del bullone, può essere assunta pari:

$$F_{v,Rd} = 0,6 f_{tb} A_{res} / \gamma_{M2}, \text{ bulloni classe 4.6, 5.6 e 8.8;}$$

$$F_{v,Rd} = 0,5 f_{tb} A_{res} / \gamma_{M2}, \text{ bulloni classe 6.8 e 10.9;}$$

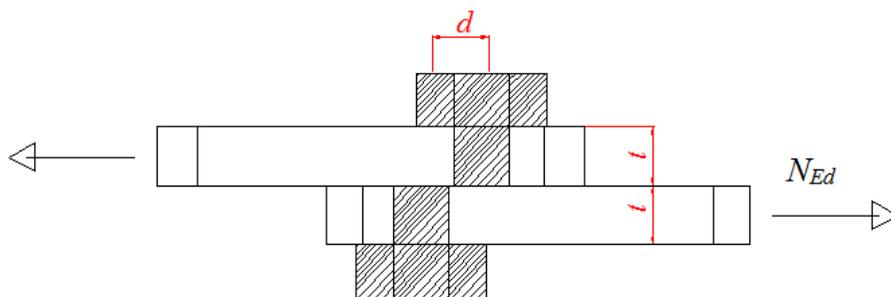
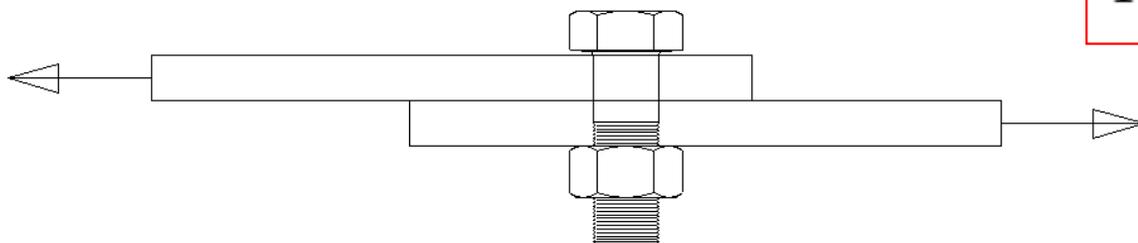
UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

- Se per il piano di taglio passa la filettatura, A_{res} è l'area resistente netta che tiene conto della filettatura



- Se il piano di taglio non passa per la filettatura, si considera l'area lorda A (per tutti i tipi di bulloni):

$$F_{v,Rd} = 0,6 f_{tb} A / \gamma_{M2}$$



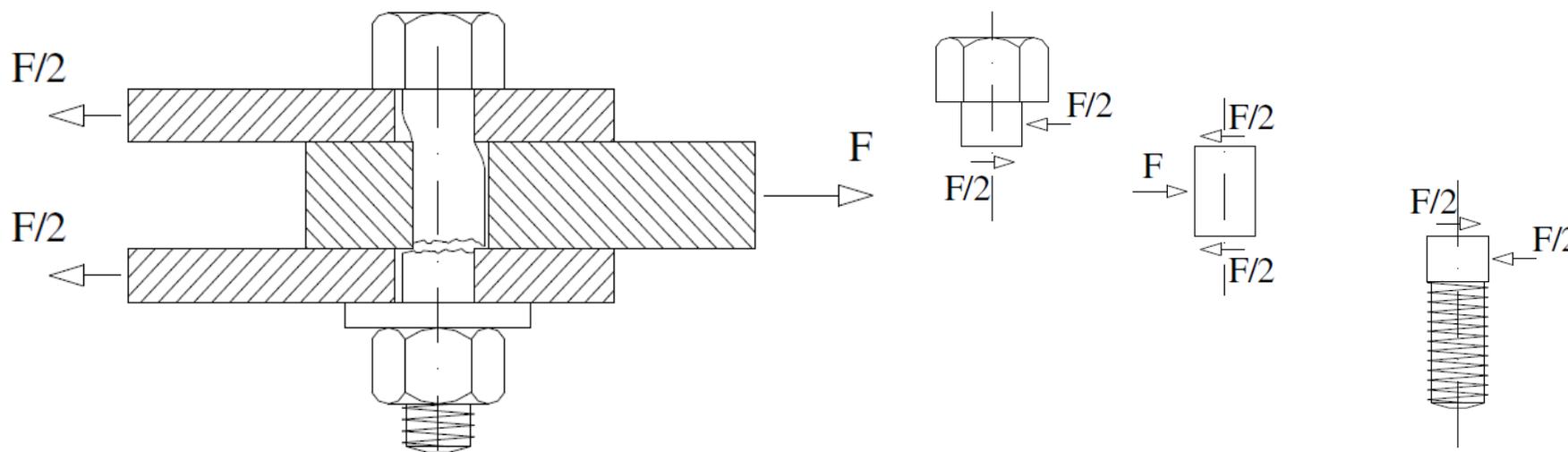
La verifica è soddisfatta se

$$F_{v,Rd} \geq N_{Ed}$$

UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

Se si considera il sistema indicato in figura si hanno due superfici di rottura. Perché la rottura avvenga bisogna superare la resistenza a taglio dei bulloni in due diverse sezioni quindi la resistenza dell'unione aumenta:

$$\tau_b = N_{Ed} / (2A_{res}) = F / [2(\pi d^2/4)]$$



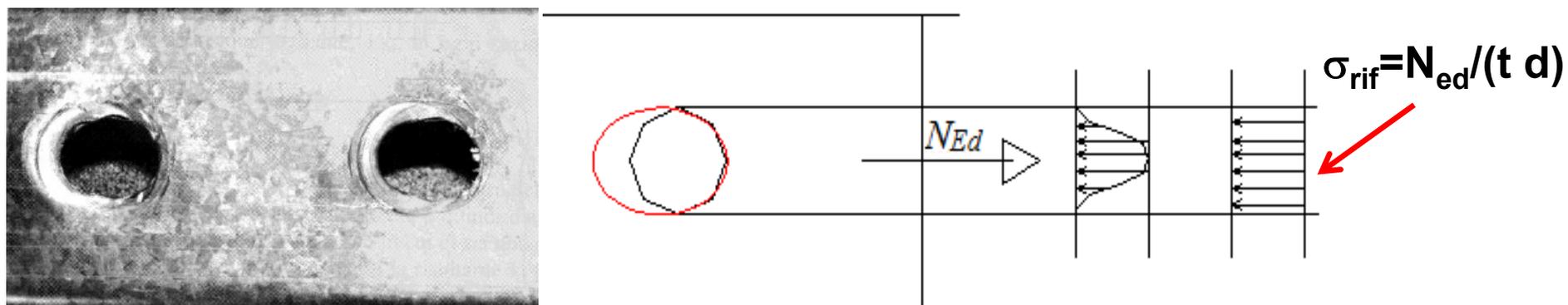
Inoltre, in presenza di **n** bulloni, la superficie totale di rottura è **n A_{res}**:

$$\tau_b = N_{Ed} / (n A_n) = F / [n(\pi d^2/4)]$$

UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

b) Rottura per rifollamento della lamiera

Nel meccanismo di rottura per rifollamento, il collasso dell'unione avviene a causa della plasticizzazione del foro (ovalizzazione) di una delle lamiere collegate.



Quando l'acciaio nell'intorno del foro si è completamente plasticizzato, si assume che la distribuzione delle tensioni sia costante e pari al valore caratteristico a rottura f_{tk}

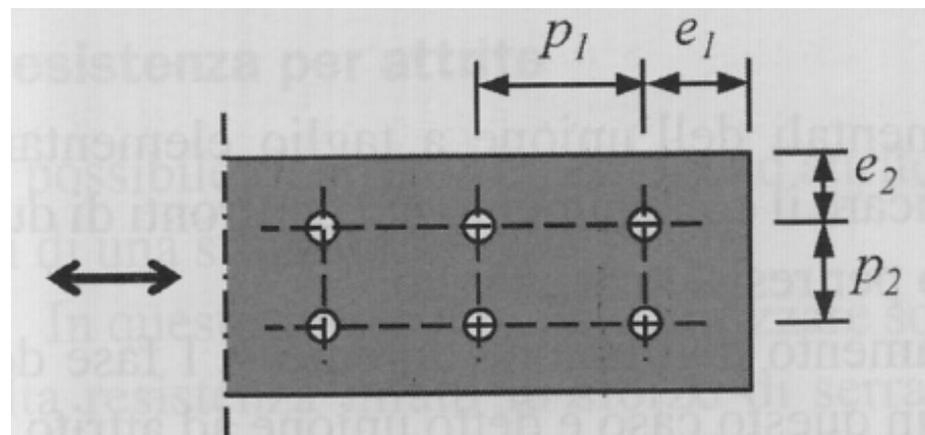
UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

b) Rottura per rifollamento della lamiera

La resistenza di calcolo a rifollamento della lamiera può essere calcolata mediante la relazione:

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

- **d** è il diametro del gambo del bullone;
- **t** è lo spessore della lamiera collegata;
- **α** e **k** sono coefficienti che dipendono dalle distanze **e** dai bordi e degli interassi **p** dei fori



UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

b) Rottura per rifollamento della lamiera

In particolare:

$$\alpha = \min \left\{ e_1 / (3d_0); f_{tb} / f_{tk}; 1 \right\} \quad \text{bulloni di bordo nella direzione del carico}$$

$$\alpha = \min \left\{ p_1 / (3d_0) - 0,25; f_{tb} / f_{tk}; 1 \right\} \quad \text{bulloni interni nella direzione del carico}$$

$$k = \min \left\{ 2,8 \cdot e_2 / d_0 - 1,7; 2,5 \right\} \quad \text{bulloni di bordo ortogonali alla direzione del carico}$$

$$k = \min \left\{ 1,4 \cdot p_2 / d_0 - 1,7; 2,5 \right\} \quad \text{bulloni interni ortogonali alla direzione del carico}$$

Il coefficiente α riduce la resistenza a rifollamento se la distanza e_1 e il passo p_1 sono inferiori a certi valori limite.

Il coefficiente k è generalmente amplificativo (cioè maggiore di uno), anche se non può eccedere il valore 2,5.

La verifica è soddisfatta se $F_{b,Rd} \geq N_{Ed}$

UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

c) Rottura a taglio della lamiera

Le NTC-2018 forniscono delle prescrizione sui margini e gli interassi secondo i quali disporre i bulloni per garantire che la lamiera non abbia problemi di rottura a taglio.

Tab. 4.2.XVIII - Posizione dei fori per unioni bullonate e chiodate.

Distanze e interassi (Fig. 4.2.5)	Minimo	Massimo		
		Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (UNI EN10025-5)
e_1	$1,2 d_0$	$4t+40$ mm	-	$\max(8t;12$ mm)
e_2	$1,2 d_0$	$4t+40$ mm	-	$\max(8t;125$ mm)
p_1	$2,2 d_0$	$\min(14t;200$ mm)	$\min(14t;200$ mm)	$\min(14t;175$ mm)
$P_{1,0}$	-	$\min(14t;200$ mm)	-	-
$P_{1,i}$	-	$\min(28t;400$ mm)	-	-
p_2	$2,4 d_0$	$\min(14t;200$ mm)	$\min(14t;200$ mm)	$\min(14t;175$ mm)

UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

c) Rottura a taglio della lamiera

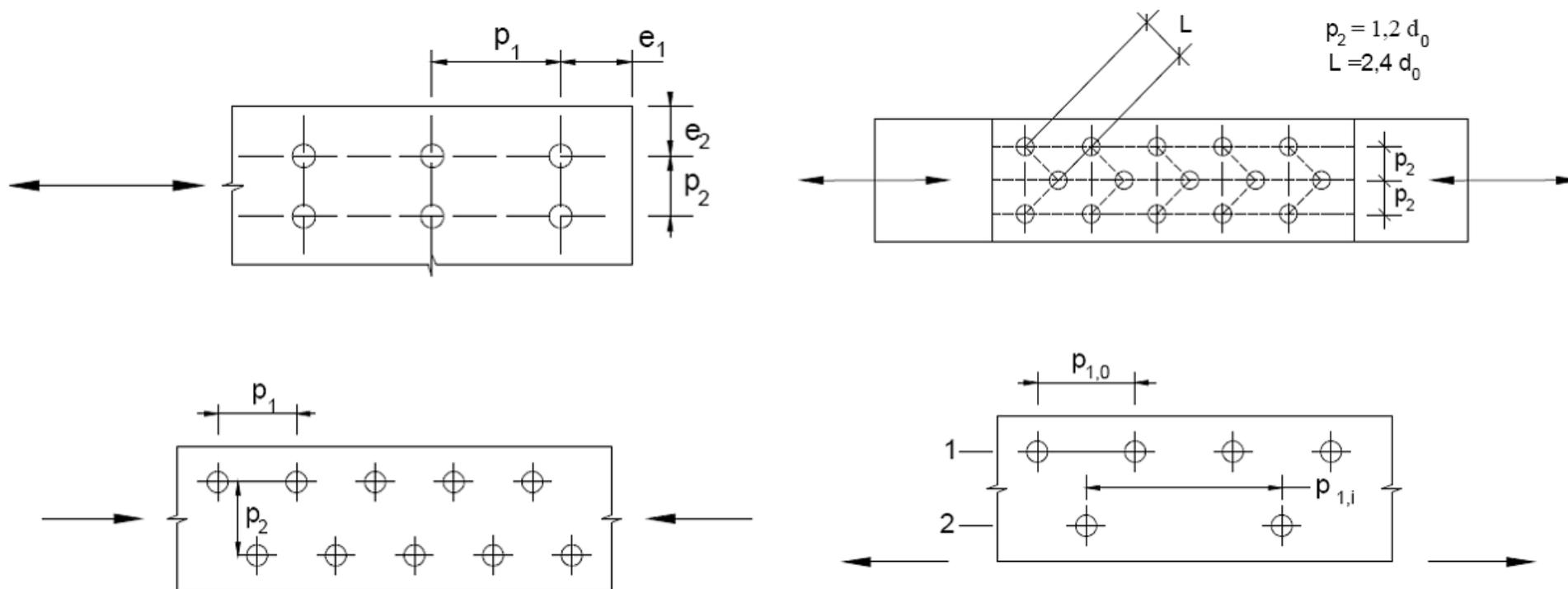
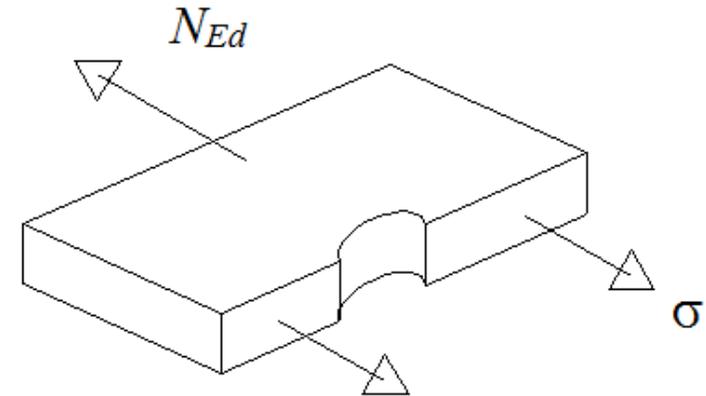
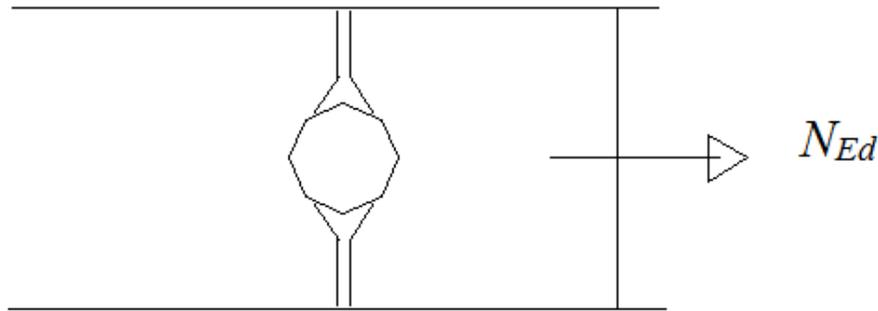


Fig. 4.2.5 NTC 2018 (Disposizione dei fori per le realizzazione di unioni bullonate)

UNIONI BULLONATE A TAGLIO: VERIFICHE

d) Rottura a trazione della lamiera



deve risultare

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

dove la resistenza di calcolo a trazione $N_{t,Rd}$ di membrature con sezioni indebolite da fori per collegamenti bullonati deve essere assunta pari al minore tra $N_{pl,Rd}$ e $N_{u,Rd}$

UNIONI BULLONATE: VERIFICHE

d) Rottura a trazione della lamiera

$N_{pl,Rd}$ è la resistenza plastica della sezione A:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

$N_{u,Rd}$ è la resistenza a rottura della sezione netta (A_{net}) in corrispondenza dei fori per i collegamenti:

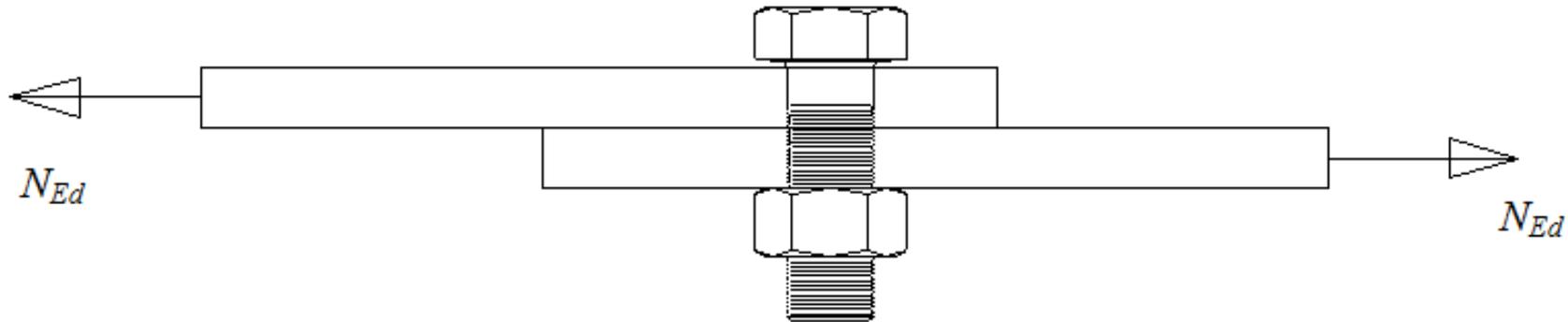
$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}}$$

Resistenza delle Sezioni di Classe 1-2-3-4	$\gamma_{M0} = 1,05$
Resistenza all'instabilità delle membrature	$\gamma_{M1} = 1,05$
Resistenza all'instabilità delle membrature di ponti stradali e ferroviari	$\gamma_{M1} = 1,10$
Resistenza, nei riguardi della frattura, delle sezioni tese (indebolite dai fori)	$\gamma_{M2} = 1,25$

DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI UNIONI BULLONATE

Esempio

È necessario unire due piatti di lamiera che hanno spessore $t=10\text{mm}$. Si richiede di dimensionare la larghezza dei piatti e il diametro del bullone, sapendo che deve essere di classe 8.8 (scelta progettuale per avere una unione funzionante ad attrito).



$N_{ed} = 40 \text{ kN}$ (valore della sollecitazione allo SLU)

DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI UNIONI BULLONATE

Conviene prima dimensionare il bullone a taglio, poiché il diametro del bullone condiziona la distanza del foro dal bordo della lamiera e quindi le dimensioni della stessa.

Il taglio resistente di un bullone con il piano di taglio che attraversa la filettatura è:

$$F_{v,Rd} = 0,6 f_{tb} A_{res} / \gamma_{M2}, \text{ bulloni classe 4.6, 5.6 e 8.8;}$$

deve essere $F_{v,Rd} \geq N_{Ed}$ quindi:

$$A_{res} \geq N_{ed} \gamma_{M2} / (0.6 f_{tb}) = 40000 * 1.25 / (0.6 * 800) = 105 \text{ mm}^2$$

Bisogna quindi adottare un bullone di diametro 14 mm, che sviluppa un'area resistente $A_{res} = 115 \text{ mm}^2$

DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI UNIONI BULLONATE

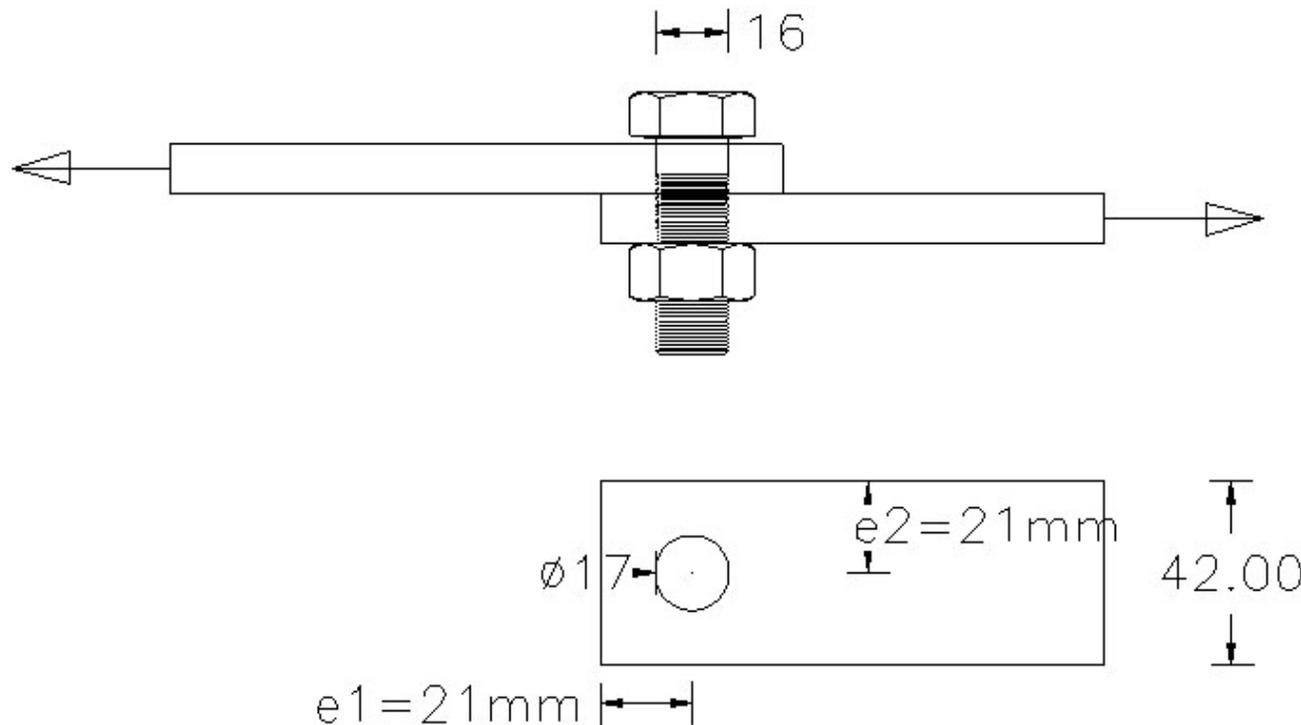
Il diametro del foro sarà $d_0=17$ mm e quindi:

- $e_1 \geq 1.2 d_0 = 20.4 \rightarrow 21$ mm

- $e_2 \geq 1.2 d_0 = 20.4 \rightarrow 21$ mm

Tab.4.2.XVIII – NTC2018

La larghezza **b** del singolo piatto sarà $b=2 \cdot e_2=42$ mm



VERIFICA DELLA RESISTENZA PER ATTRITO

Si opta per il serraggio controllato e quindi $\gamma_{M7} = 1.0$

La forza di precarico sarà:

$$F_{p,Cd} = 0.7 f_{tb} A_{res} = 0.7 \cdot 800 \cdot 157 = 87920 \text{ N}$$

$n=1$ (superfici di contatto)

$$\mu = 0.30$$

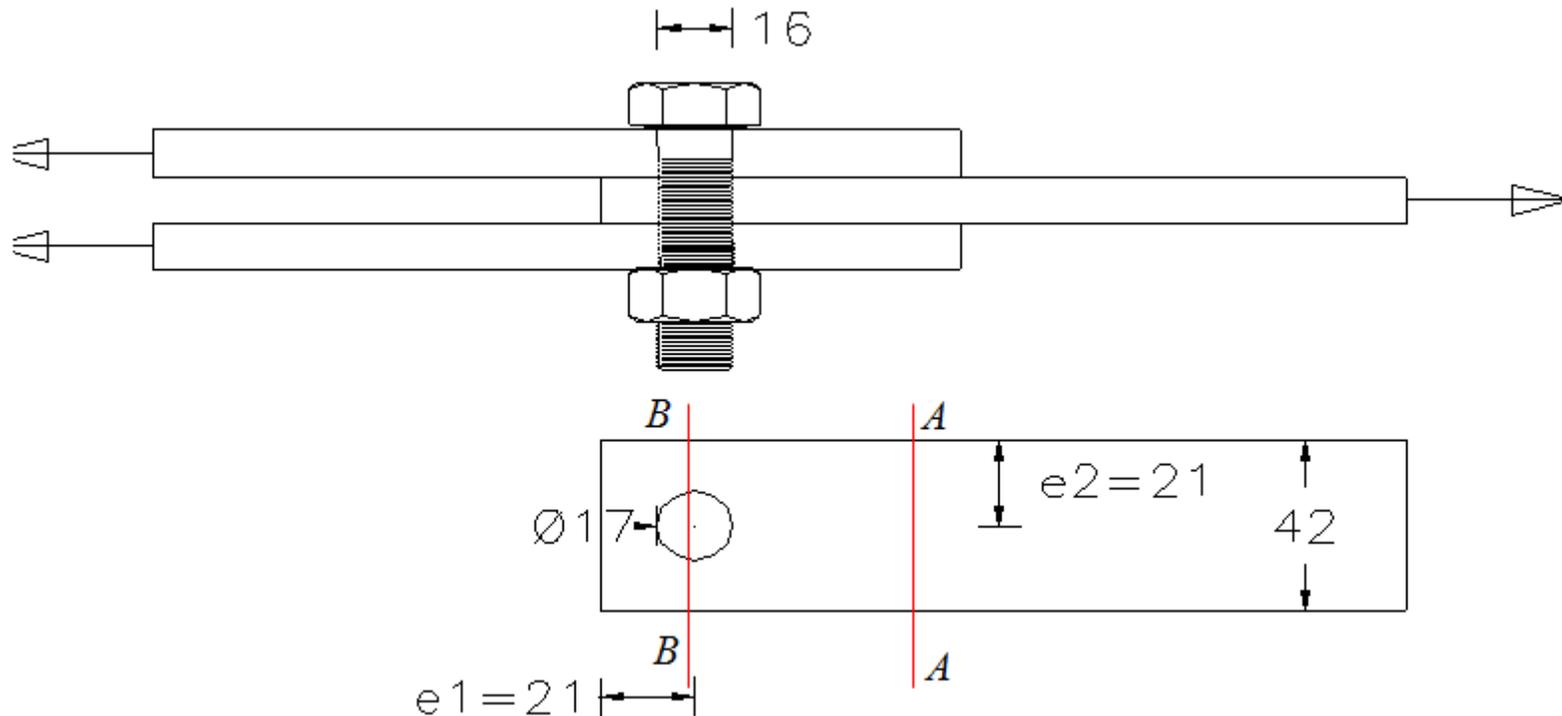
La forza resistente per attrito allo SLU:

$$F_{s,Rd} = n \mu F_{p,Cd} / \gamma_{M3} = 0.3 \cdot 87920 / 1.25 = 21.1 \text{ kN} < N_{ed}$$

DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI UNIONI BULLONATE

aumentando il numero di superfici a contatto ($n=2$) si avrà

$$F_{s,Rd} = 42.2 > N_{ed} = 40 \text{ kN}$$



DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI UNIONI BULLONATE

VERIFICA A TRAZIONE DELLE LAMIERE (acciaio S275)

$N_{pl,Rd}$ è la resistenza plastica della sezione lorda:

$$A=42*10=420\text{mm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 420 * 275 / 1.05 = 110000 \text{ N} = 110 \text{ kN}$$

$N_{u,Rd}$ è la resistenza a rottura della sezione netta:

$$A_{net} = 10 * (42 - 17) = 250 \text{mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = 0.9 * 250 * 430 / 1.25 = 77.4 \text{ kN}$$

$N_{u,Rd} = 77.4 \text{ kN} > N_{Ed} = 40 \text{ kN}$ dunque la verifica è soddisfatta

VERIFICA A RIFOLLAMENTO

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$\alpha_b = \min \{1; 21/(3 \cdot 16)\} = 0.437$$

$$k_t = 1 \text{ essendo } t = 10 \text{ mm} > 1.25 \text{ mm}$$

$$F_{b,Rd} = 2.5 \cdot 0.437 \cdot 1 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 10 / 1.05 = 60.1 \text{ kN} > N_{Ed} / 2 = 15 \text{ kN}$$

La forza da trasmettere N_{Ed} agirà sulle superfici di due fori poiché vi sono due bulloni.