



041R - ANALISI DELLE STRUTTURE

Materiali acciaio
Sforzo assiale



Eccellente rapporto resistenza/peso:



Strutture resistenti e leggere
caratterizzate da elevata snellezza → instabilità

Preventivamente ***preparate in officina*** e poi trasferite in
cantiere per il montaggio
→ costruzioni a secco



Soggette a ***corrosione***
(rivestimenti, protezione catodica,
vernici antiruggine)



Completamente ***smontabili e riciclabili***
(riuso elementi strutturali – usati come rottami e rifiuti)
→ sostenibilità
→ manutenzione



Non resistenti al fuoco



(perdita delle caratteristiche meccaniche al crescere della
temperatura)

Composizione chimica

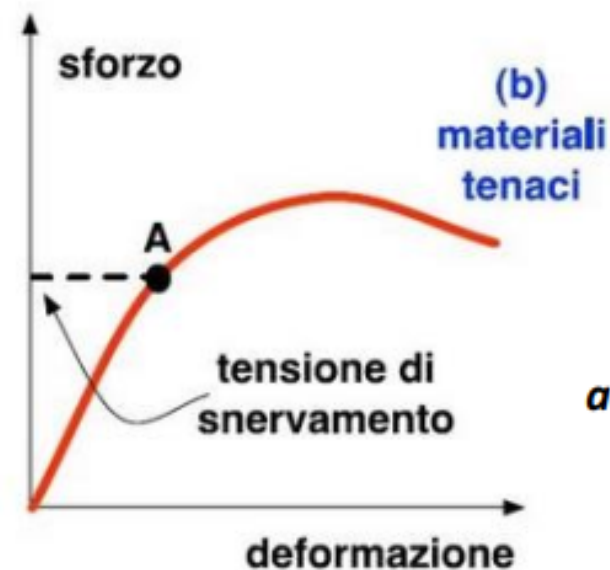
Le caratteristiche chimiche che devono essere rispettate dagli acciai da carpenteria sono riportate nella seguente tabella:

	Grado	Carbonio C (%)	Manganese Mn (%)	Silicio Si (%)	Fosforo P (%)	Zolfo F (%)
S235 S275	B	≤0.24			≤0.055	≤0.055
	C	≤0.22			≤0.050	≤0.050
	D	≤0.22			≤0.045	≤0.045
S355	B	≤0.26	≤1.6	≤0.60	≤0.050	≤0.050
	C	≤0.24	≤1.6	≤0.60	≤0.050	≤0.050
	D	≤0.22	≤1.6	≤0.60	≤0.045	≤0.045

Il carbonio eleva la resistenza e riduce la duttilità e la saldabilità del materiale, pertanto gli acciai da costruzione (acciai da carpenteria) devono essere caratterizzati da un basso tenore di carbonio ($0.10\% < C < 0.30\%$).

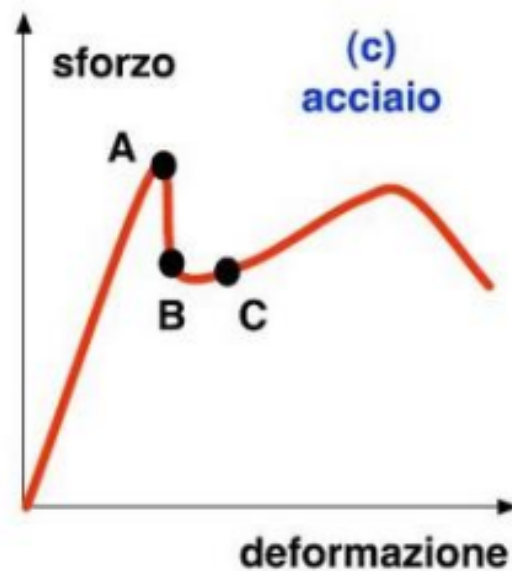
Duttilità (di materiale)

Ceramica, ghisa, vetro, ecc.



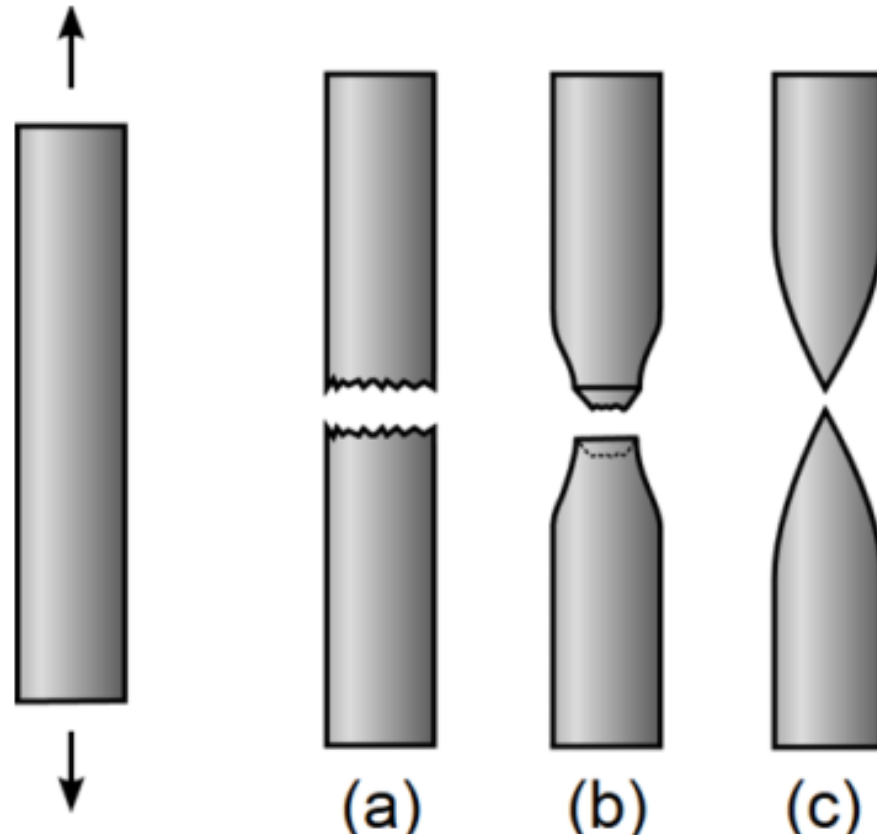
Acciai ad alto contenuto di carbonio

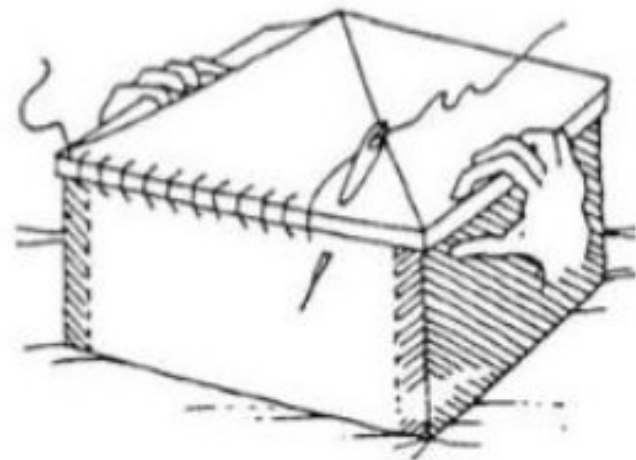
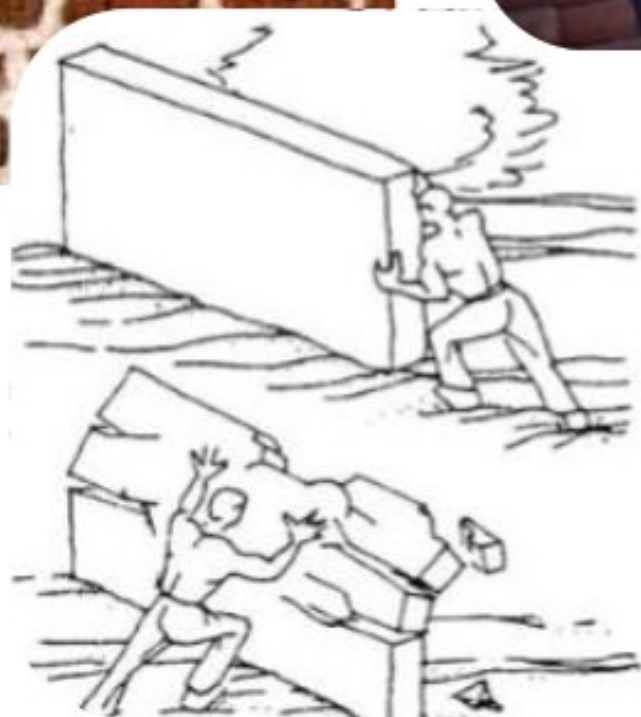
Acciai a basso contenuto di carbonio, rame, alluminio, ecc.



Duttilità (di materiale)

- ✓ è una proprietà che indica la **capacità di un materiale di deformarsi plasticamente prima di giungere a rottura**, cioè la **capacità di sopportare deformazioni plastiche**
- ✓ Un corpo è tanto più duttile quanto maggiore è la deformazione plastica raggiunta prima della rottura

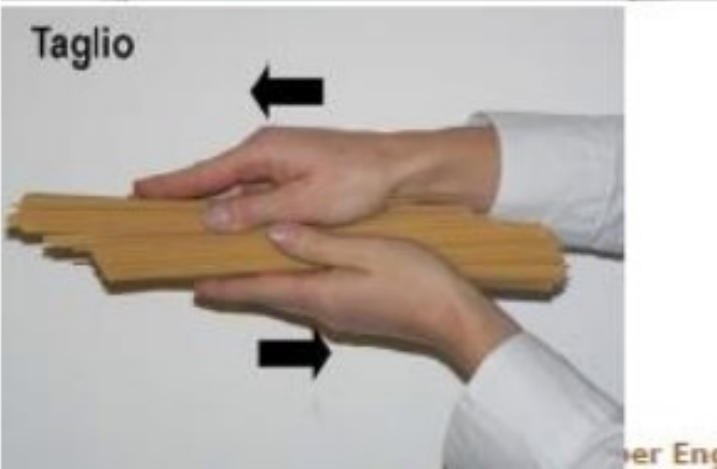




Muratura



Legno





CENNI STORICI



ACCIAIO STRUTTURALE

Inizialmente viene introdotto come **rinforzo di murature**, di archi e volte (catene, bolzoni, chiavi metalliche)



All'inizio dell'Ottocento inizia un processo di rapido progresso nella siderurgia.

L'era dell'acciaio tuttavia ha inizio nella **seconda metà dell'ottocento**: l'impiego di **altiforni** e l'uso del **carbon coke** (carbone ottenuto mediante un processo di "distillazione distruttiva" del carbon fossile - ad opera di Abram Darby), in sostituzione del carbone vegetale (ottenuto per combustione dalla legna e con maggiore potere calorico), consente produzione importante di materiale.

Parallelamente fiorisce l'attività teorica e si perfezionano gli strumenti di calcolo: nasce la scienza delle costruzioni.

La richiesta di grandi quantitativi di ferro per la realizzazione di profili per le **rotaie**, per la realizzazione di **grandi coperture** delle stazioni ferroviarie, per i **ponti**, e di strutture stagne a guscio degli **scafi**, comportò un notevole **impulso e sviluppo dell'industria siderurgica** che in quegli anni introdusse importanti innovazioni:

1835 - Produzione industriale delle travi → sostituzione degli impalcati lignei con strutture in laterizio e acciaio.





Nel medio-evo e rinascimento viene lavorato dai mastri ferrai per ottenere ferri battuti decorativi

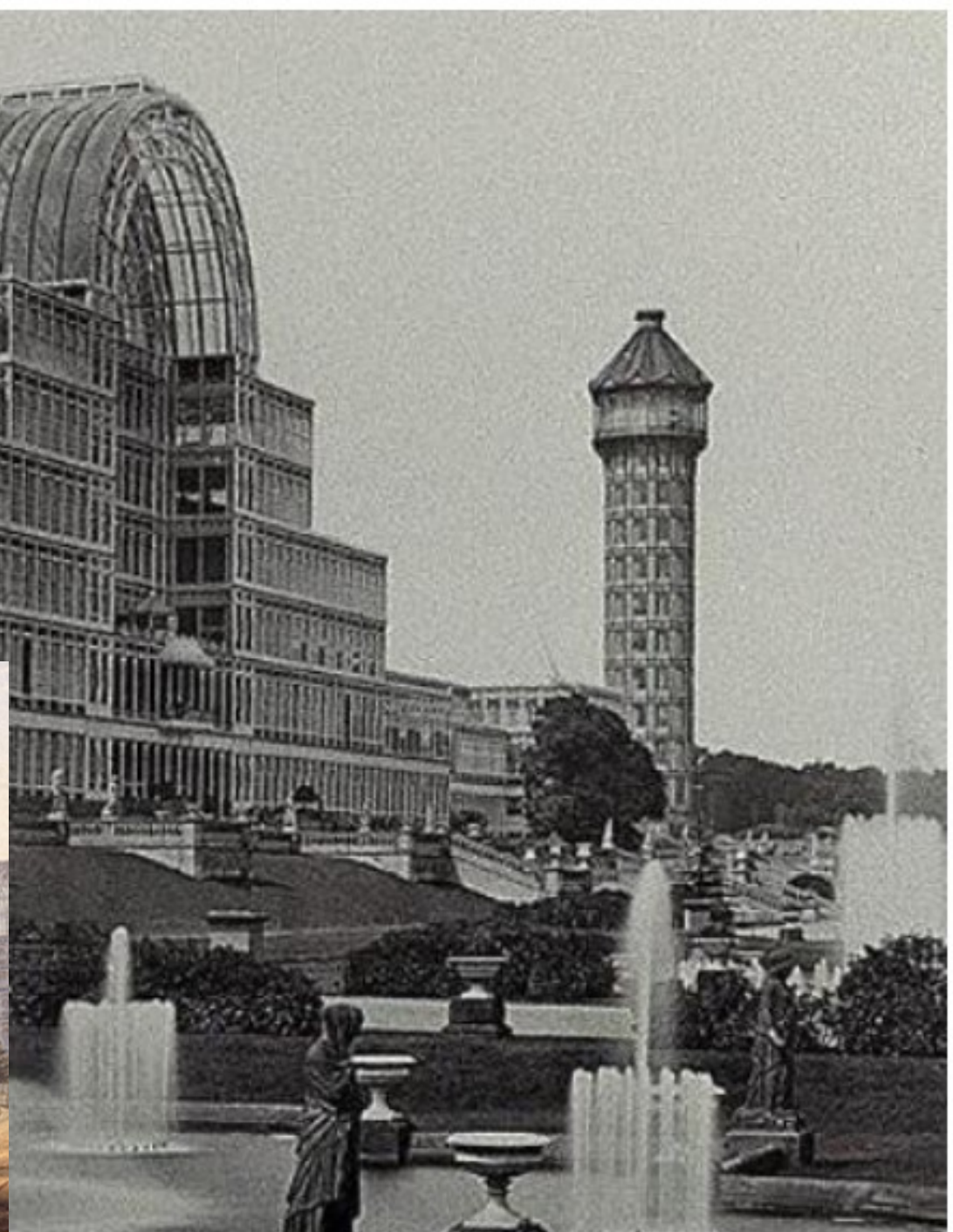
Si introducono poi per la realizzazione di ponti in America le **strutture reticolari in ferro (ferri tondi) e legno.**



1852 Bollman Bridge (USA)

1851 Crystal Palace

ACCIAIO STRUTTURALE



1883 Brooklyn Bridge (USA) - 1825m



Il XIX secolo segna la nascita della teoria dell'elasticità e la derivazione di molte delle principali soluzioni elastiche associate ad importanti fenomeni fisici:

Nel 1850 il matematico e ingegnere francese **De Saint-Venant** sviluppò il tema della flessione di travi soggette a carichi trasversali.

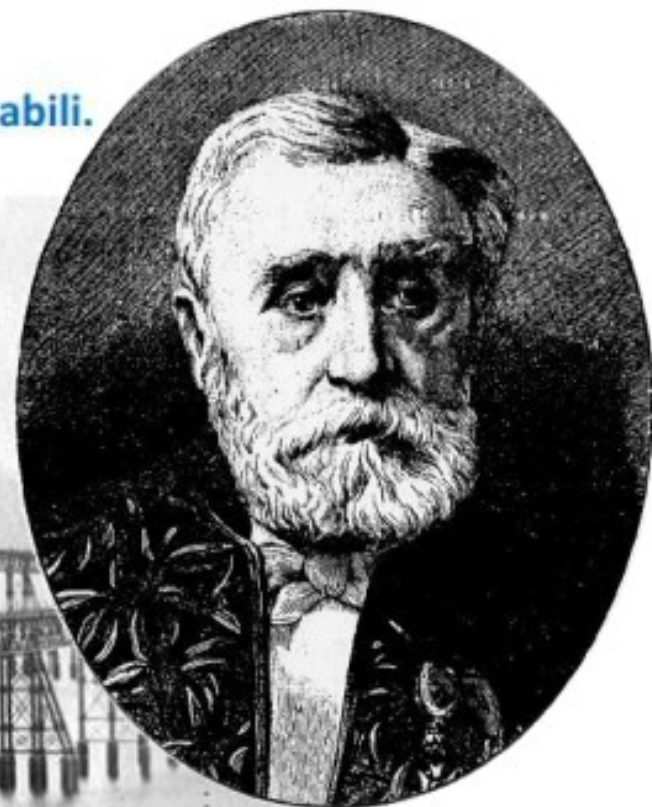
Non si aveva conoscenza di fenomeni di instabilità. I progetti si basavano prevalentemente sulle intuizioni di tecnici i quali avevano affinato le conoscenze con l'esperienza di precedenti realizzazioni.

Studi sull'instabilità avviati in seguito a numerosi crolli apparentemente inspiegabili.

Ferro battuto e ghisa

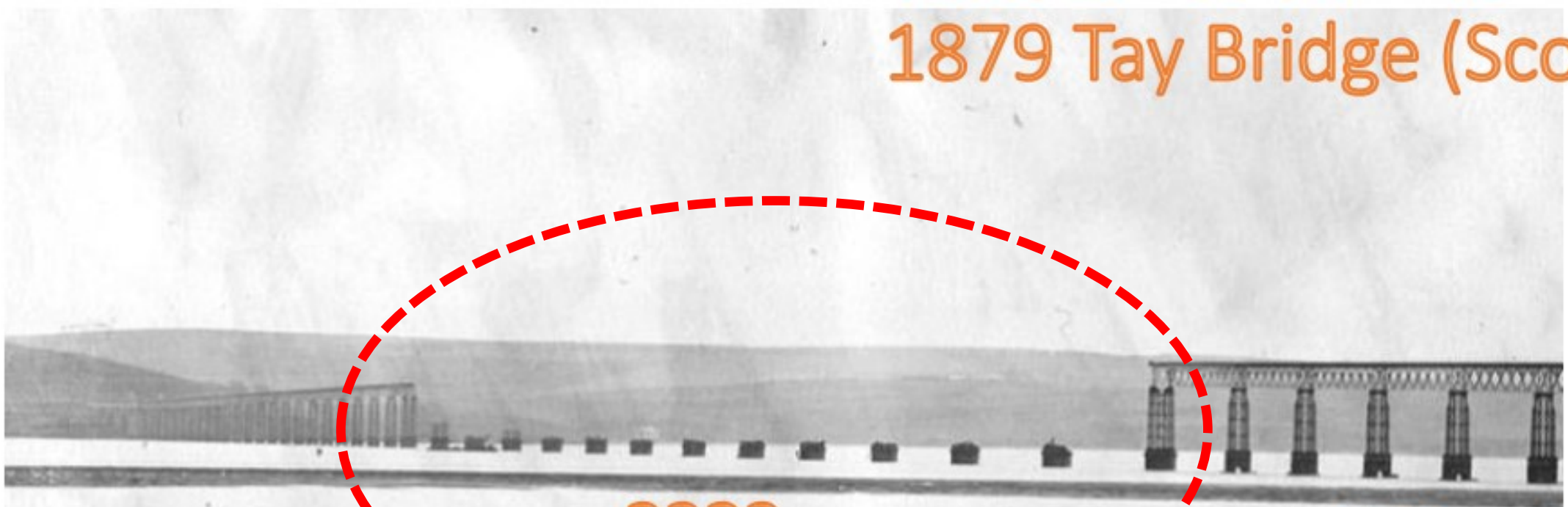


1879 Tay Bridge (Scozia)



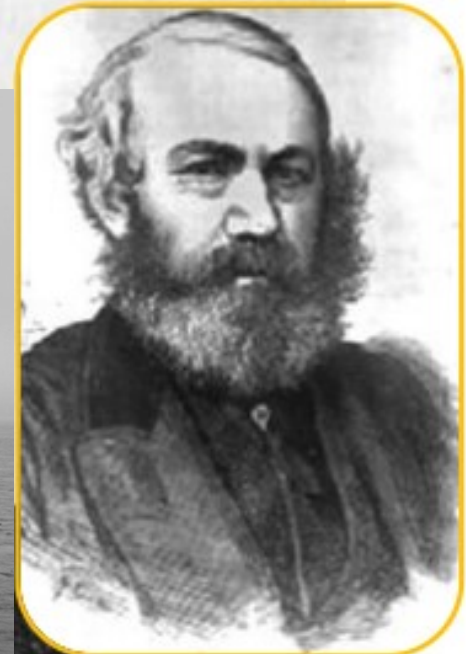
1879 Tay Bridge (Scozia)

ACCIAIO STRUTTURALE



?????

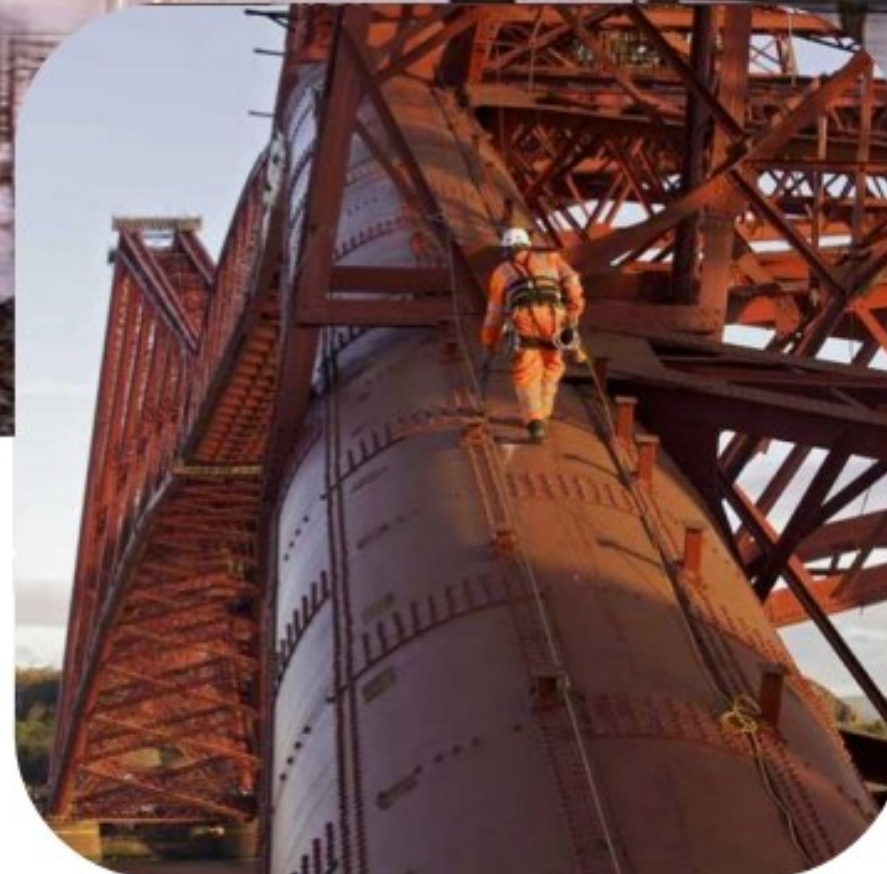
Sir Thomas Bouch



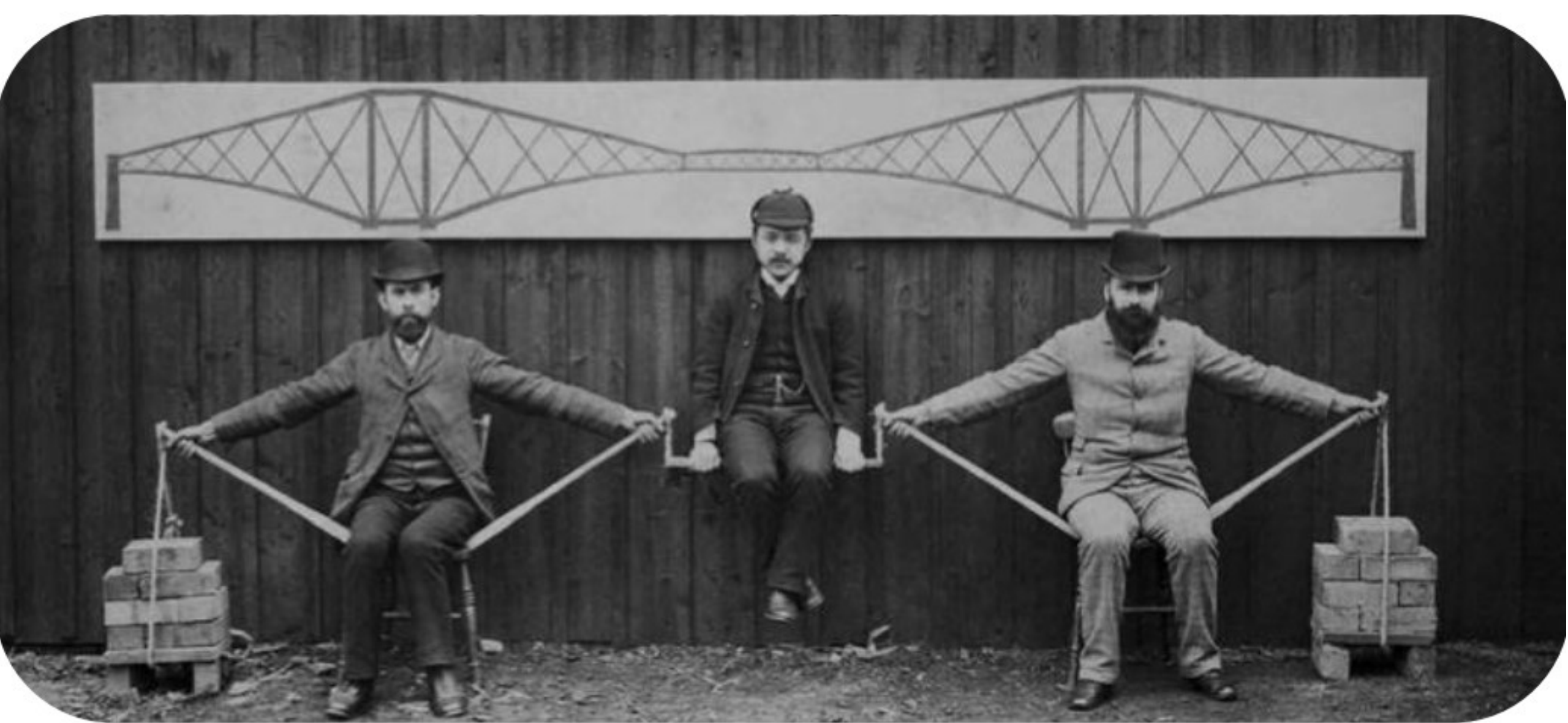
materiale di bassa qualità
errori progettuali (carico da
vento)
fenomeni di fatica



prima struttura importante in acciaio
4 torri (104m di altezza)



1890 Firth of Forth Bridge (Scozia) - 2528m



1890 Firth of Forth Bridge (Scozia) - 2528m



Durabilità

Qualità

Ingombro ridotto

Grandi luci

Prefabbricabilità

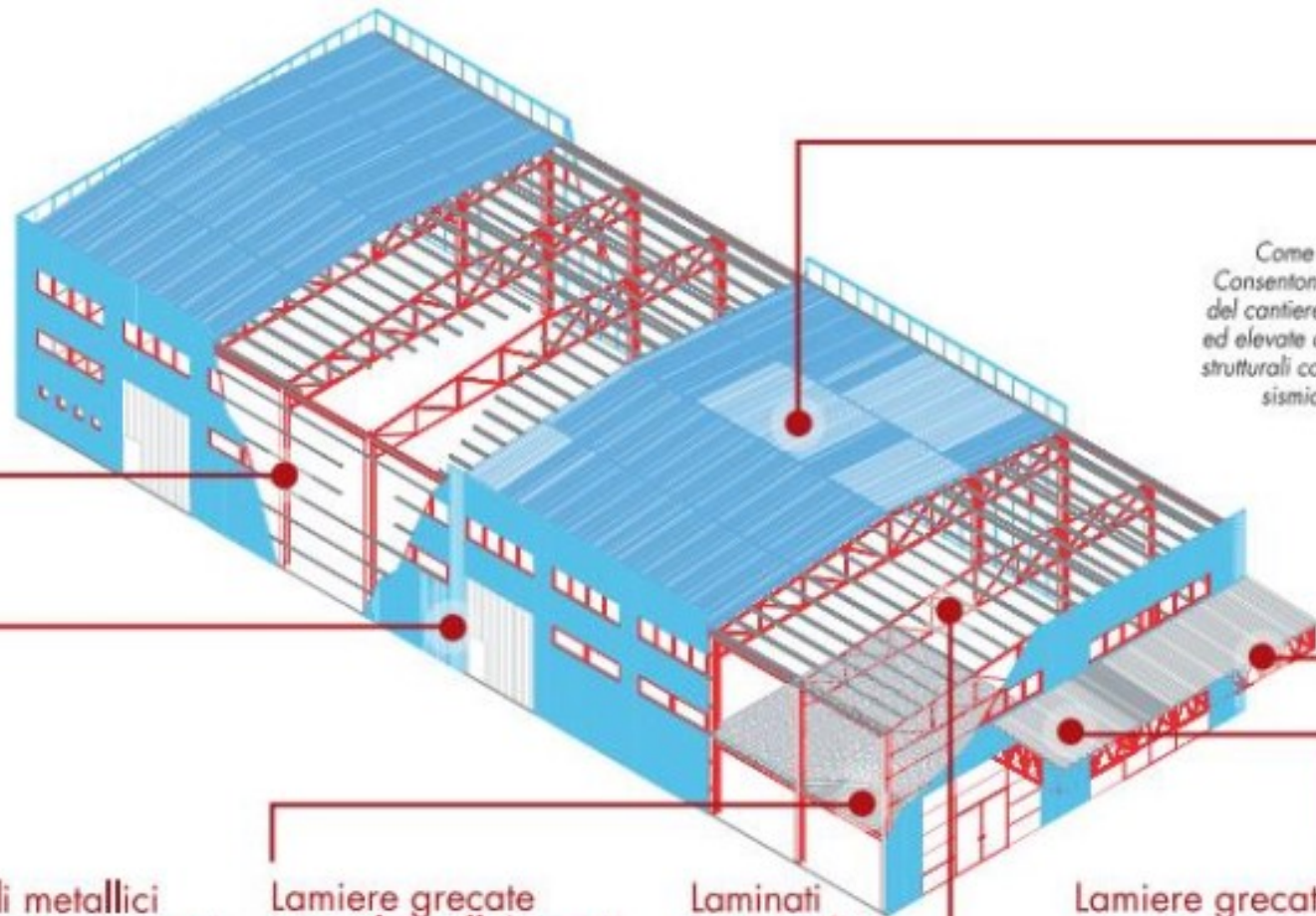
Rapidità costruttiva

Risparmio fondazionale

Resistenza e leggerezza => capacità sismica

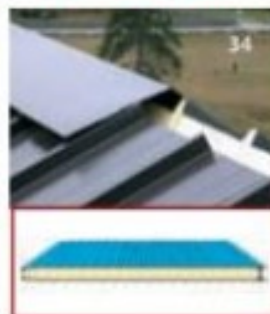
etc.

Elementi



Pannelli metallici coibentati per coperture

Come per le pareti. Consentono produttività del cantiere, basso peso ed elevate caratteristiche strutturali contro il rischio sismico, durabilità.



Profili Laminati



Pannelli metallici coibentati per pareti



Lamiere grecate per solai collaboranti



Laminati Mercantili



Lamiere grecate per rivestimenti



Tubolari








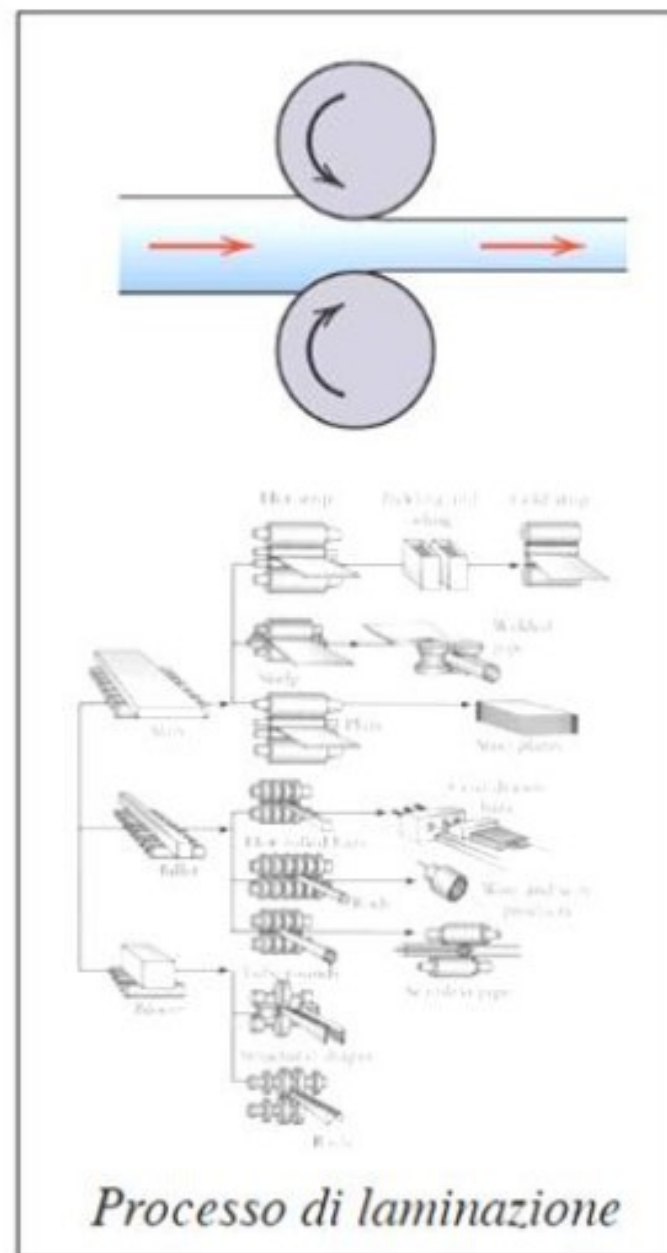
32

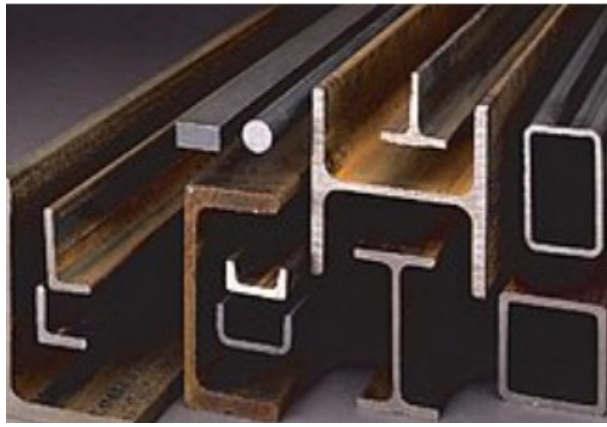
33

35

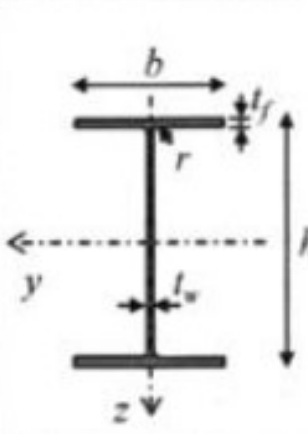
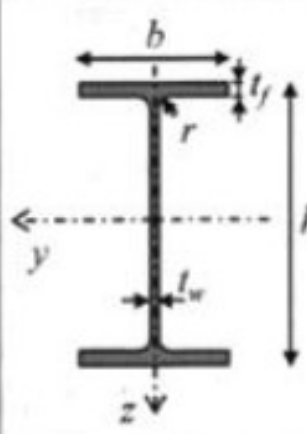
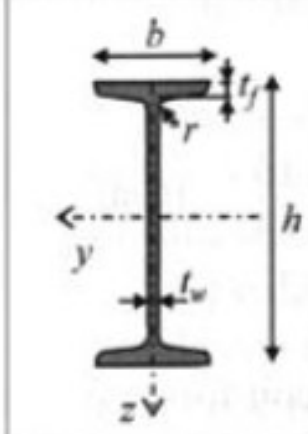
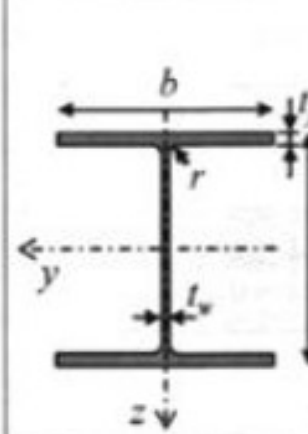
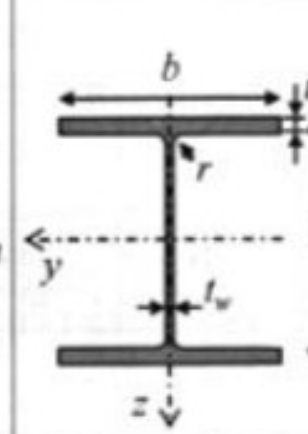
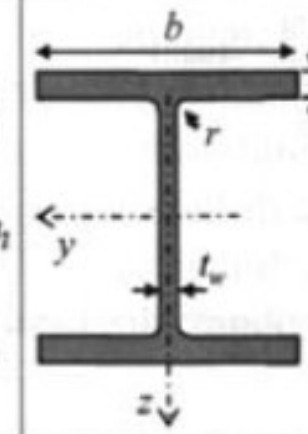
Gli elementi strutturali in acciaio sono prodotti attraverso processi di *laminazione*, a caldo o a freddo, o di *piegatura* a freddo e si possono così classificare:

	Prodotti	Processi di lavorazione
Laminati piani e coils (prodotti piani)	 <p>Lamiere ($t > 3\text{mm}$) Lamierini ($t \leq 3\text{mm}$)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Laminazione a caldo Laminazione a freddo
Profilati laminati a caldo (prodotti lunghi, prodotti cavi)	 <p>HE, HD, HP IPE UPN, UPE</p>	<ul style="list-style-type: none"> Laminazione a caldo
Profili cavi	 <p>OHS RHS</p>	<ul style="list-style-type: none"> Laminazione a caldo Piegatura a freddo Saldatura
Profilati per composizione saldata	 <p>IFB SFB Alveolate Arcelor</p>	<ul style="list-style-type: none"> Laminazione a caldo con saldatura
Profili formati a freddo	 <p>Lamiere grecate Profili a Z o C</p>	<ul style="list-style-type: none"> Piegatura a freddo Profilatura Pressopiegatura Stampaggio





I profili *laminati a caldo* sono i più utilizzati per realizzare *travi*, *colonne* ed elementi di *controvento*. Le sezioni più utilizzate sono a doppio T ad ali strette o larghe. Queste sezioni risultano particolarmente efficienti quando l'elemento è sollecitato a flessione.

IPE A Alleggerito (<i>t</i> ridotti)	IPE	IPN Ad ali rastremate	HE A-AA Alleggerito (<i>t</i> ridotti)	HE	HEM Rinforzato (<i>t</i> increm.)
					
78+597	80+750	80+600	<i>h</i> (mm) 96+990	100+1000	120+1008

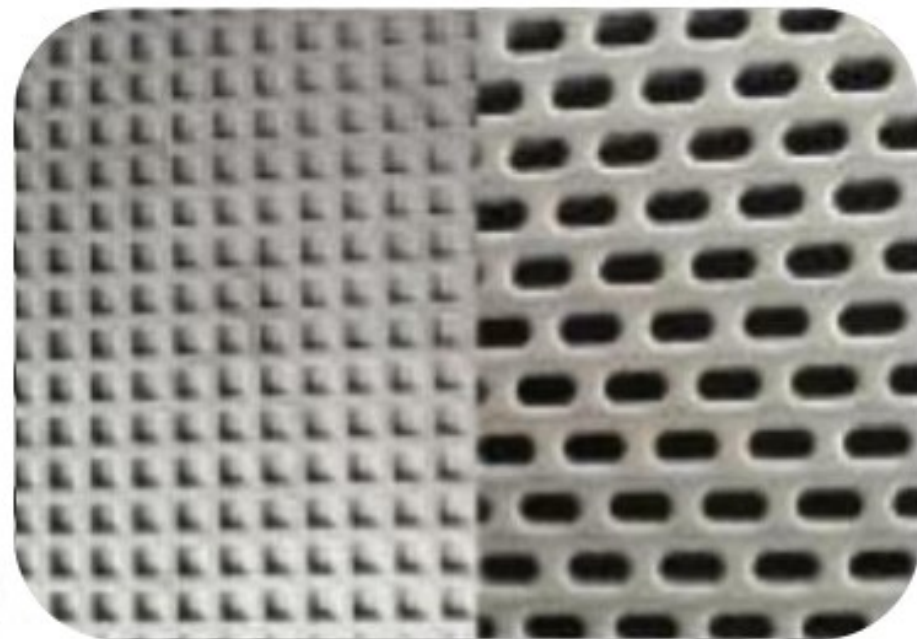
LAMIERE

ACCIAIO STRUTTURALE

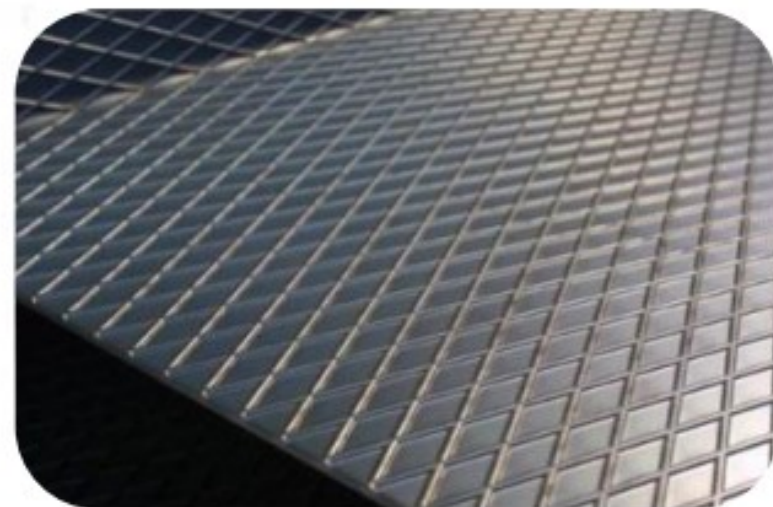




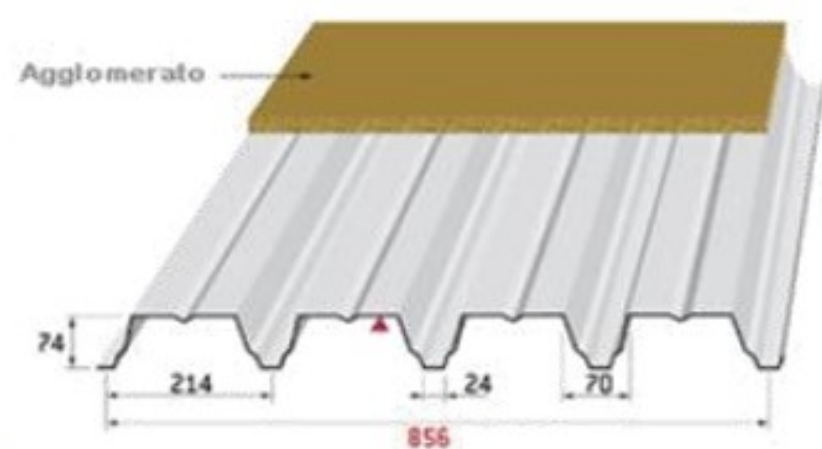
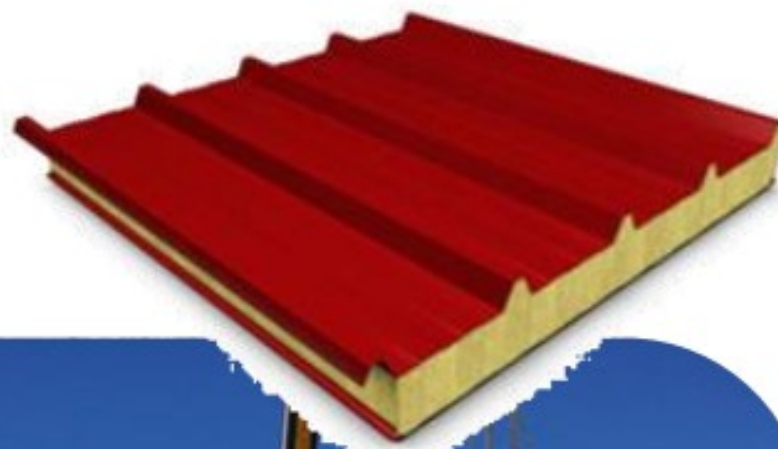
Rotoli



Lamiere grecate
 $\approx 0.5\text{mm}$



Edifici "a secco"



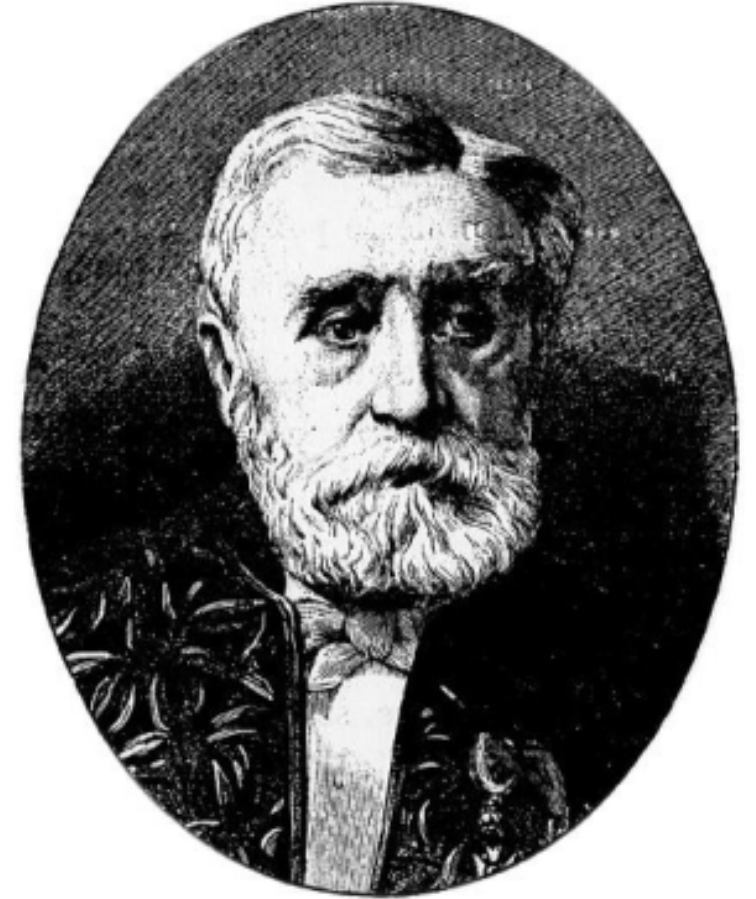
ACCIAIO STRUTTURALE



TEORIA DELLA TRAVE

IL PROBLEMA DI SAINT-VENANT

- ✓ Nell'ambito della meccanica strutturale, si è soliti studiare il comportamento di un solido elastico, omogeneo, isotropo e di forma cilindrica, ossia un solido che possiamo chiamare, almeno per la sua forma, **trave**
- ✓ Il problema matematico a comunemente noto come **“teoria della trave”** è stato impostato e risolto da Adhémar Jean-Claude Barré, conte di Saint-Venant, nella famosa memoria “De la torsion des prismes” presentata all'Accademia delle Scienze di Parigi nel 1853



*Adhémar-Jean-Claude Barré
de Saint-Venant
(Villiers-en-Bière, 23 agosto 1797 -
Saint-Ouen, 6 gennaio 1886)*

- ✓ Il metodo proposto dal Saint-Venant, ingegnere civile e professore di meccanica all'École des Ponts et Chaussées, per risolvere il problema unisce al **rigore matematico** l'**intuizione** dell'ingegnere. Egli dette l'avvio ad uno dei capitoli più suggestivi della **Scienza delle Costruzioni**, proponendo una soluzione che si rivelava sbalorditiva per la portata pratica della congettura (*postulato*) a giustificazione del procedimento proposto
- ✓ Il **modello**, sebbene possa apparire piuttosto lontano dalla realtà, è un valido strumento in grado di descrivere **il comportamento di molte travi reali**

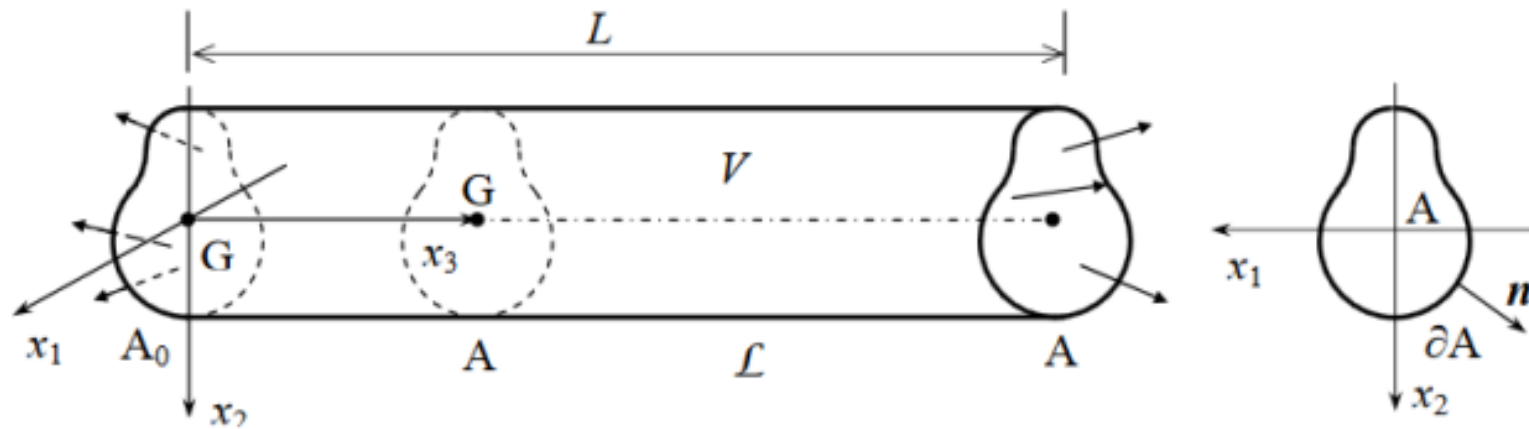
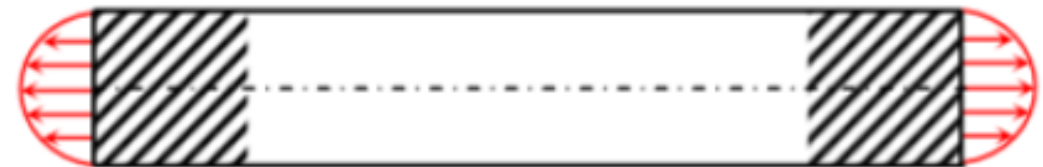
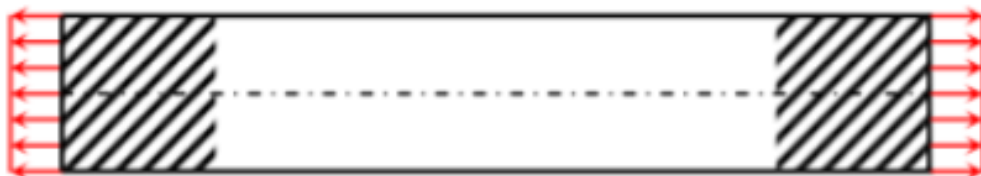


Fig. 1. Trave del De Saint-Venant di sezione costante ad asse rettilineo,

✓ Il principio di Saint-Venant può essere così enunciato:

“due distribuzioni di forze superficiali staticamente equivalenti (con la stessa risultante e lo stesso momento risultante), agenti sulla stessa porzione di superficie di un corpo, producono gli stessi effetti in punti sufficientemente distanti dalla zona di applicazione delle forze”

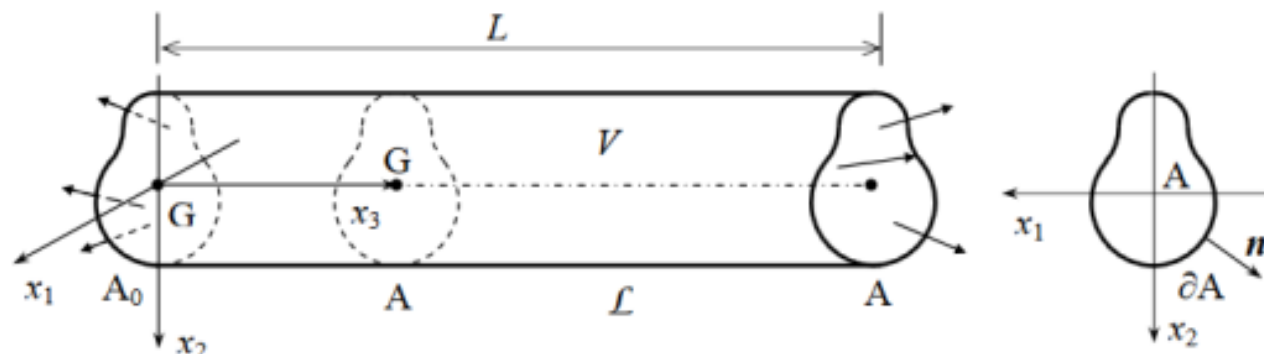
OSSERVAZIONE => Non è necessario imporre una particolare distribuzione di forze superficiali sulle basi caricate, ma è sufficiente far riferimento solo alla risultante R e al momento risultante M di tale distribuzione. La soluzione corrispondente risulta valida per tutte le distribuzioni di forze superficiali aventi stessa risultante R e stesso momento risultante M



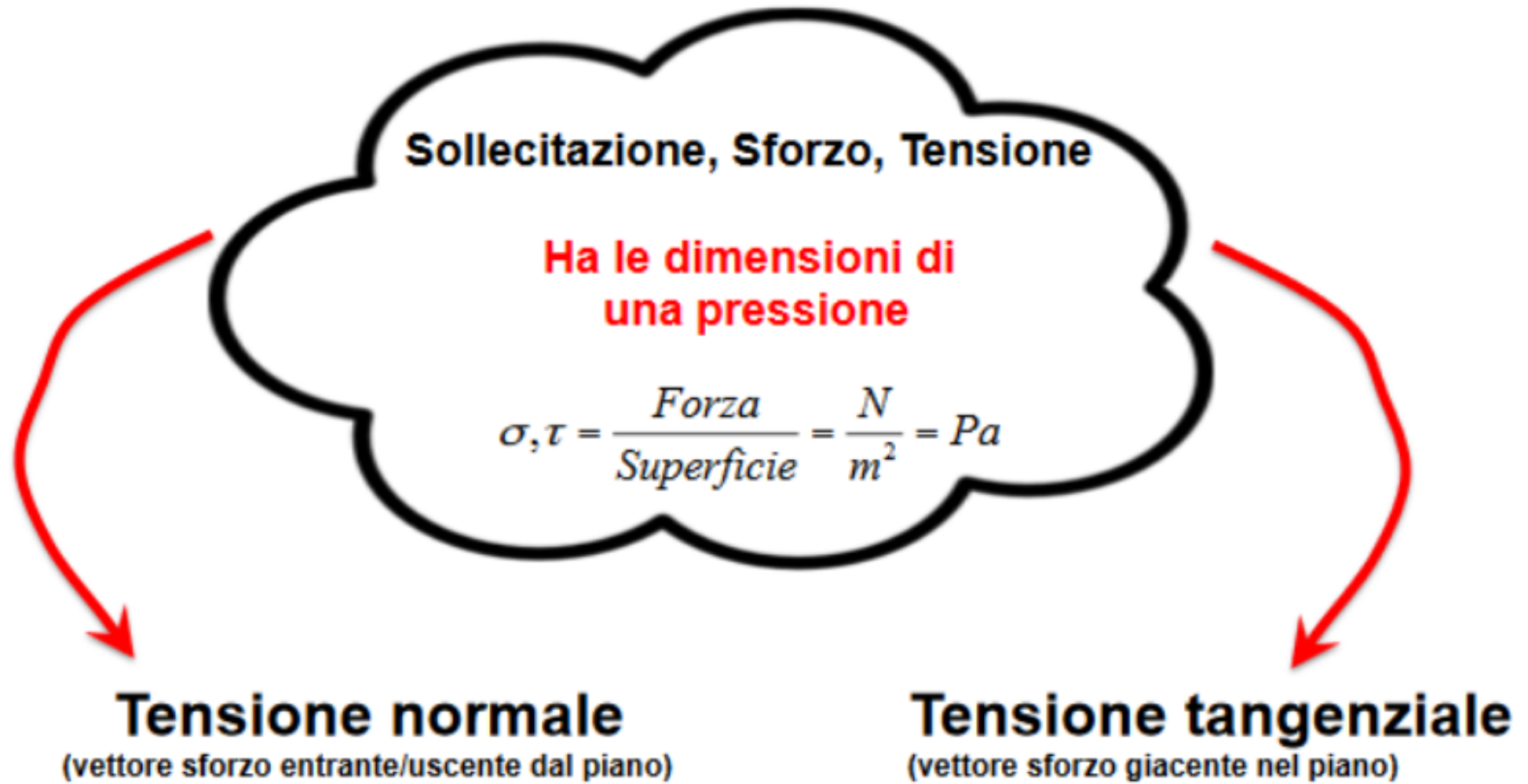
CASI FONDAMENTALI

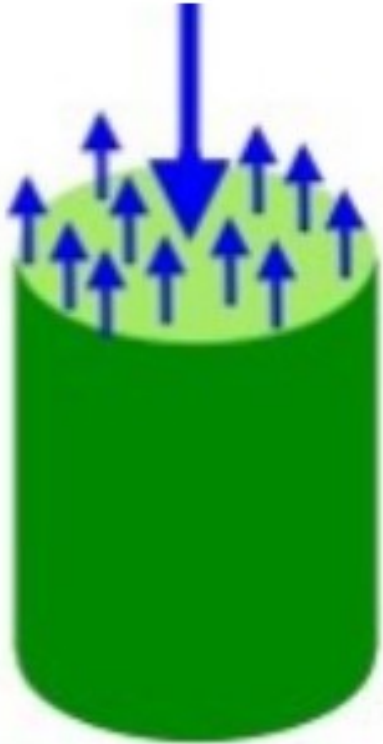
- ✓ Poiché le equazioni che descrivono il **problema elastico** sono **lineari**, risulta valido il **principio di sovrapposizione degli effetti**, per cui è possibile studiare separatamente l'effetto di ciascuna componente di R e di M
- ✓ Ciò consente di suddividere lo **studio del caso generale di sollecitazione** nella **somma** dei seguenti **quattro casi fondamentali**:

- SFORZO ASSIALE**
- FLESSIONE SEMPLICE**
- TAGLIO**
- TORSIONE**



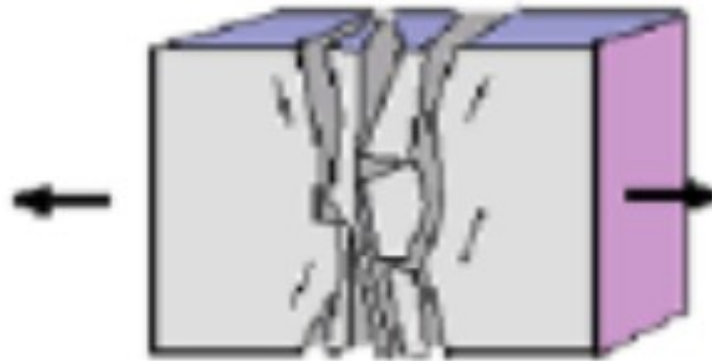
Tensioni e deformazioni



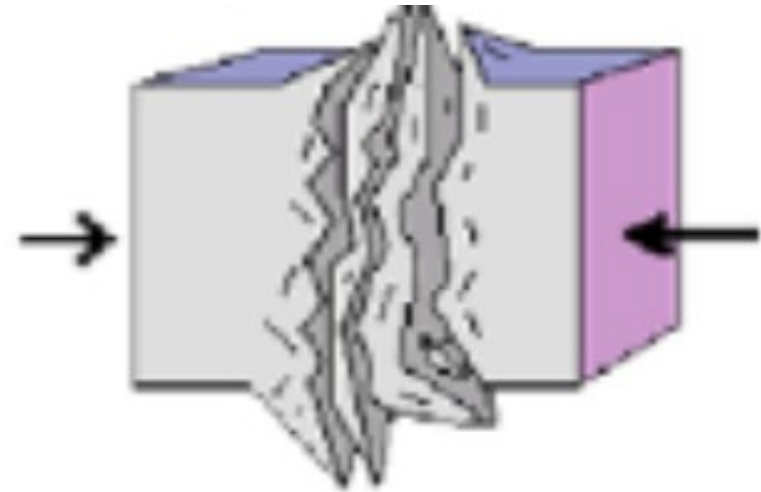


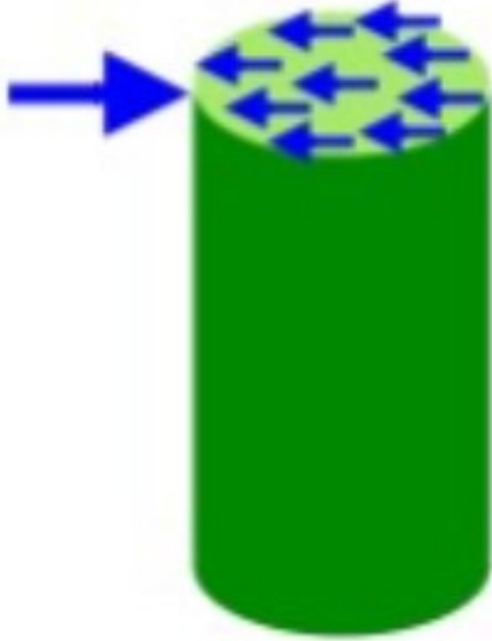
Sforzi NORMALI: Positivo se USCENTE dalla superficie (trazione) Negativo se ENTRANTE (compressione)

TRAZIONE



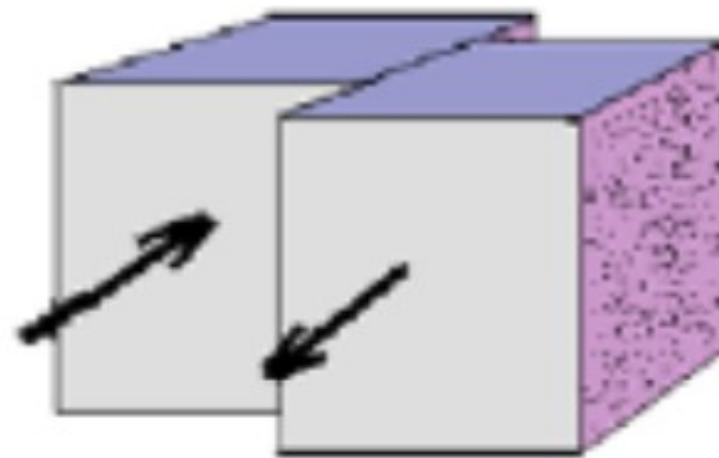
COMPRESSIONE



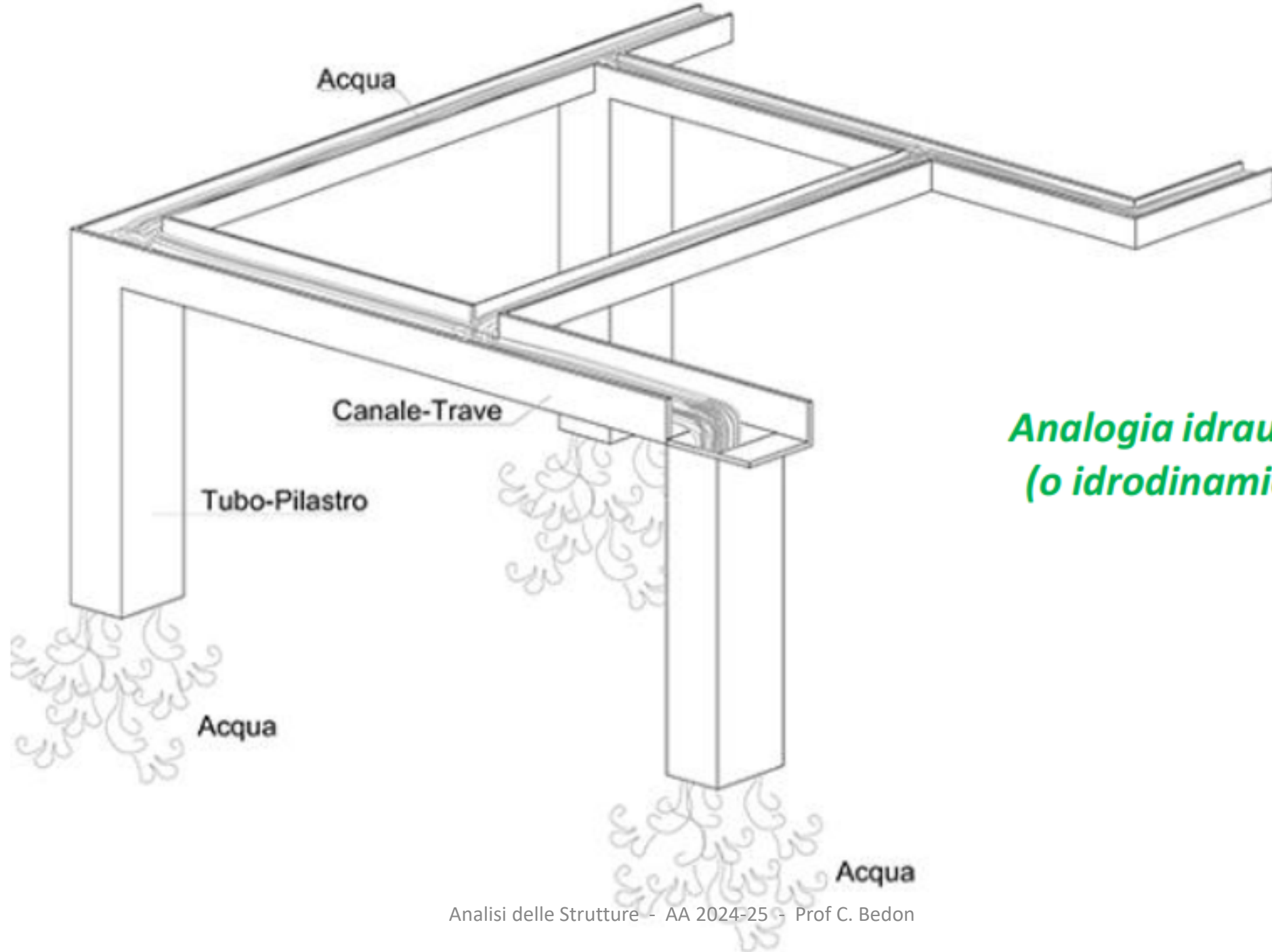


Sforzi TANGENZIALI: Positivo se tende a far ruotare la superficie in senso ORARIO, Negativo se tende a far ruotare la sezione in senso ANTIORARIO

TAGLIO



IL PROBLEMA DI SAINT-VENANT



*Analoga idraulica
(o idrodinamica)*

TEORIA DELLA TRAVE



✓ SFORZO ASSIALE

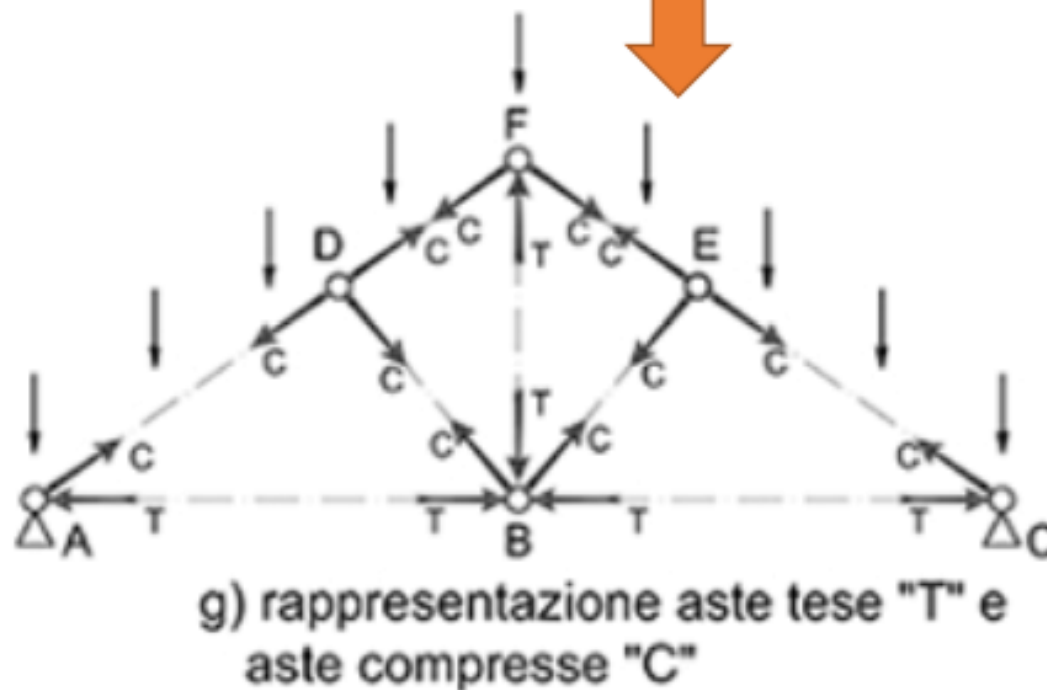
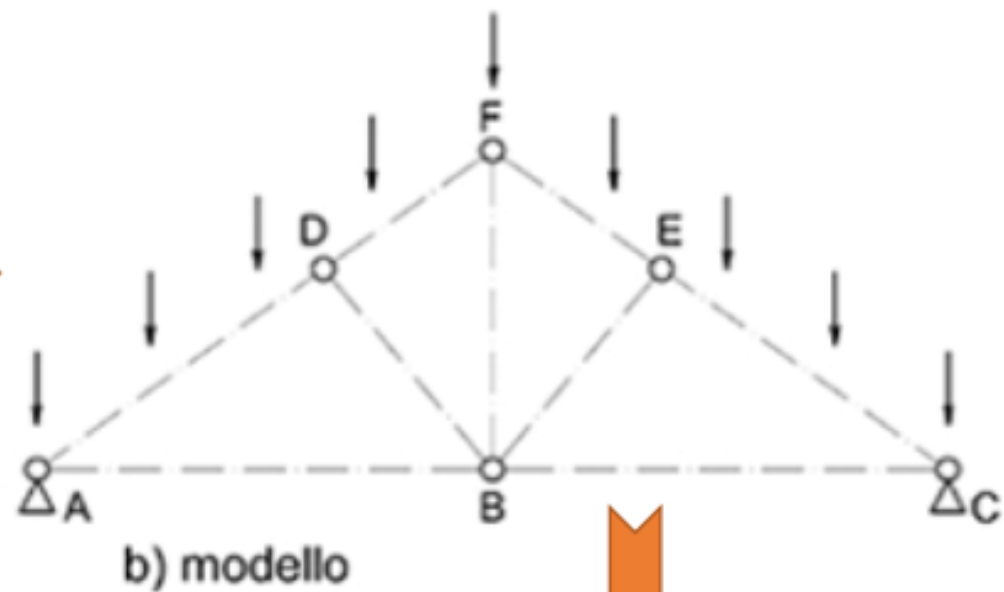
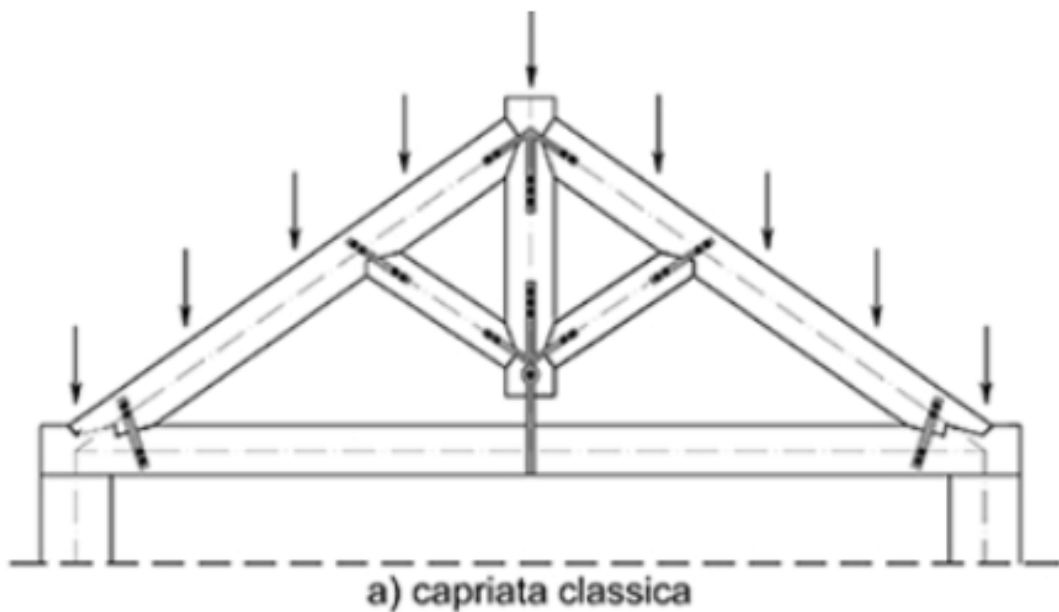
✓ FLESSIONE SEMPLICE

✓ TAGLIO

✓ TORSIONE



SFORZO ASSIALE



SFORZO ASSIALE



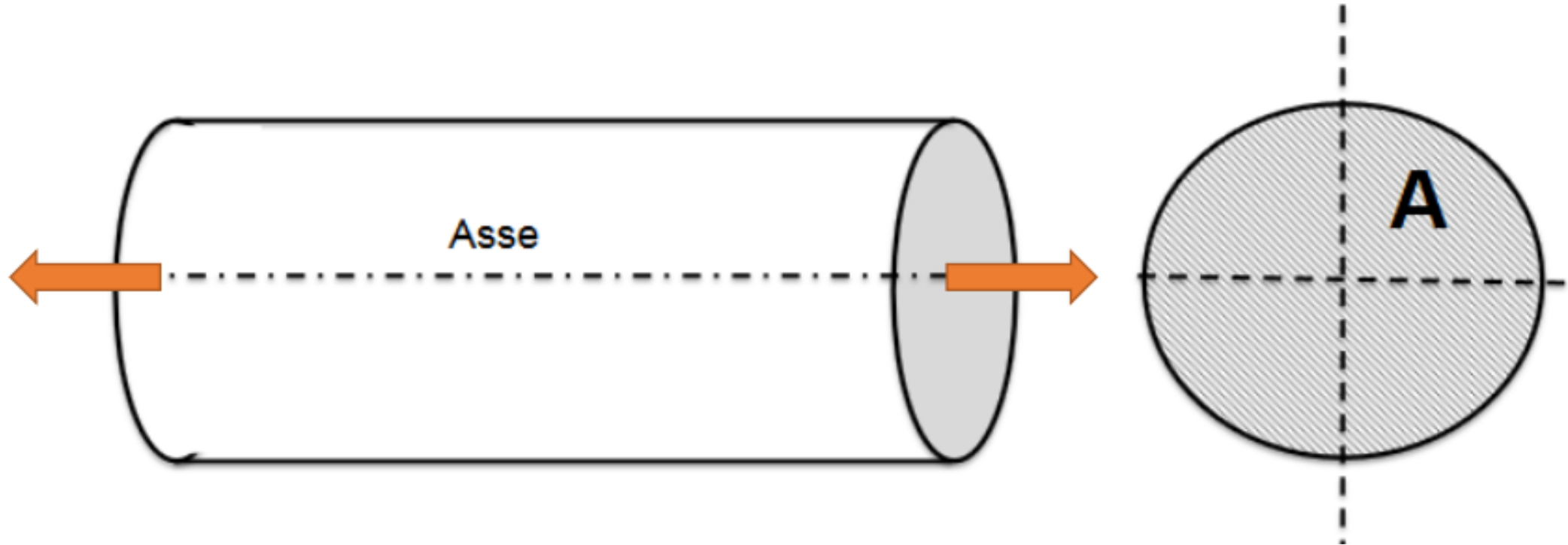
SFORZO ASSIALE



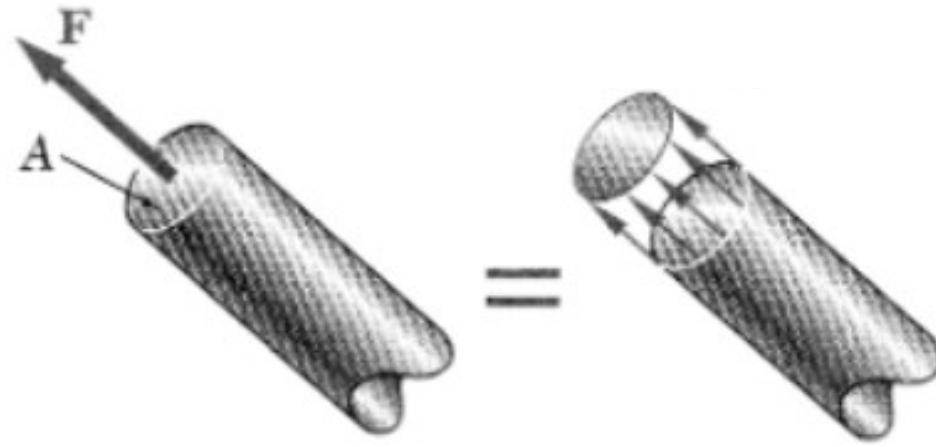
SFORZO ASSIALE



- Per determinare in che modo si esprime lo stato di sollecitazione **nel caso di sollecitazione normale**, prendiamo in esame un solido ad asse rettilineo e sezione costante, caratterizzato da una dimensione prevalente rispetto alle altre due
- Il solido si caratterizza attraverso tre entità:
 - 1) L'asse baricentrico,
 - 2) La forma della sezione
 - 3) L'area della sezione



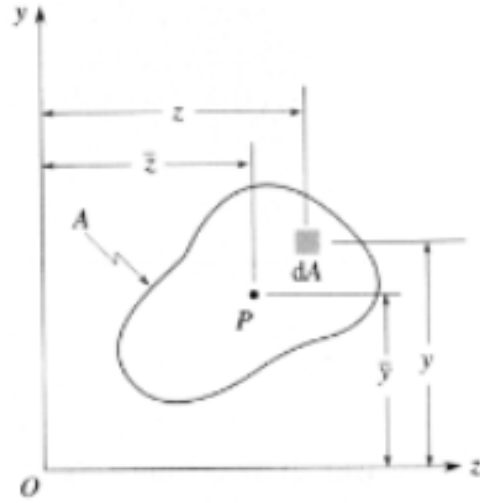
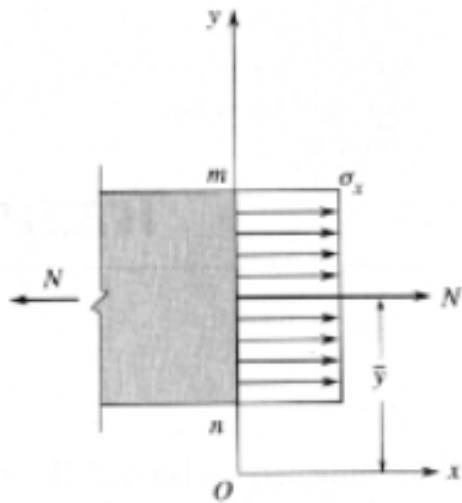
SFORZO ASSIALE



- È intuitivo che, **a parità di forza applicata, un aumento della sezione del componente** (dove per sezione si intende l'area della superficie ottenuta “tagliando” l'asta con un piano perpendicolare al suo asse), **è garanzia di una maggior “resistenza” al carico applicato**
- La forza per unità di area, ossia l'intensità delle forze distribuite su una certa sezione, è chiamata **“tensione” o “stress”** e di solito viene indicata con la lettera greca σ .

• SFORZO ASSIALE

- Se il materiale è omogeneo lo sforzo normale **N** si **distribuisce uniformemente in tutte le aree elementari** da della sezione, interessando in eguale misura tutte le ideali fibre disposte parallelamente all'asse **x** della trave, e dando origine a tensioni unitarie σ_x normali alla sezione trasversale **A**
- Il valore di σ_x si ricava imponendo che la risultante della distribuzione (uniforme) della sollecitazione sulla superficie di area **A** sia uguale all'azione interna **N**



$$\int_A \sigma_x dA = N$$



da cui, essendo σ_x costante

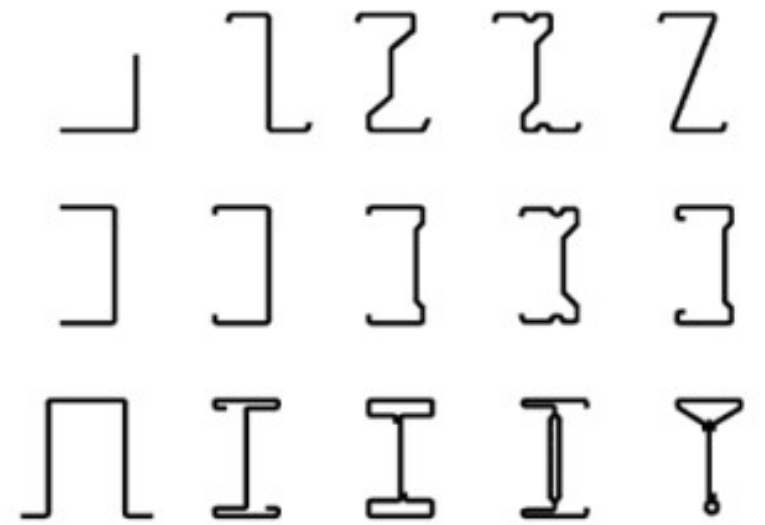
$$\sigma_x \cdot \int_A dA = N \Rightarrow \sigma_x \cdot A = N \Rightarrow \sigma_x = \frac{N}{A}$$

- È chiaro che **in condizioni di puro sforzo assiale, l'azione interna è uguale alla forza esterna applicata**

SFORZO ASSIALE

*Dato N di progetto,
a parità di area A ,
la tensione normale σ è uguale
e uniformemente distribuita
nella sezione*

$$\sigma = N/A$$



a) Single open sections



b) Open built-up sections



c) Closed built-up sections

SFORZO ASSIALE



a) corda tesa



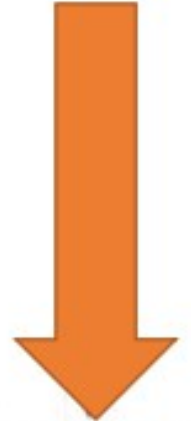
b) tappo sughero compresso



c) filo di ferro teso



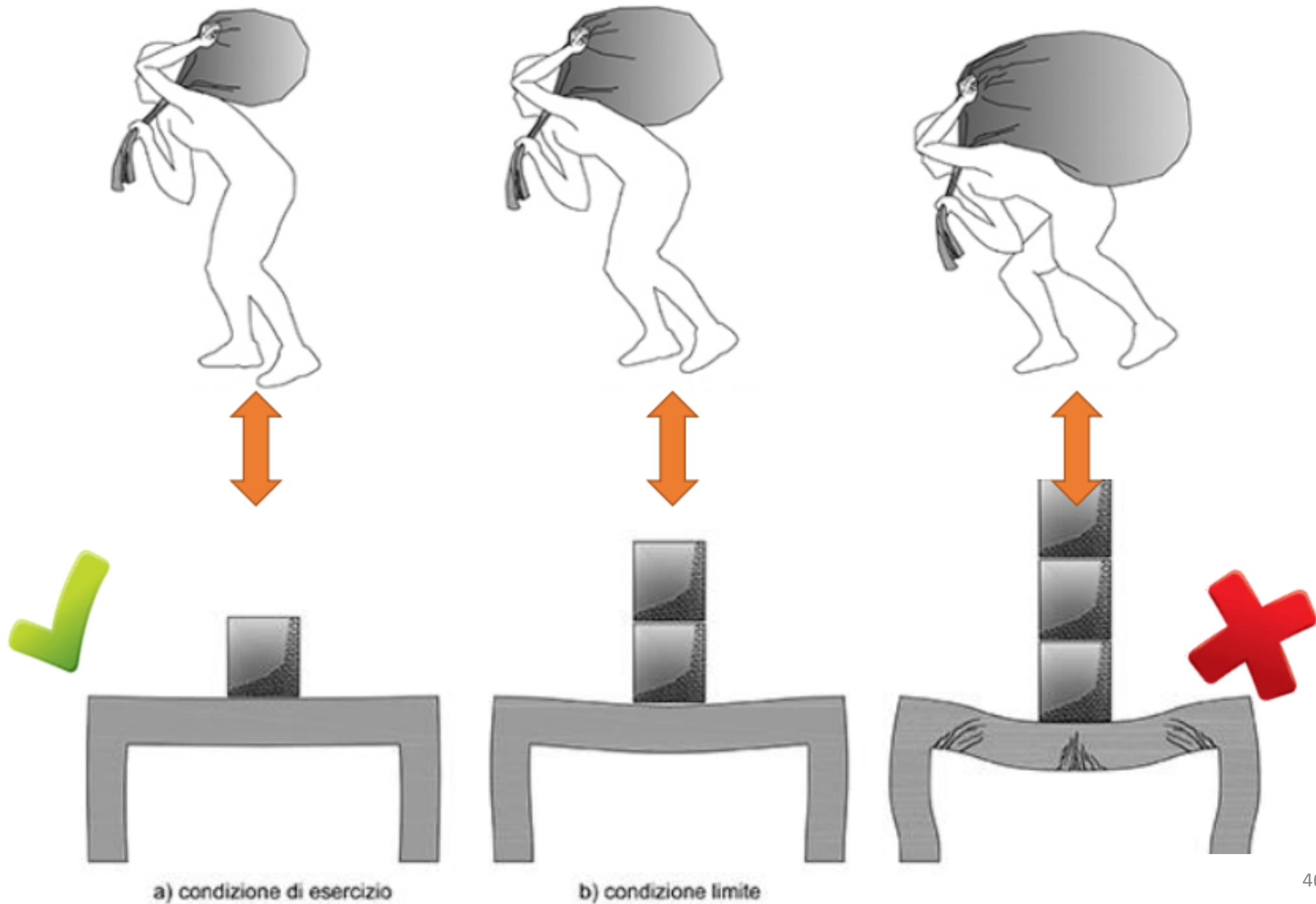
d) mattone compresso



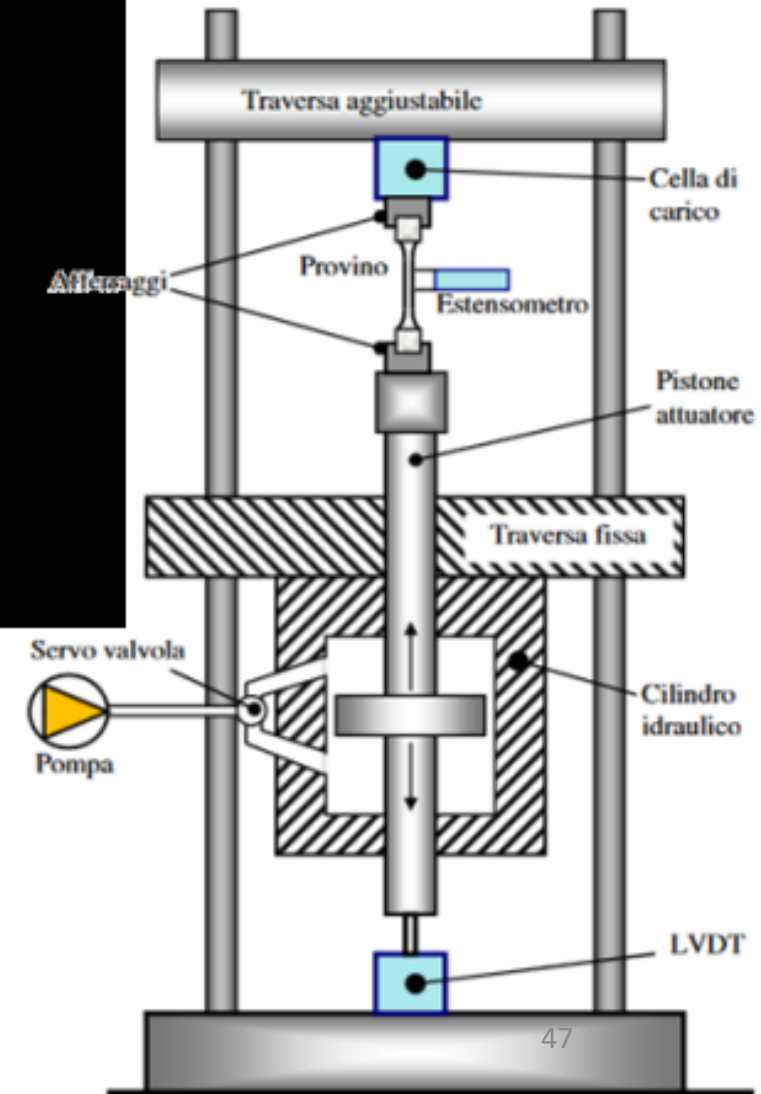
resistenza crescente

Tensione sollecitante < Resistenza del materiale

SFORZO ASSIALE



Tensile Test Stainless Steel Specimen



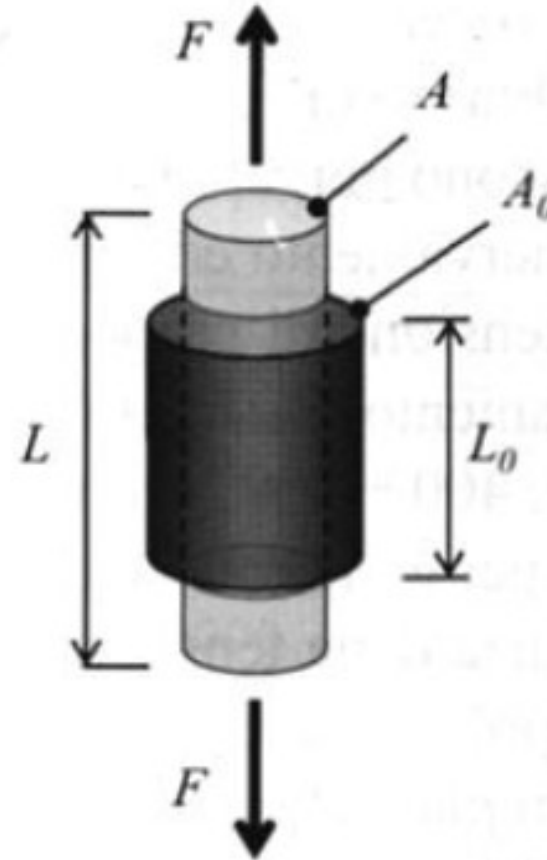
Parametri misurati (ingegneristici)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Tensione

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

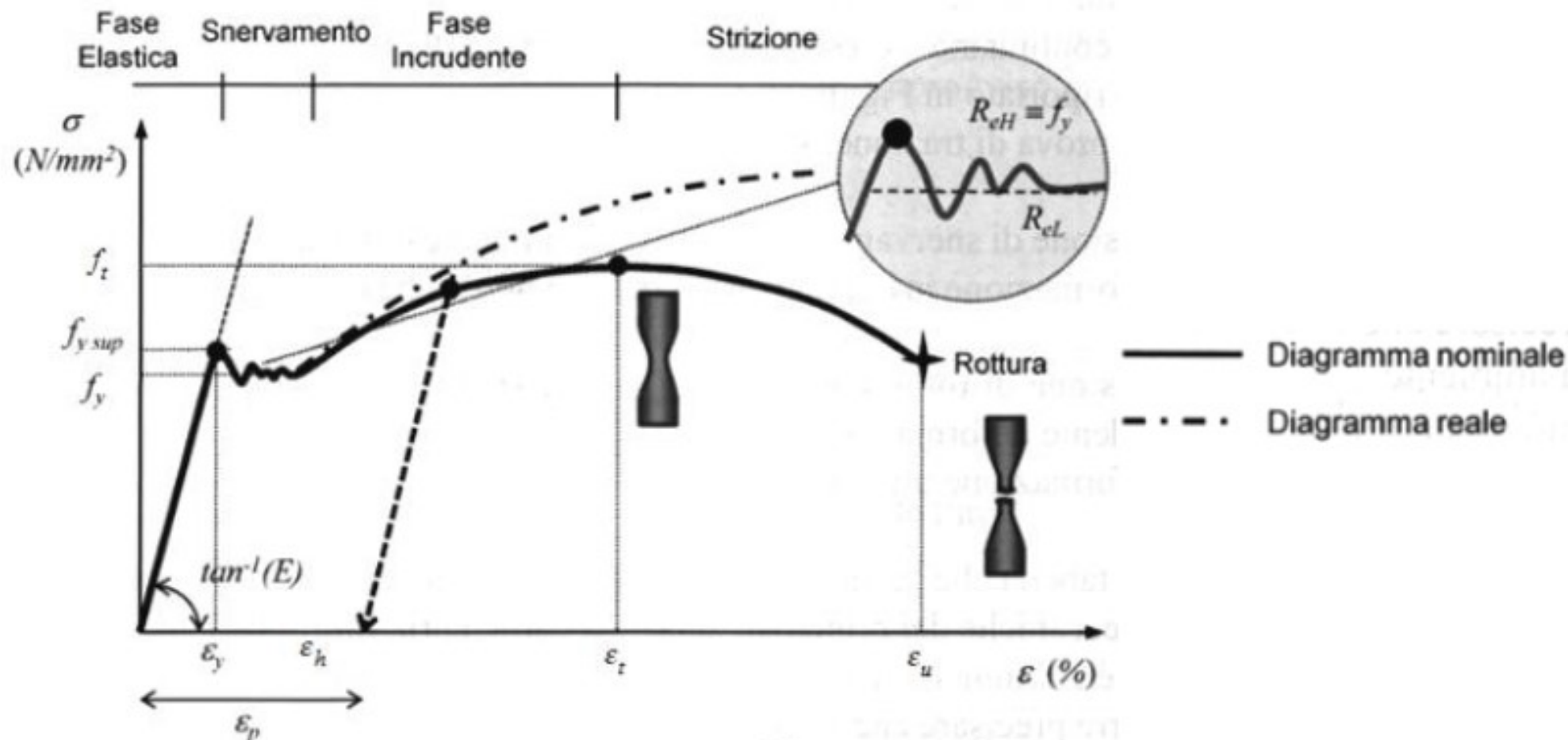
Deformazione



A_0 : Area iniziale del campione testato

ΔL : Allungamento: differenza tra la lunghezza iniziale L_0 e quella attuale L

La tensione di snervamento varia tra 235 e 355 MPa per gli acciai al carbonio unificati, tra 400 e 800 MPa per gli acciai microlegati a elevato limite elastico, tra 350 e 400 MPa per gli acciai bassolegati autopassivanti.



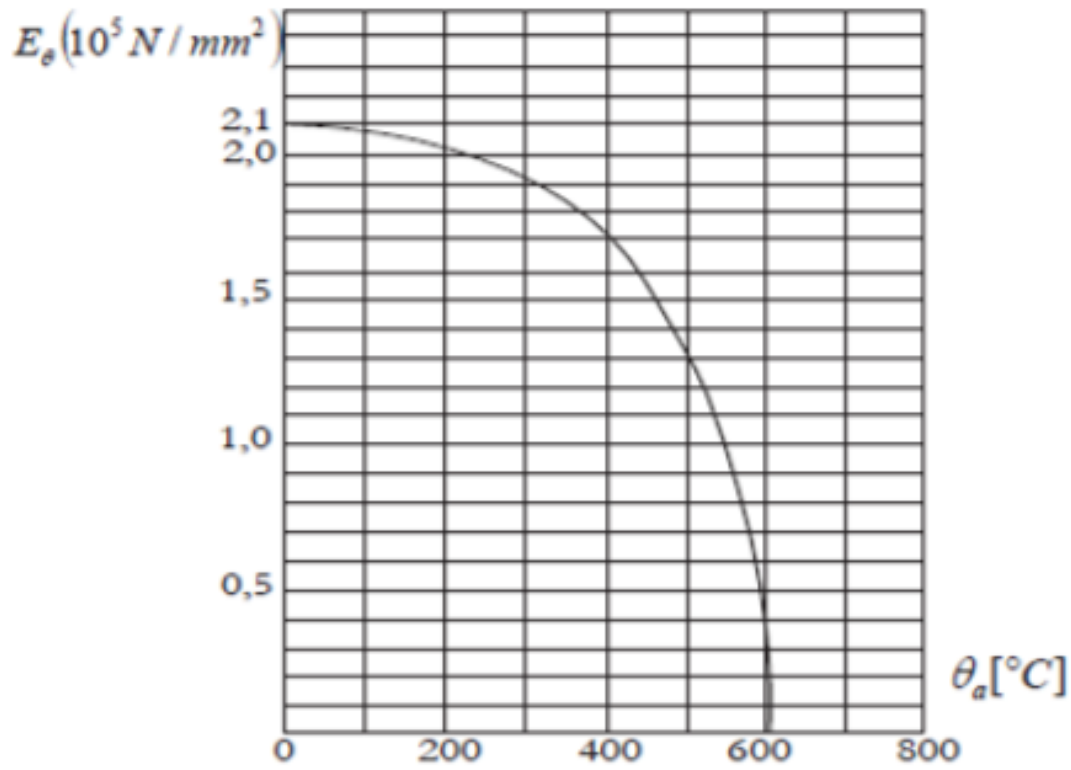
La fase di incrudimento termina quando viene raggiunta la tensione di rottura f_t . La corrispondente deformazione ϵ_t oscilla tra 20 e 25% per gli acciai al carbonio unificati, tra 15 e 20% per gli acciai microlegati a elevato limite elastico, tra 20 e 30% per gli acciai bassolegati protettivi.

In definitiva, dalla prova di trazione si determinano:

- la tensione di snervamento f_y e la corrispondente deformazione ε_y ;
- la deformazione in cui inizia l'incrudimento $\varepsilon_h = 12 \sim 15 \varepsilon_y$;
- la tensione di rottura f_t e la corrispondente deformazione ε_t ;
- la deformazione ultima ε_u .

Nella seguente tabella sono riportati i valori di riferimento delle proprietà meccaniche degli acciai da carpenteria forniti dalla normativa, misurati a temperatura ambiente.

Proprietà	Acciai da carpenteria		
	S235	S275	S355
f_{yk} (N/mm ²)	235	275	355
f_{tk} (N/mm ²)	360	430	510
f_{tk}/f_{yk}	1,53	1,56	1,436
ε_t	24-28	21-24	20-22
E (N/mm ²)	210000	210000	210000



Nella figura a sinistra è riportato l'andamento del modulo elastico E al variare della temperatura

Per $\theta_a > 600$ $^\circ\text{C}$, E_θ non è definito.

Costanti elastiche

Densità	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Coefficiente di Poisson	$\nu = 0.3$
Modulo di elasticità normale	$E = 210000 \text{ MPa}$
Modulo di elasticità tangenziale	$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$
Coefficiente di espansione termica	$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}$



MATERIALE	E [GPa]	σ_r [MPa]		ρ [g/cm ³]	T_f [°C]	ν
Diamante	1.000	750		3,515		0,1
Acciai	190÷215	200÷2.500		7,87	1.530	0,28÷0,3
Ghise	170÷190	100÷700		7,87	1.530	0,28÷0,3
Leghe di nichel	177	480÷750		8,90	1.453	0,34
Leghe di titanio	85÷130	270÷1.450		4,51	1.668	0,36
Leghe di rame (Ottoni)	120÷150	240÷400		8,96	1.083	0,35
Leghe di rame (Bronzi)	100	300÷760		8,96	1.083	0,35
Leghe di alluminio	70÷80	140÷550		2,70	660	0,35
Leghe di magnesio	40÷45	150÷380		1,74	650	0,29
Ceramici	60÷70	trazione	compressione	2,4÷5,8	700÷2.800	0,18÷0,22
		50÷580	560÷3.500			
Plastiche	0,1÷6,0	10÷200		0,9÷2	110÷640	0,33÷0,34
Elastomeri	0,01÷0,1	9÷25			T esercizio	
Resine poliuretatiche, viniliche epossidiche, fenoliche, siliconiche	3,0÷5,0	25÷100			80÷250	
Fibre vetro, carbonio, boro, kevlar	70÷400	2.300÷3.800		1,7÷2,6		0,2÷0,35
Composito resina e fibre	45÷320	1.100÷1.700		1,3÷2		0,25÷0,34
Composito resina e fibre +	1,2÷11	30÷45				
Legno Longitudinale	6÷16	trazione	compressione	0,3÷1	-	0,29 LR
Legno Radiale +	0,5÷1	40÷200	20÷100			-
		3,5÷5				

RIEPILOGO:

$$1) \sigma = \frac{N}{A}$$

Sollecitazione come rapporto tra carico e area della sezione

$$2) \varepsilon = \frac{\delta}{L} \Rightarrow \delta = \varepsilon \cdot L$$

Deformazione come rapporto tra allungamento e lunghezza iniziale

$$3) \sigma = E \cdot \varepsilon$$

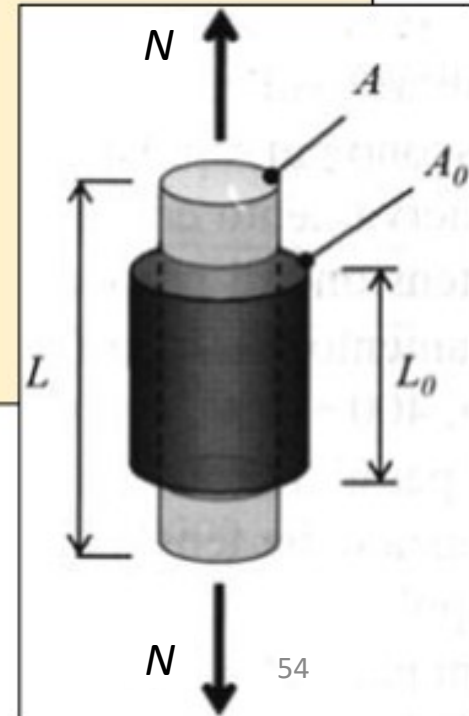
Legge di Hooke (proporzionalità tra sforzi e deformazioni)

Dalla relazione (3) ricaviamo la deformazione
Sostituiamo all'espressione dello sforzo la (1)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{N}{EA}$$

Sostituiamo questa relazione nella (2) ottenendo

$$\delta = \frac{NL}{EA}$$



SFORZO ASSIALE

In un **solido prismatico**, la deformazione in senso assiale non è l'unica conseguenza causata dallo sforzo di trazione, infatti la struttura tende anche a **contrarsi** in direzione trasversale



È dunque possibile calcolare una **deformazione trasversale** definita dal rapporto tra dimensione iniziale e finale della sezione in direzione perpendicolare all'asse longitudinale

$$\epsilon_{tr} = \frac{\delta_{tr}}{L_{tr}}$$

- La deformazione trasversale è proporzionale alla deformazione assiale e ha lo stesso valore in qualunque punto del solido elastico, **a patto che questo sia omogeneo**, cioè possenga uguali proprietà in tutti i suoi punti
- Se, poi, il materiale è anche **isotropo**, cioè possiede proprietà meccaniche indipendenti dalla direzione considerata, il rapporto tra la deformazione trasversale e quella assiale prende il nome di **coefficiente di Poisson**.

$$\nu = \left| \frac{\epsilon_{tr}}{\epsilon_{lo}} \right|$$

Valori tipici del coefficiente di Poisson per metalli sono nell'ordine di 0.25-0.35

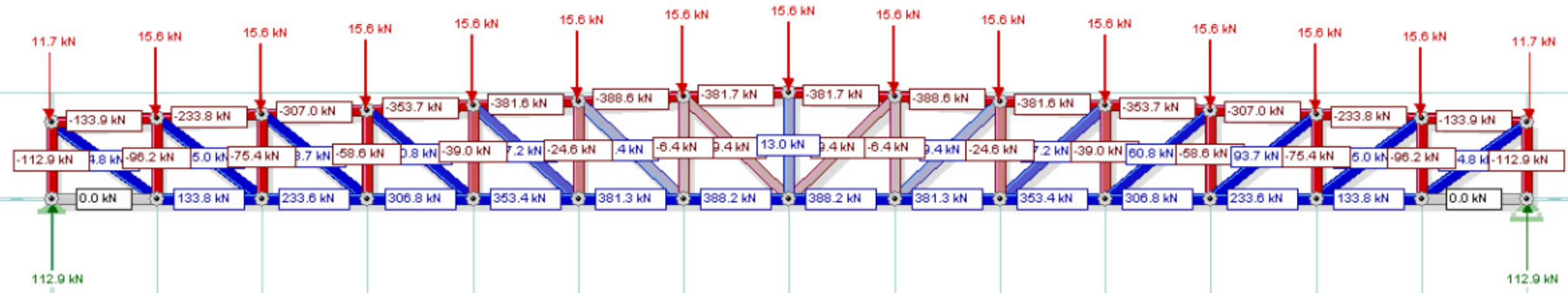
SFORZO ASSIALE

materiale	coefficiente di Poisson	materiale	coefficiente di Poisson
<i>metalli e leghe</i>		<i>altri</i>	
ferro, acciai	0,285-0,290	granito	0,10-0,20
ghisa	0,22-0,30	marmo	0,22-0,33
rame	0,25-0,38	calcestruzzo	0,12-0,16
bronzo	0,31	vetro	0,25
ottone	0,30-0,40		
alluminio	0,34		

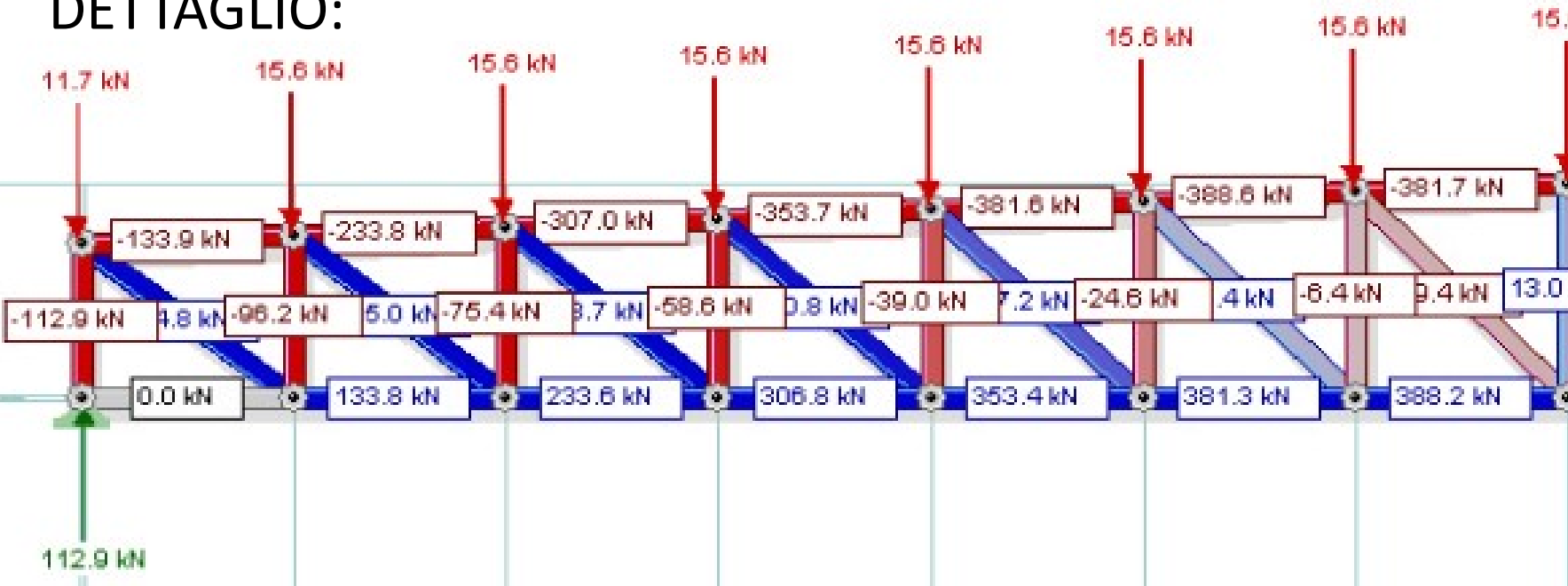
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$



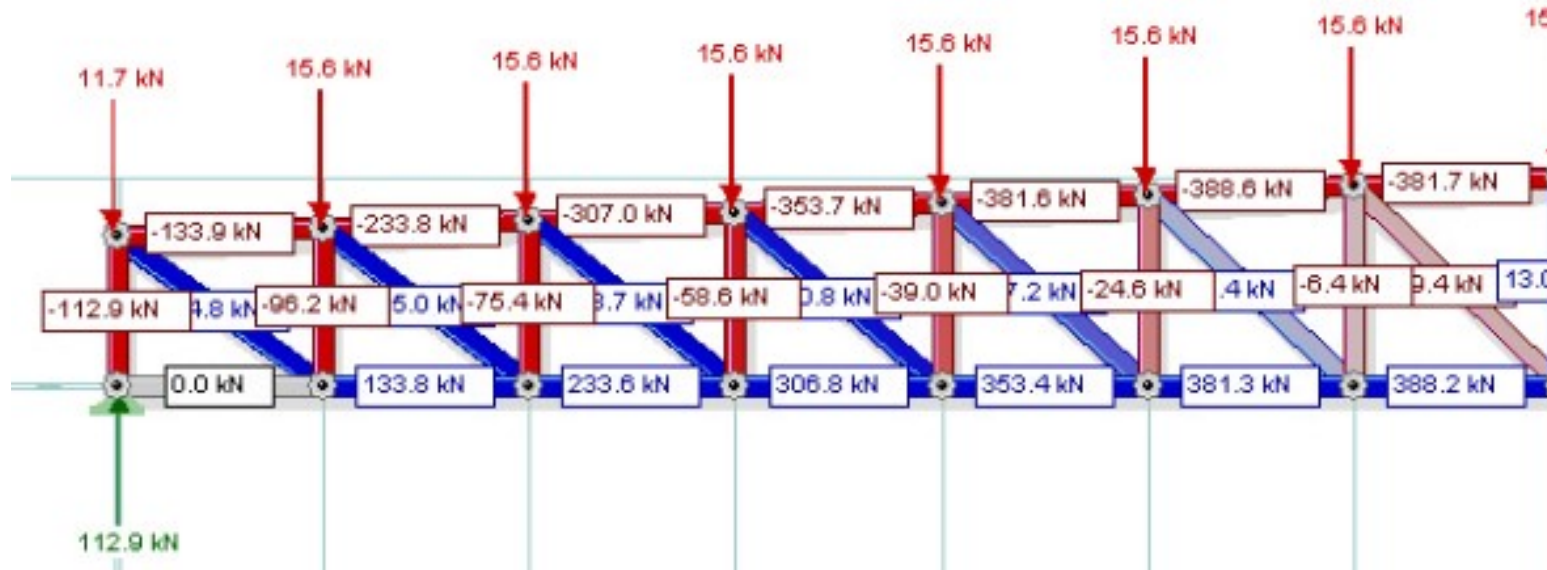
ESEMPIO: CAPRIATA



DETTAGLIO:



Rosso= compressione
Blu= trazione



Il predimensionamento delle aste si esegue in base alle azioni di progetto già calcolate dalla risoluzione dello schema statico assegnato:

$$A_{\min} = N_{\max} / \sigma_y$$

➡ Scelta del profilo

