



**Libreria  
Libri e professioni**  
via S. Brigida, 22  
**Napoli**  
23 | 07 | 2012  
ore 18

# **STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO**

## **ALLA LUCE DELLE NUOVE NORMATIVE ED EVENTI SISMICI**

INCONTRO CON



Dario Flaccovio Editore

il prof. **FEDERICO M. MAZZOLANI** e l'ing. **VINCENZO NUNZIATA**

**VINCENZO NUNZIATA**

# Il cemento armato ?

“Le costruzioni in cemento armato sono tutte quelle in cui i due materiali, ferro e conglomerato di cemento, risultano uniti in modo da poter opporre insieme una resistenza statica contro le forze esterne”. Così definiva il cemento armato il professore Emile Mörsh nel 1902 nella sua opera magistrale *Der Eisenbetonbau*, la prima a trattare in modo organico la teoria classica del cemento armato con il cosiddetto “metodo  $n$ ” o “metodo delle tensioni ammissibili”<sup>1</sup>.

<sup>2</sup> Secondo **Pier Luigi Nervi**, il cemento armato è “il più bel sistema costruttivo che l’umanità abbia saputo trovare fino ad oggi” ma nonostante questo asseriva che “la possibilità di conoscenza e dominio di un così aggrovigliato complesso di fenomeni ..... è assolutamente negativa”

“il reale ed effettivo funzionamento di una struttura iperstatica dipende da tanti e così mutevoli condizioni e circostanze esecutive, da essere a priori assolutamente indeterminato ed indeterminabile”.

# La storia

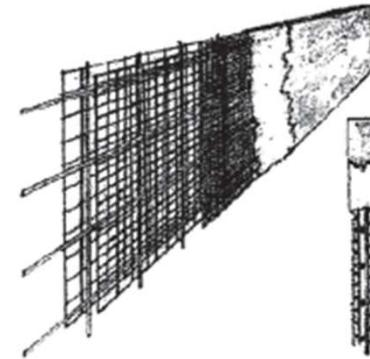
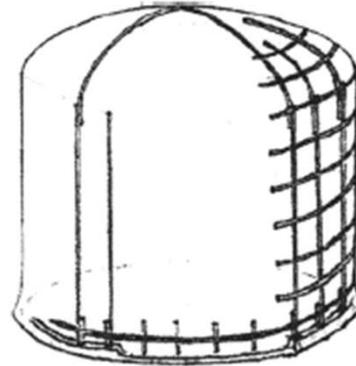
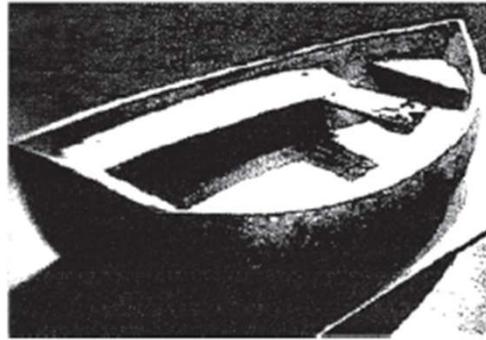


Figura 1.4. Oggetti ideati da J.L. Lambot

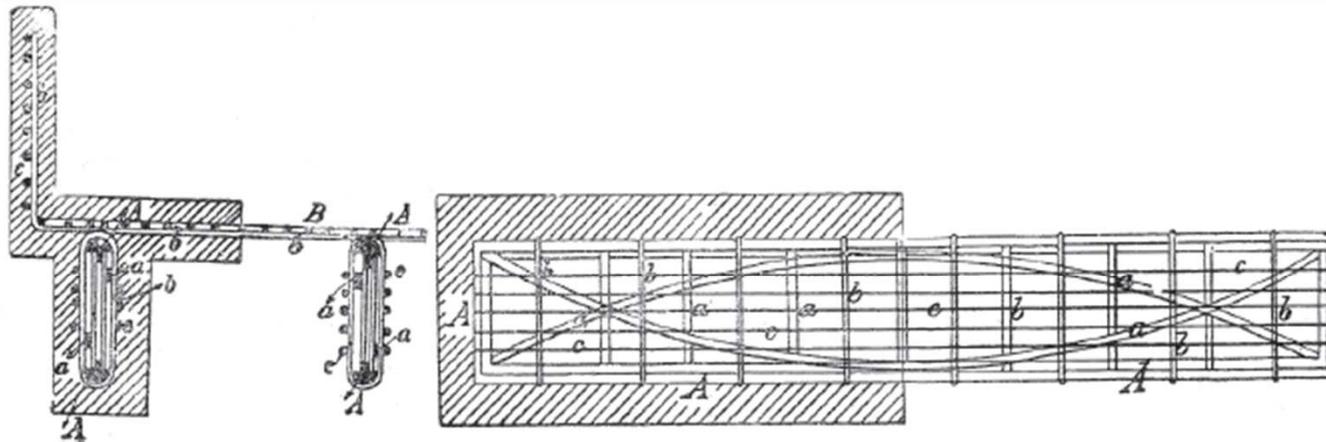
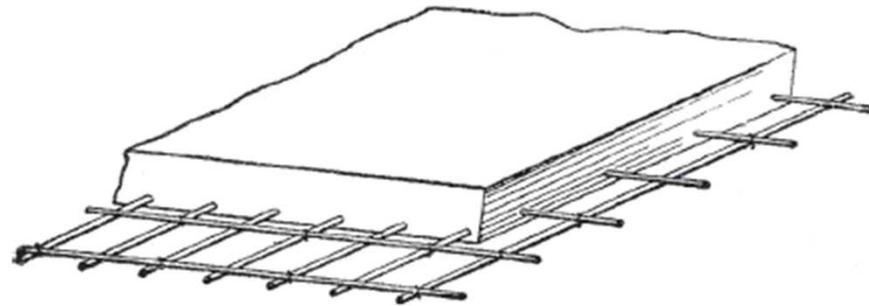
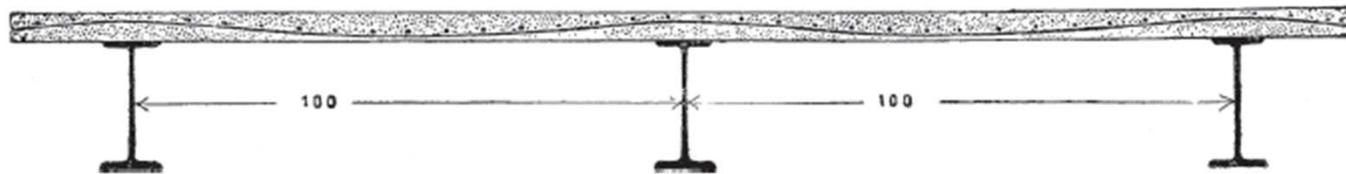


Figura 1.5. Disegni del brevetto Monier per travi in c.a., anno 1878

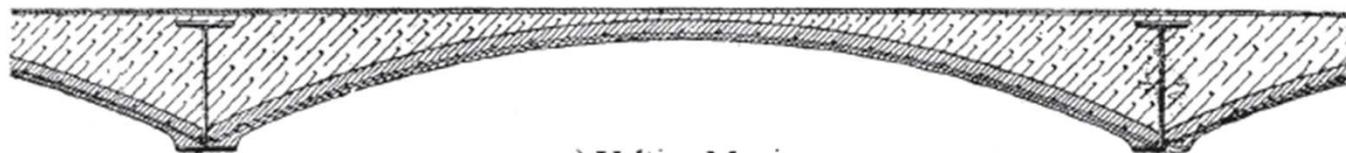
# La storia



a) Lastra Monier



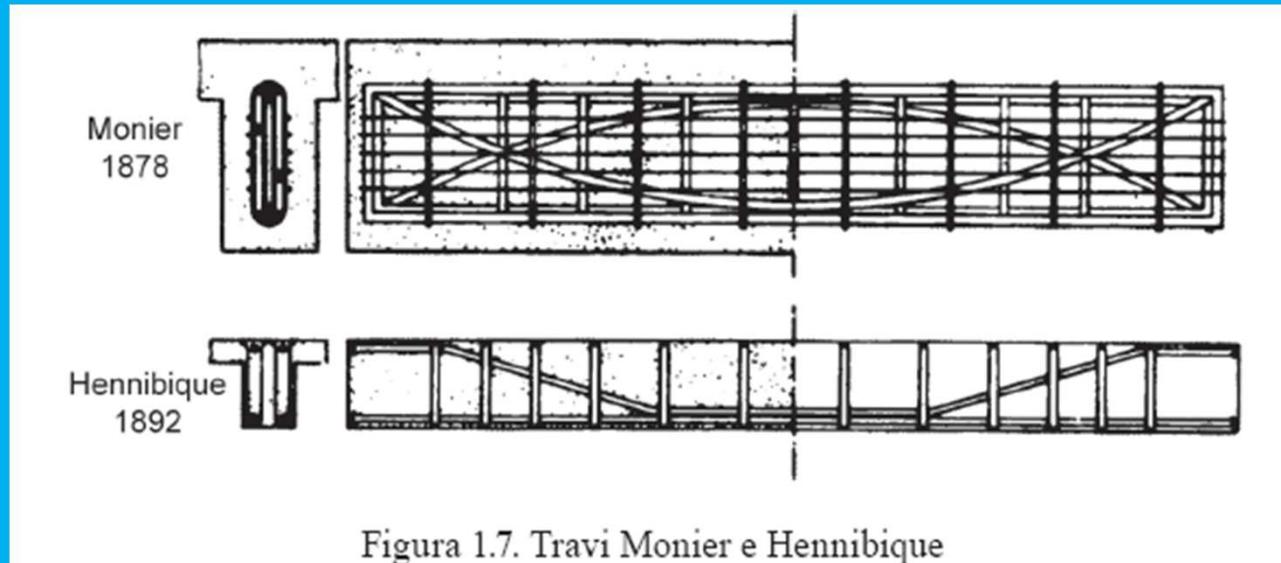
b) Lastra Monier continua su travi a I



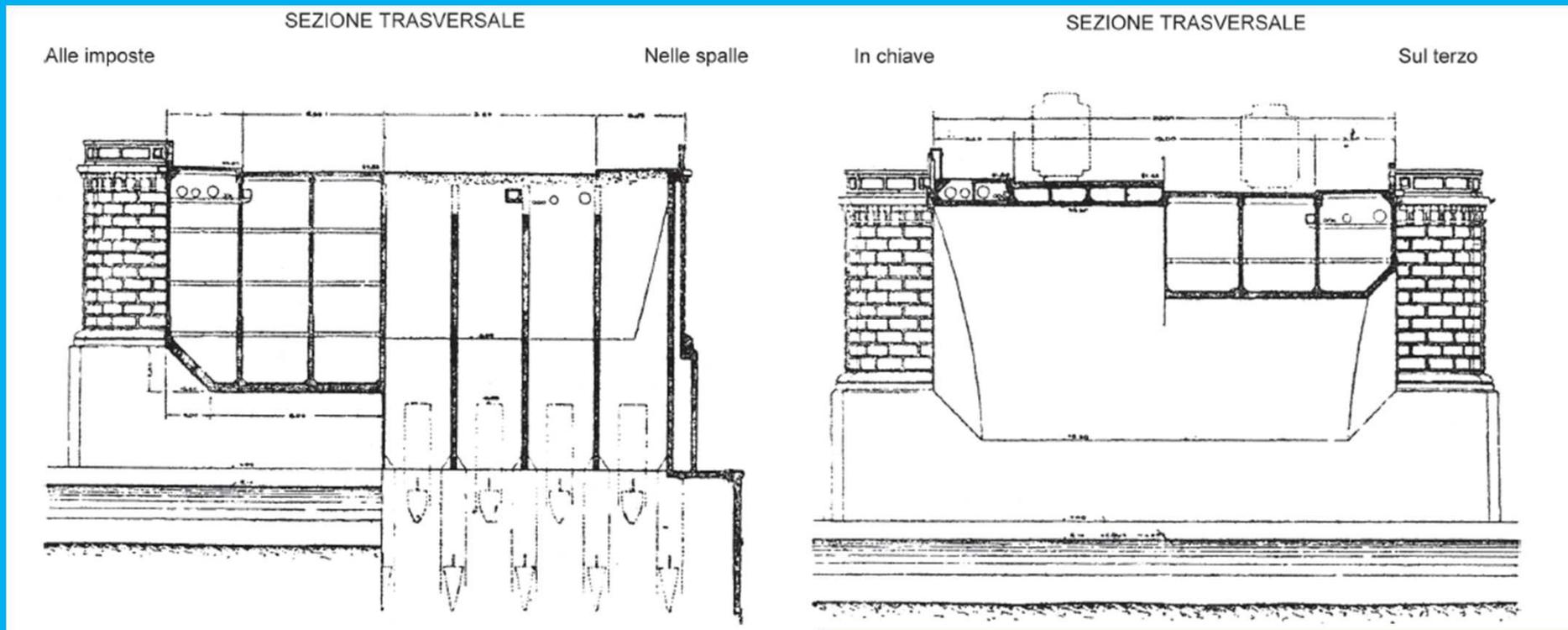
c) Voltine Monier

Figura 1.6. Elementi strutturali brevettati da J. Monier

# La storia



# La storia



Sezioni Ponte Risorgimento - Roma

# I materiali

Calcestruzzo = {  
Pasta di cemento: cemento + acqua  
+  
Aggregati: sabbia + ghiaia o pietrisco

Cemento	3,5 kN
Sabbia <sup>6</sup>	0,4 m <sup>3</sup> $\approx$ 5,5 kN
Ghiaia	0,8 m <sup>3</sup> $\approx$ 14,50 kN
Acqua	1,8 kN

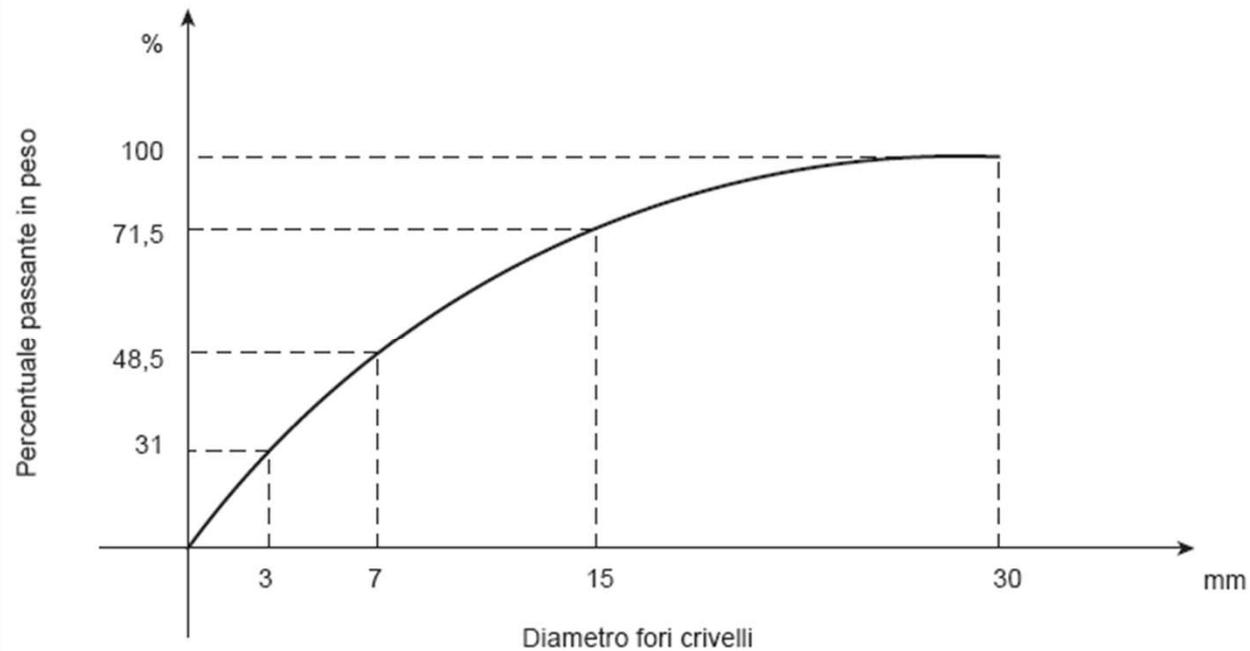
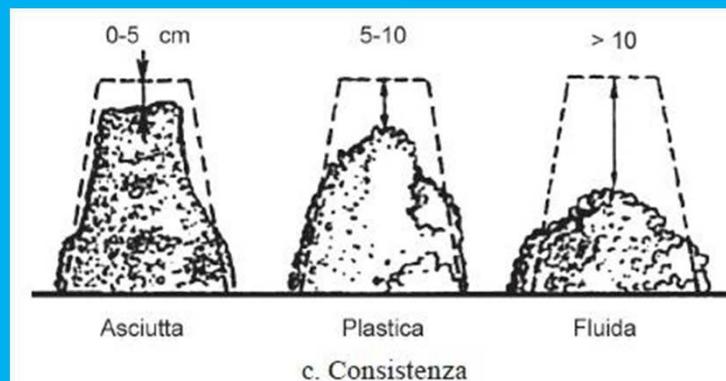
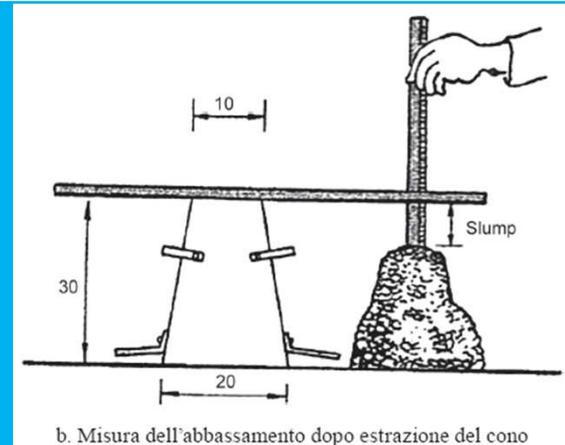


Figura 2.1. Curva di Fuller per  $D \leq 30$  mm

# I materiali

Tabella 2.4. Classe di consistenza mediante le misure dell'abbassamento al cono (UNI EN 206-1)

Classe di consistenza	Abbassamento (slump) (mm)	Denominazione corrente
S1	da 10 a 40	Umida
S2	da 50 a 90	Plastica
S3	da 100 a 150	Semifluida
S4	da 160 a 210	Fluida
S5	> 210	Superfluida



# I materiali

## La Durabilità

Tabella 2.9. Classi di esposizione ambientale

Caratteristiche dell'ambiente			Caratteristiche delle miscele									
			Linee guida (Consiglio superiore dei LL.PP. Servizio Tecnico Centrale)			UNI 11104 marzo 2004			UNI EN 206-1			
Nessun rischio di corrosione delle armature o di attacco chimico			Max rap. a/c	$R_{ck}$ Min (N/mm <sup>2</sup> )	Contenuto minimo di cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Max rap. a/c	$R_{ck}$ Min (N/mm <sup>2</sup> )	Contenuto minimo di cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Max rap. a/c	$R_{ck}$ Min (N/mm <sup>2</sup> )	Contenuto minimo di cemento (kg/m <sup>3</sup> )	D (mm)
X0	Molto secco	Edifici interni a umidità molto bassa (<45%)	-	-	-	-	15	-	-	12-15	-	15
<b>Corrosione delle armature indotta da carbonatazione del calcestruzzo</b>												
XC1	Secco	Interni di edifici a bassa umidità relativa	0,60	30	280	0,60	30	300	0,65	20-25	260	20
XC2	Bagnato, raramente secco	Parti di struttura di contenimenti o liquidi; fondazioni	0,60	30	280	0,60	3	300	0,60	25-30	280	20
XC3	Umidità moderata	Edifici con interni a umidità relativa da moderata ad alta; calcestruzzo esterno riparato dalla pioggia	0,55	37	300	0,55	35	320	0,55	30-37	280	30
XC4	Ciclicamente secco e bagnato	Superfici a contatto con acqua non comprese nelle classi XC2	0,50	37-40	320	0,50	40	340	0,50	30-37	300	30
<b>Corrosione delle armature indotta da cloruri</b>												
XD1	Umidità moderata	Superfici esposte a spruzzi diretti d'acqua contenenti cloruri	0,55	37	300	0,55	35	320	0,55	30-37	300*	30
XD2	Bagnato, raramente secco	Piscine: calcestruzzo esposto ad acque	0,50	37-40	320	0,50	40	340	0,55	30-37	300	30

$R_{ckmin}=30$

# I materiali

Tabella 2.13. Caratteristiche dei tipi d'acciaio per c.a.

Caratteristiche		B450C	B450A
Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$		$f_{yknom} \geq 450 \text{ N/mm}^2$	$f_{yknom} \geq 450 \text{ N/mm}^2$
Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$		$f_{tknom} \geq 540 \text{ N/mm}^2$	$f_{tknom} \geq 540 \text{ N/mm}^2$
$(f/f_y)_k$		$\geq 1,15$ $< 1,35$	$\geq 1,05$
$(f_y/f_{ynom})_k$		$\leq 1,25$	$\leq 1,25$
Allungamento $(A_{g^k})_k$		$\geq 7,5\%$	$\geq 2,5\%$
Diametro del mandrino per prove di carico di piegamento a 90° e successivo raddrizzamento senza cricche	$\varnothing \leq 12 \text{ mm}$ ( $\varnothing \leq 10 \text{ mm}$ )	4 $\varnothing$	(4 $\varnothing$ )
	$12 \leq \varnothing \leq 16 \text{ mm}$	5 $\varnothing$	
	$16 < \varnothing \leq 25 \text{ mm}$	8 $\varnothing$	
	$25 < \varnothing \leq 40 \text{ mm}$	10 $\varnothing$	

# Gli Stati Limite

Tabella 3.1. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente $\gamma_F$	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	Favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9	1	1
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali	Favorevoli	$\gamma_{G2}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	Favorevoli	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad esempio, carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni.

Nelle verifiche nei confronti degli stati limite strutturali<sup>6</sup>, STR, si adotteranno combinazioni del tipo (combinazione fondamentale):

$$F_d = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + P + \gamma_Q \cdot Q_{k1} + \gamma_Q \cdot \sum_{j=2}^n \psi_{0,j} \cdot Q_{k,j}$$

*Caratteristica*

$$F_d = G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \psi_{0,j} \cdot Q_{k,j}$$

*Frequente*

$$F_d = G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{j=1}^n \psi_{2,j} \cdot Q_{k,j}$$

*Quasi permanente*

$$F_d = G_1 + G_2 + P + \sum_{j=1}^n \psi_{2,j} \cdot Q_{k,j}$$

# Gli Stati Limite

## 3.5.2. Analisi della struttura

L'analisi globale della struttura in c.a., volta alla valutazione degli effetti delle azioni agenti, potrà essere condotta con i metodi di seguito descritti.

La determinazione delle sollecitazioni può effettuarsi a mezzo di:

- analisi elastica lineare;
- analisi plastica;
- analisi non lineare.

### RESISTENZA DI CALCOLO A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO

Per il calcestruzzo la resistenza di calcolo a compressione  $f_{cd}$  sarà data da:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c / \alpha_{cc}} = \frac{0,83 R_{ck}}{\gamma_c / \alpha_{cc}}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5/0,85} \cong 0,56 f_{ck} \cong 0,47 R_{ck}$$

### RESISTENZA DI CALCOLO DELL'ACCIAIO

La resistenza di calcolo dell'acciaio  $f_{yd}$  è data da:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

dove

$\gamma_s = 1,15$  è il coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio  
 $f_{yk}$  è la tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio.

# Gli Stati Limite

## 3.7.1.1. Diagrammi di calcolo tensioni-deformazioni del calcestruzzo

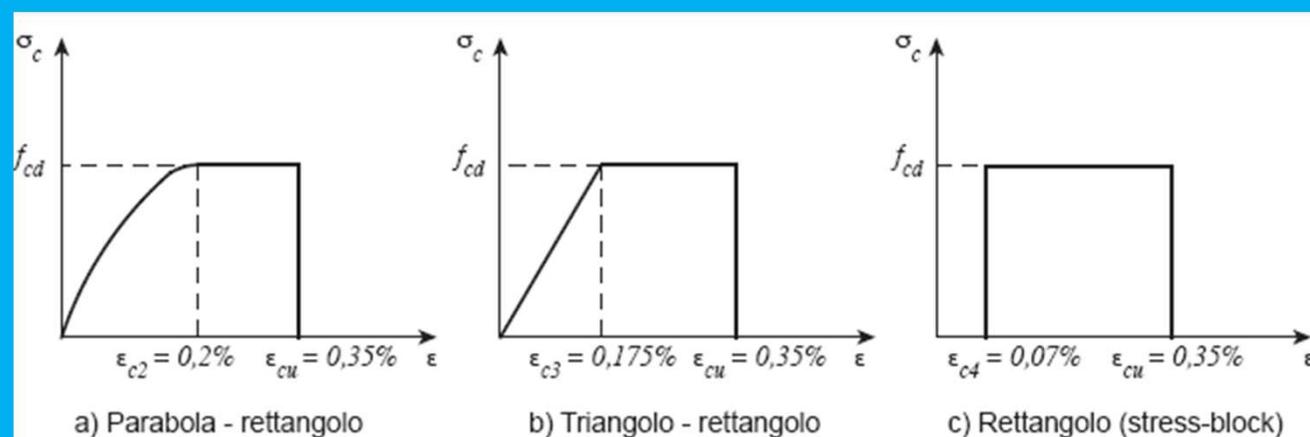


Figura 3.1. Modelli  $\sigma - \epsilon$  per il calcestruzzo

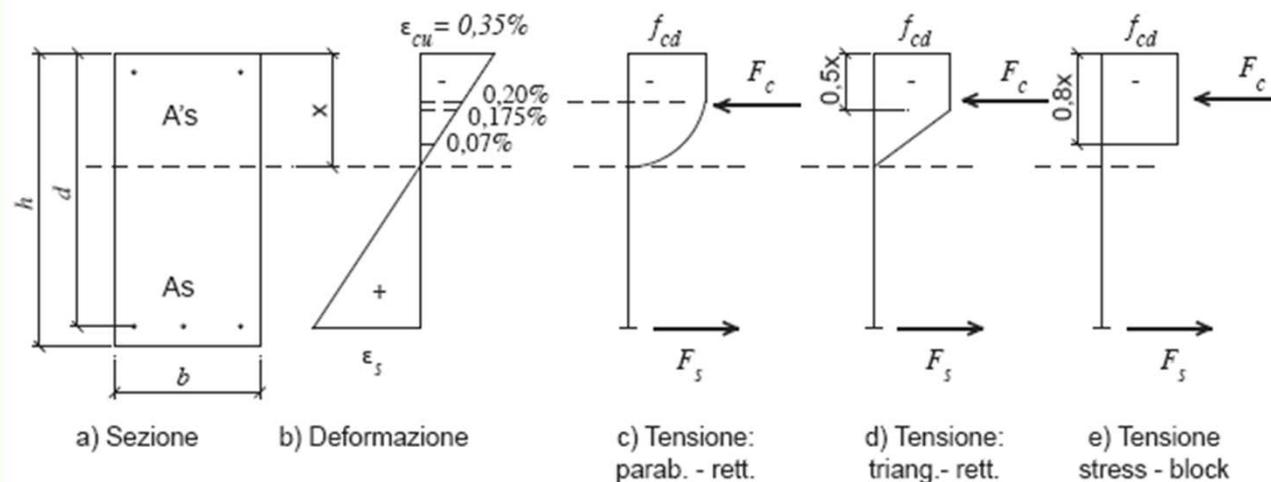
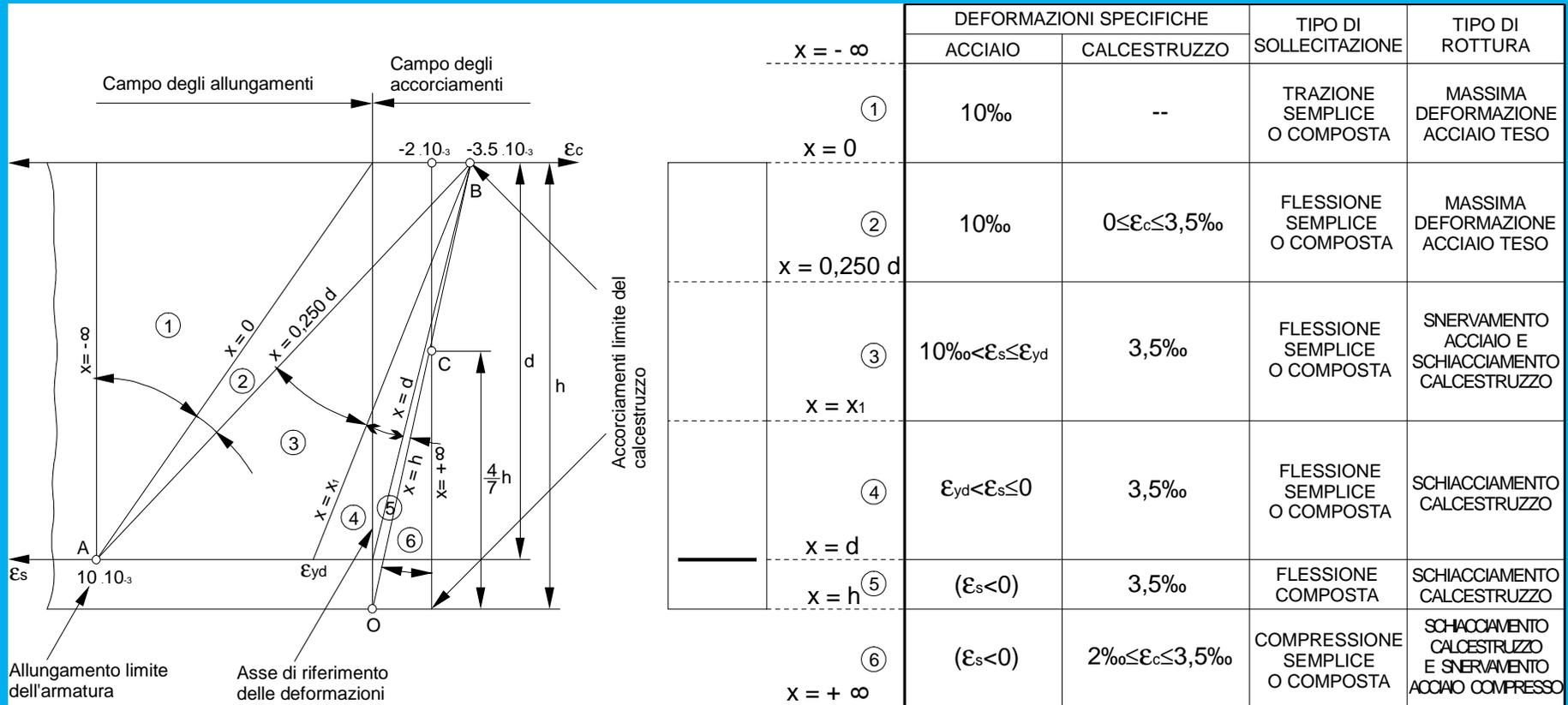


Figura 3.2. Tensioni e deformazioni limite

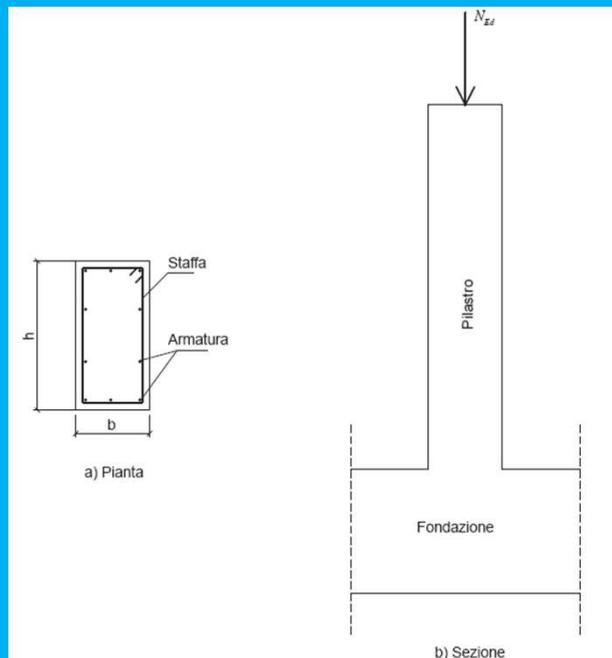
# La Statica

Un tempo c'era il diagramma di stato....



# La Statica

## 4. SFORZO NORMALE



### VERIFICA

Lo sforzo normale massimo che può sostenere un pilastro di cui sono note le dimensioni geometriche e le armature è:

$$N_{Rd} = 0,8 \cdot f_{cd} \cdot A_c + f_{yd} \cdot A_s$$

posto:

$f_c^* = 0,8 \cdot f_{cd} \cong 0,37 R_{ck}$  tensione limite ridotta per il calcestruzzo a compressione

$$n' = f_{yd} / f_c^*$$

Si ha:

$$N_{Rd} = f_c^* \cdot \left( A_c + \frac{f_{yd} \cdot A_s}{f_c^*} \right) = f_c^* \cdot (A_c + n' \cdot A_s) = f_c^* \cdot A_{c,id}$$

### PROGETTO

Conoscendo lo sforzo normale di calcolo  $N_{Ed}$  e volendo ricavare le incognite  $A_c$  ed  $A_s$ , si potrebbe fissarne una e ricavare l'altra.

È preferibile fissare il rapporto  $\alpha$ , si ha allora: formula 4,7

$$N_{Ed} = f_c^* \cdot (A_c + n' \cdot \alpha \cdot A_c)$$

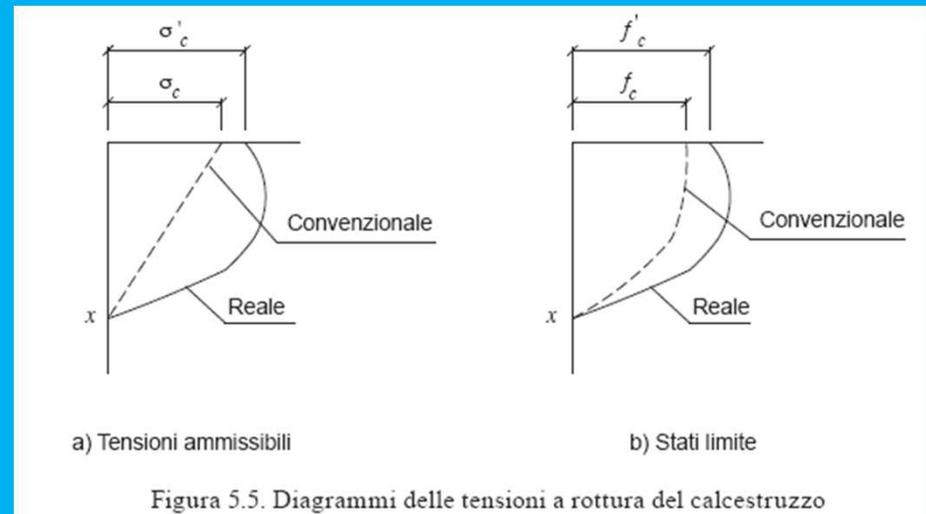
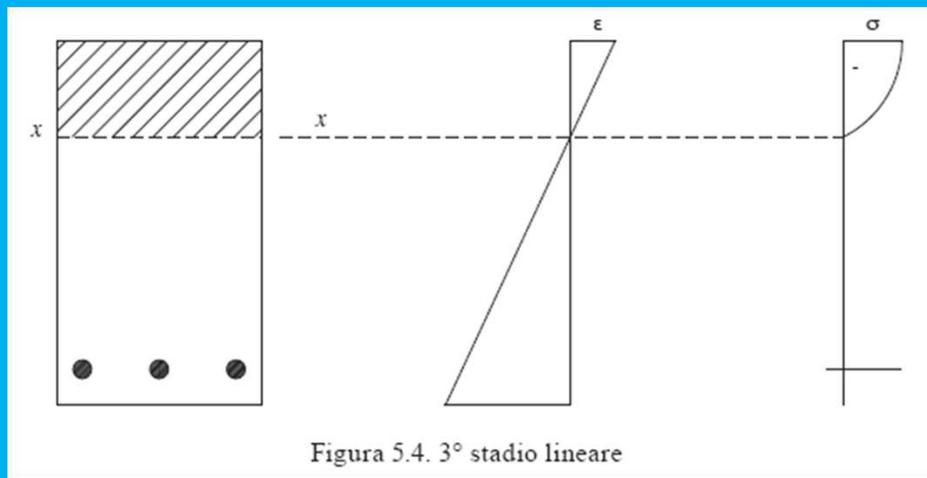
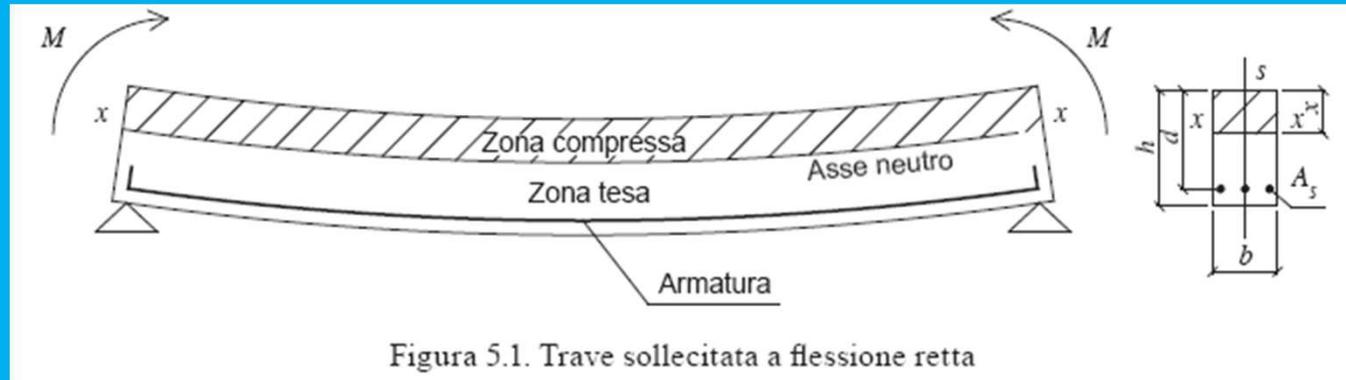
da cui

$$A_c = \frac{N_{Ed}}{f_c^* \cdot (1 + n' \cdot \alpha)}$$

$$A_s = \alpha \cdot A_c$$

# La Statica

## 5. LA FLESSIONE RETTA



# La Statica

## La Duttività

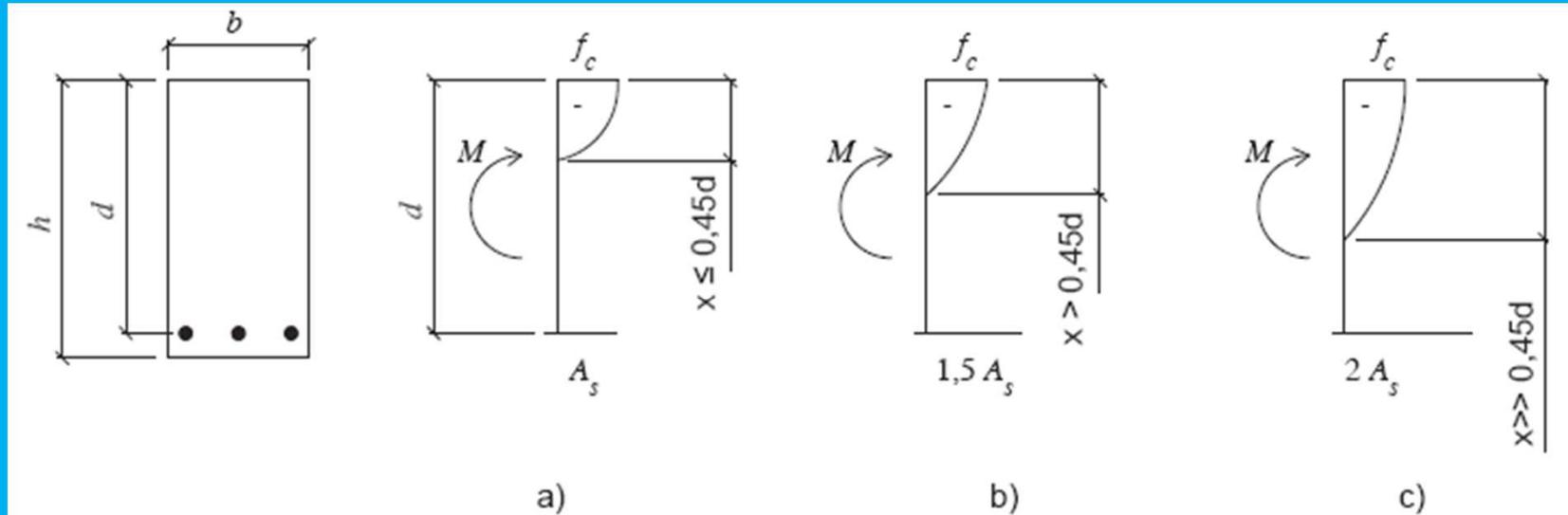
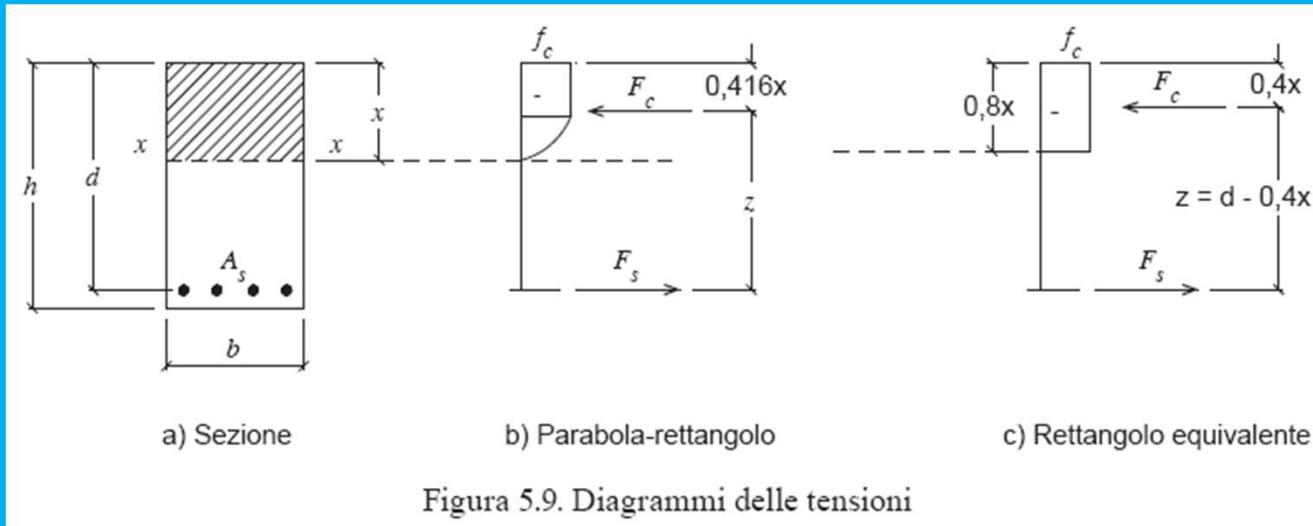


Figura 5.7. Sezione rettangolare a semplice armatura: verifiche di duttilità

# La Statica

## 5.2. Sezione rettangolare con armatura semplice. Calcolo di verifica



$$M \leq M_r$$

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s}{0,8 \cdot f_{cd} \cdot b}$$

### DETERMINAZIONE DELLE FORZE INTERNE

$$F_c = 0,8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s$$

### DETERMINAZIONE DEL MOMENTO RESISTENTE

$$M_r = F_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) \text{ ovvero } M_r = F_s \cdot (d - 0,4 \cdot x)$$

# La Statica

## 5.3. Sezione rettangolare con armatura semplice. Calcolo di progetto

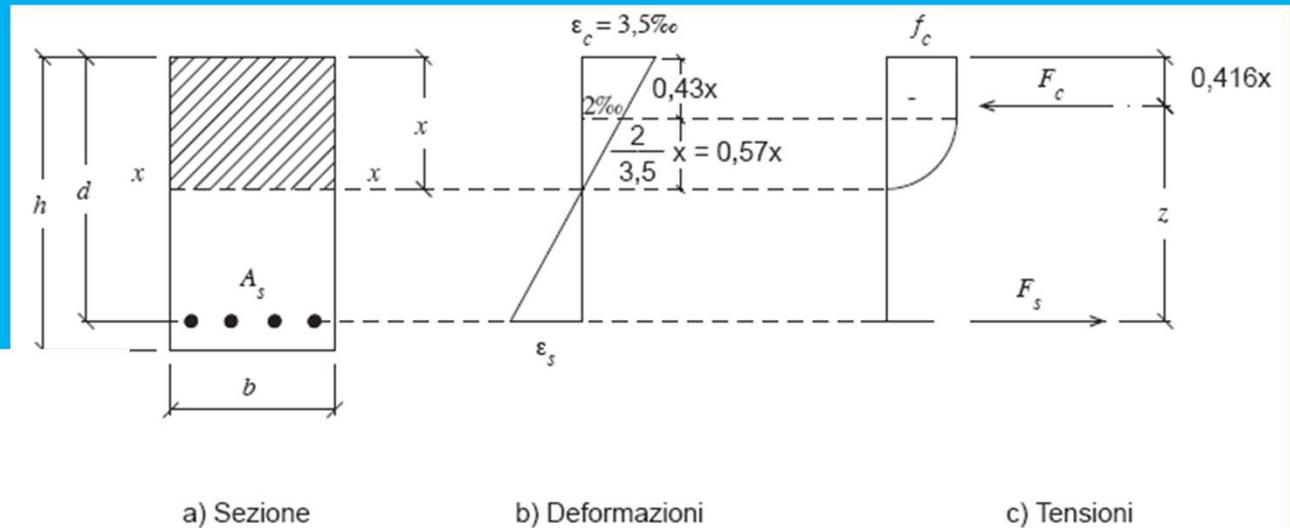


Figura 5.8. Stato limite ultimo della sezione

Dalla figura 5.8b si può scrivere:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d-x}$$

$$\varepsilon_c \cdot d - \varepsilon_c \cdot x = \varepsilon_s \cdot x$$

$$\varepsilon_c \cdot d = x \cdot (\varepsilon_c + \varepsilon_s)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \cdot d$$

posto  $\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} = K$  si ha:

$$x = K \cdot d$$

$$K = 0,25$$

$$0,8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot (d - 0,4 \cdot x) = M$$

$$f_{yd} \cdot A_s \cdot (d - 0,4 \cdot x) = M$$

$$d = r \cdot \sqrt{\frac{M}{b}}$$

Tabella 5.2. Coefficiente r

$R_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	r
25	0,688
30	0,628
35	0,581
40	0,544

$$A_s = \frac{M}{0,9 \cdot d \cdot f_{yd}}$$

# La Statica

## 6. LA FLESSIONE DEVIATA

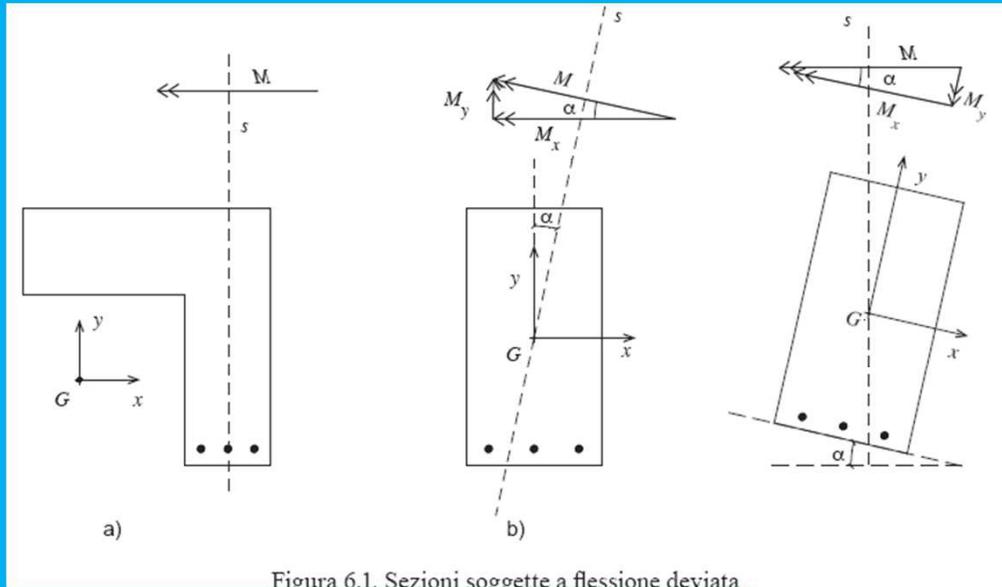


Figura 6.1. Sezioni soggette a flessione deviata

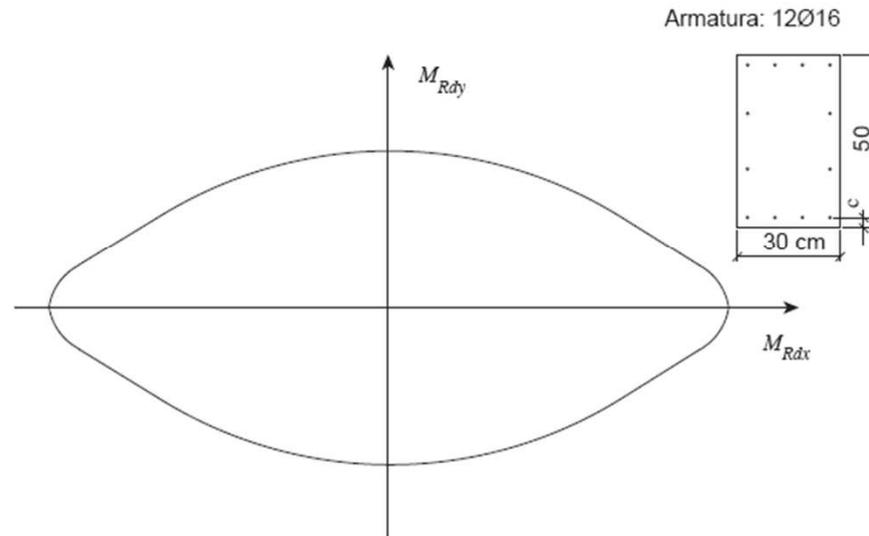


Figura 6.7. Dominio di resistenza di una sezione in c.a. soggetta a flessione deviata

# La Statica

## 6.1.2. Metodo semplificato

### IL PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE DELLE SOLLECITAZIONI

*“qualunque sia la sezione resistente, se essa è idonea a sopportare le sollecitazioni componenti è anche idonea a sopportare la sollecitazione somma”.*

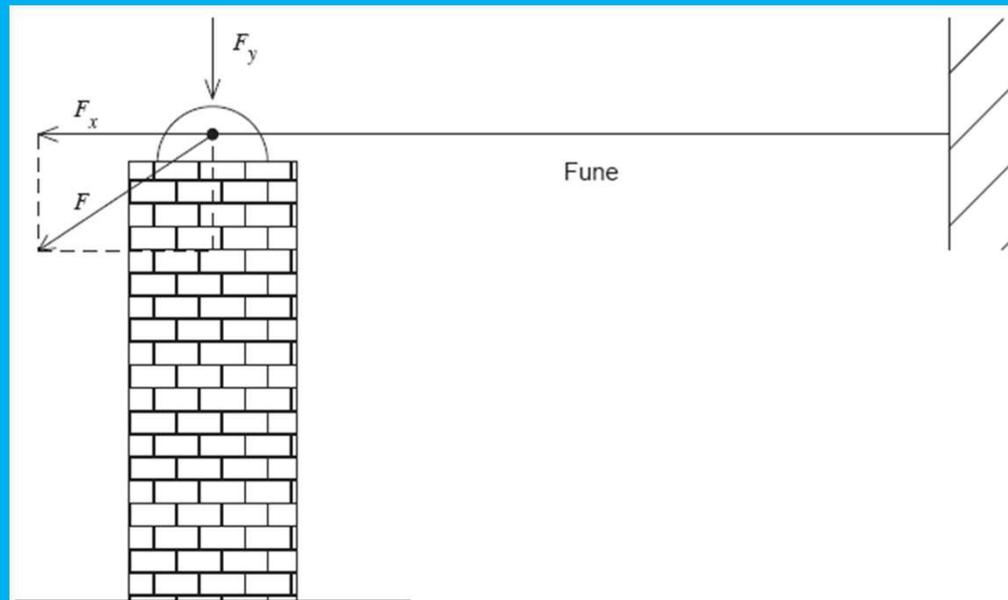


Figura 6.8. Principio di sovrapposizione delle sollecitazioni: dimostrazione

NTC 08 – 4.1.2.1.2.4

$$\left( \frac{M_{Ey d}}{M_{Ry d}} \right)^{\alpha} + \left( \frac{M_{Ez d}}{M_{Rz d}} \right)^{\alpha} \leq 1$$

# La Statica

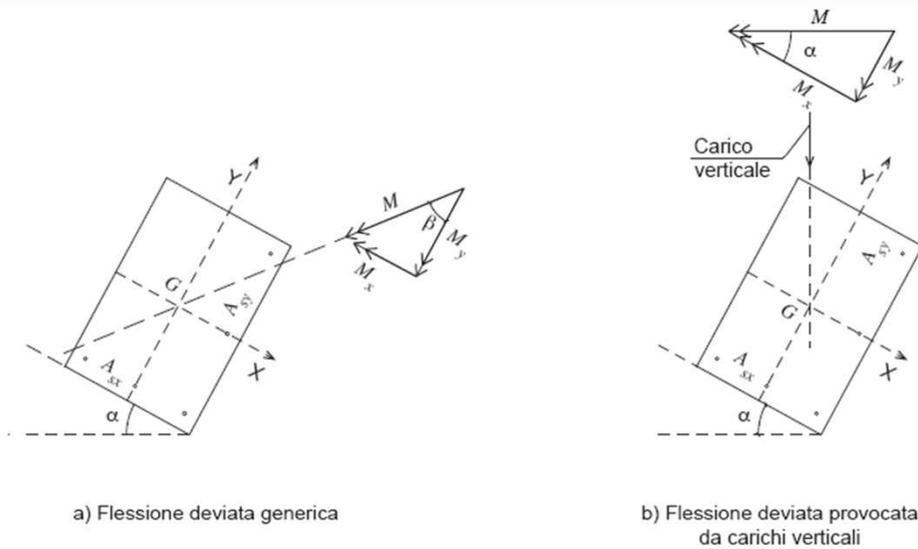


Figura 6.9. Flessione deviata: scomposizione in due flessioni semplici

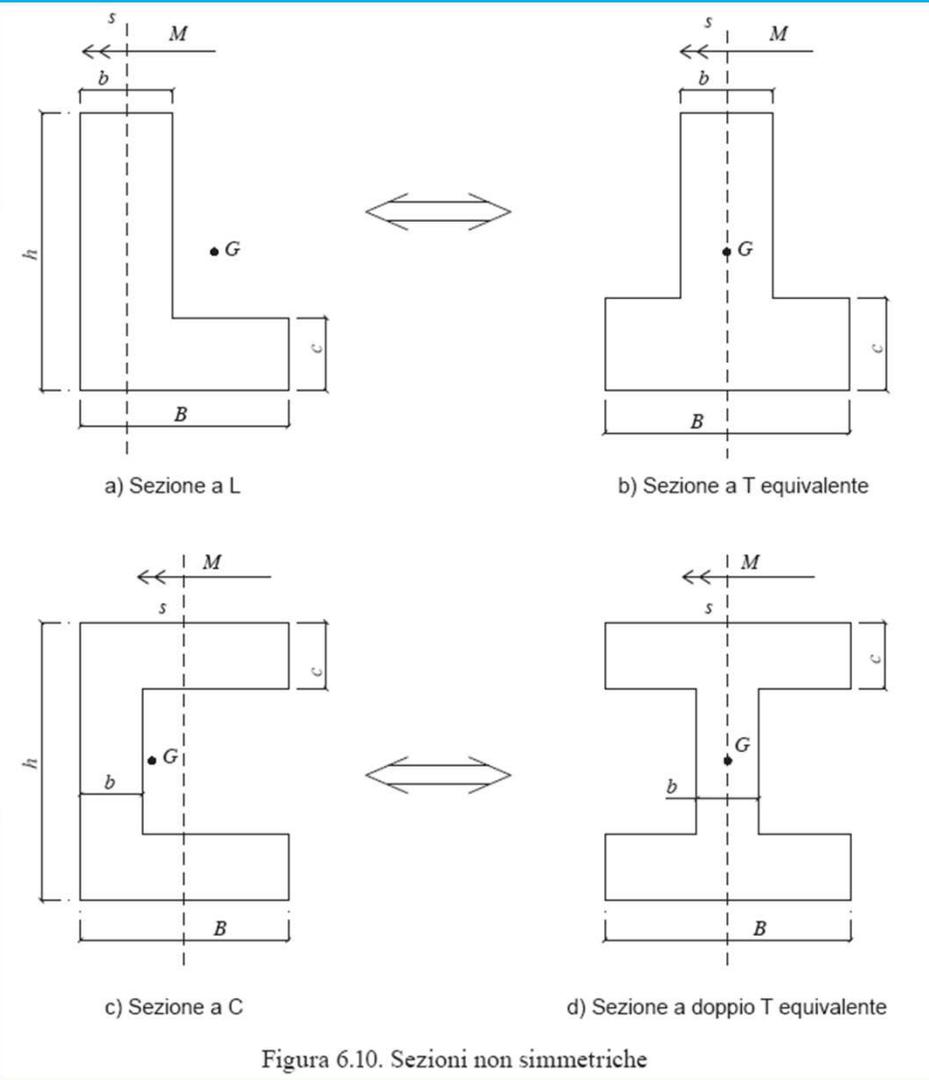


Figura 6.10. Sezioni non simmetriche

# La Statica

## 7. IL TAGLIO

### Esperimenti di Morsch

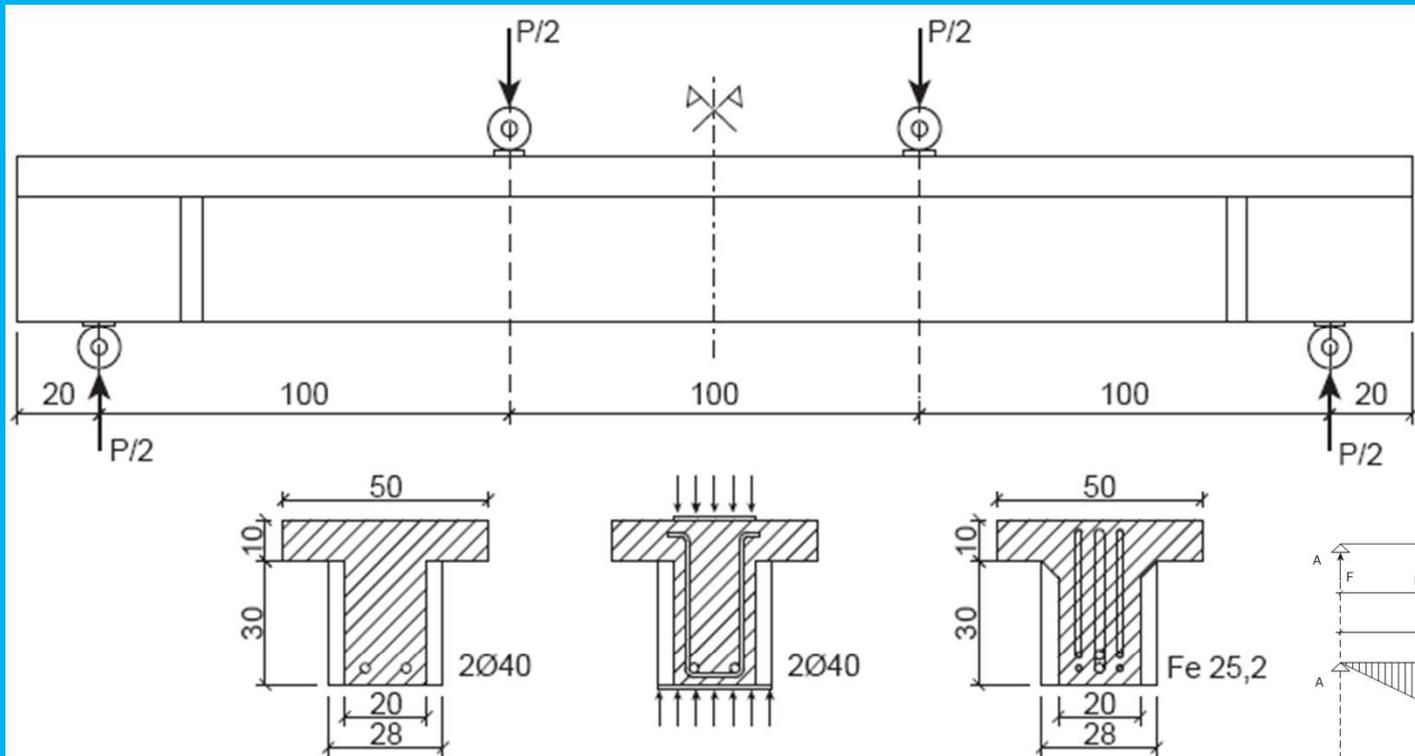


Figura 7.2. Sezioni analizzate e carichi

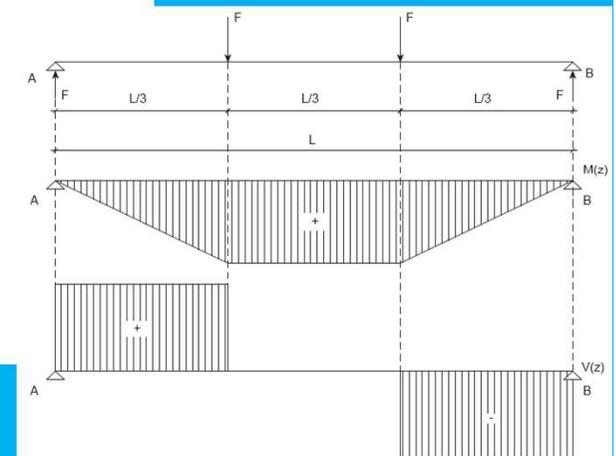
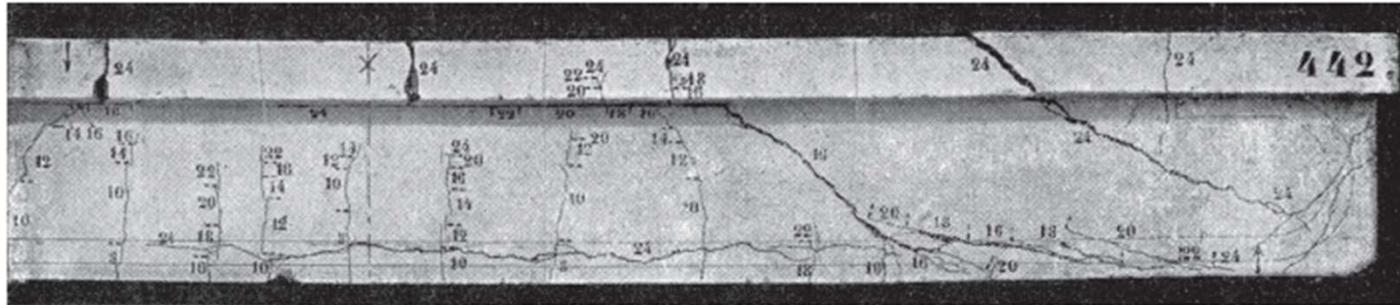
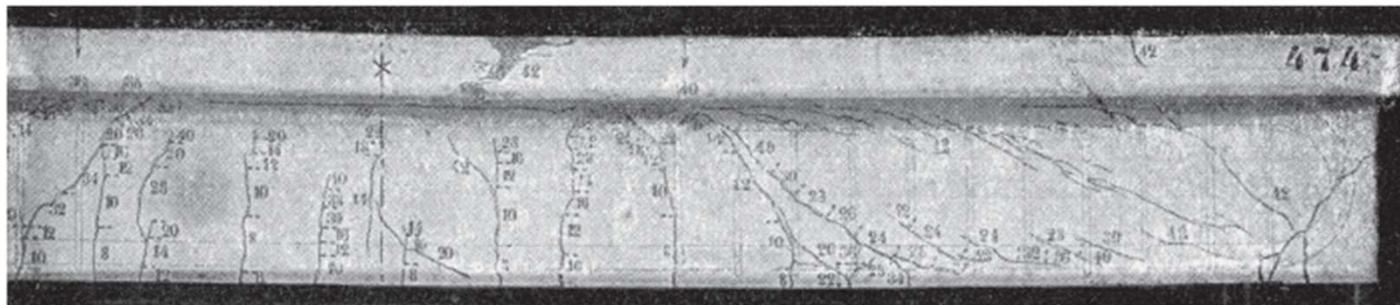


Figura 7.4. Diagrammi di sollecitazioni

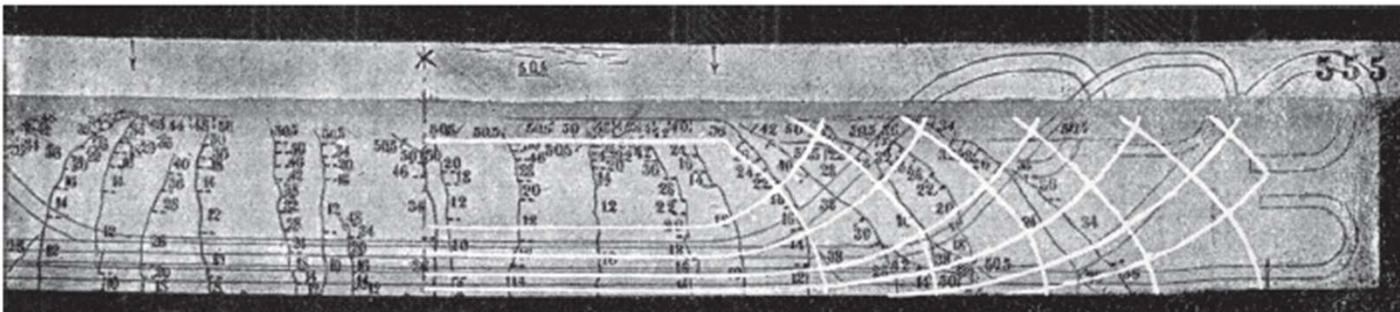
# La Statica



a. Ferri dritti, carico max 24 t



b. Ferri dritti con staffe, carico max 42 t



c. Ferri dritti con ferri piegati, carico max 50,5 t

Figura 7.3. Quadro fessurativo e carichi di rottura

# La Statica

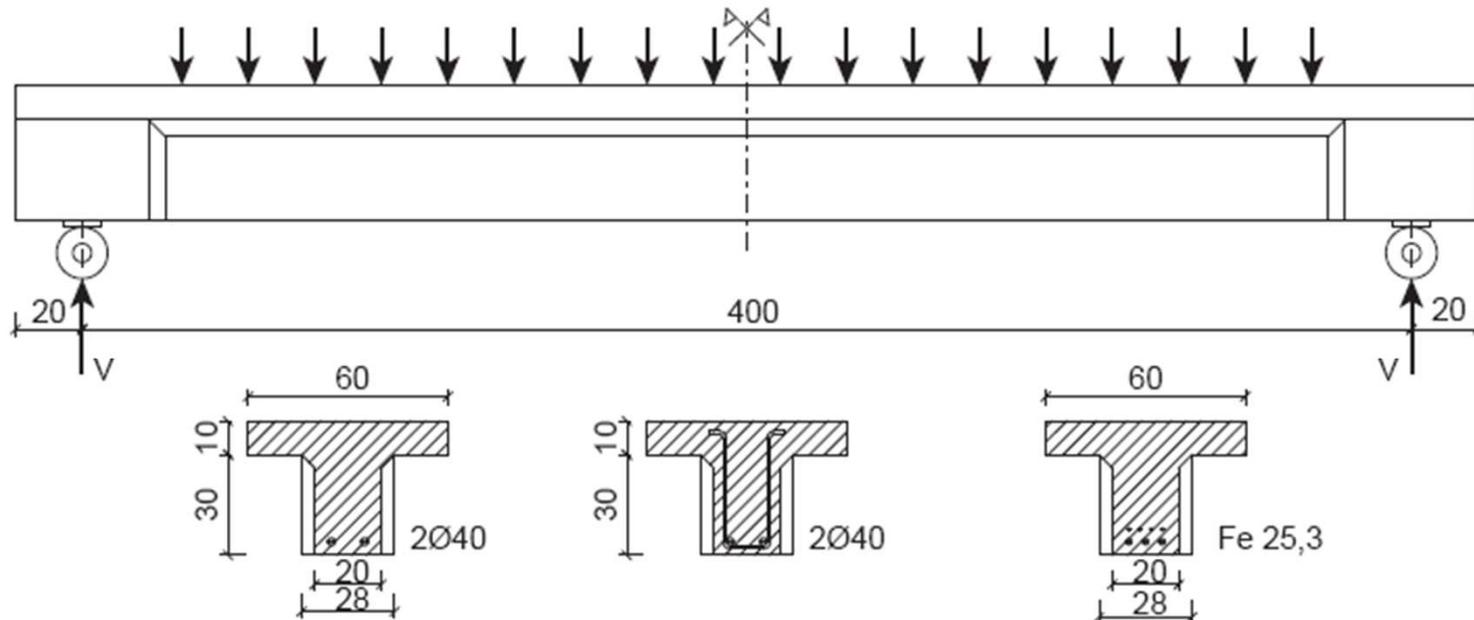


Figura 7.5. Sezioni analizzate e carichi

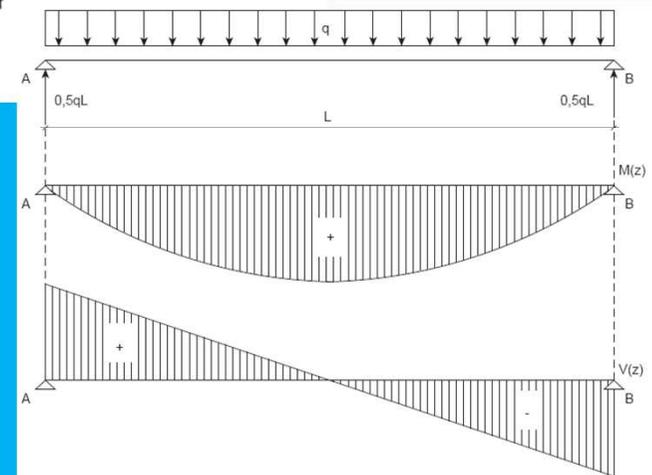
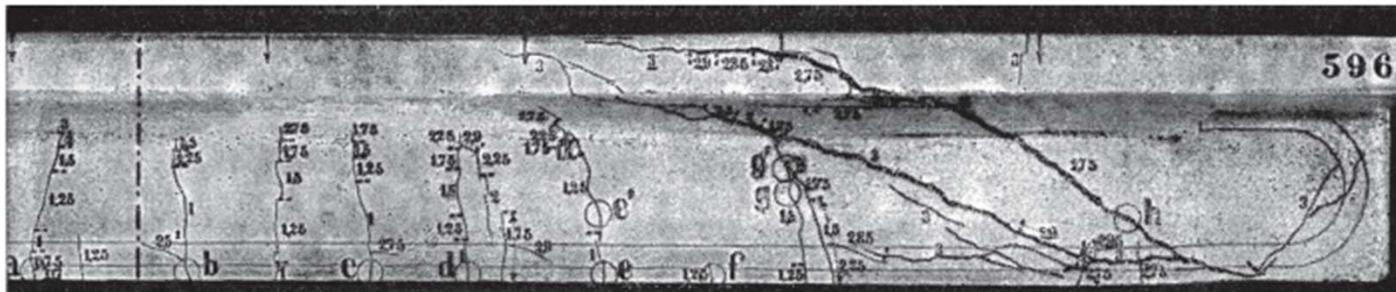
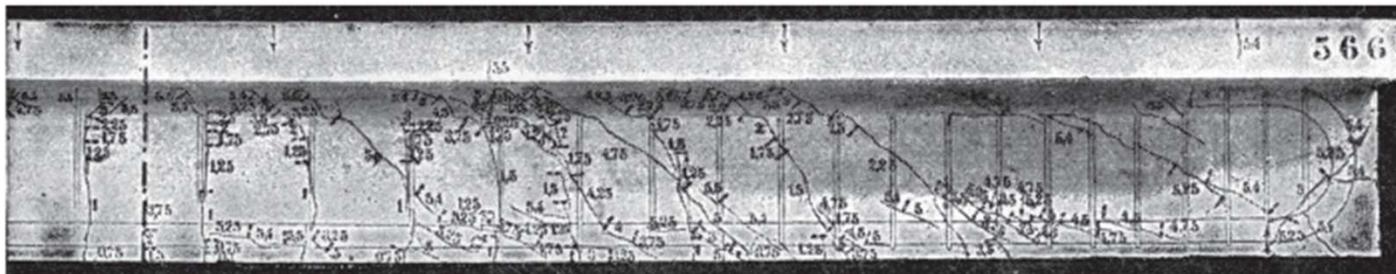


Figura 7.7. Diagrammi delle sollecitazioni

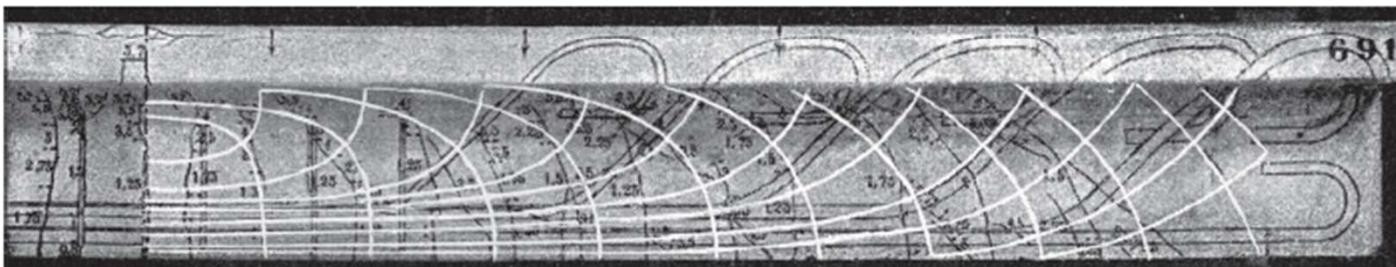
# La Statica



a. Ferri dritti, carico max 24 t



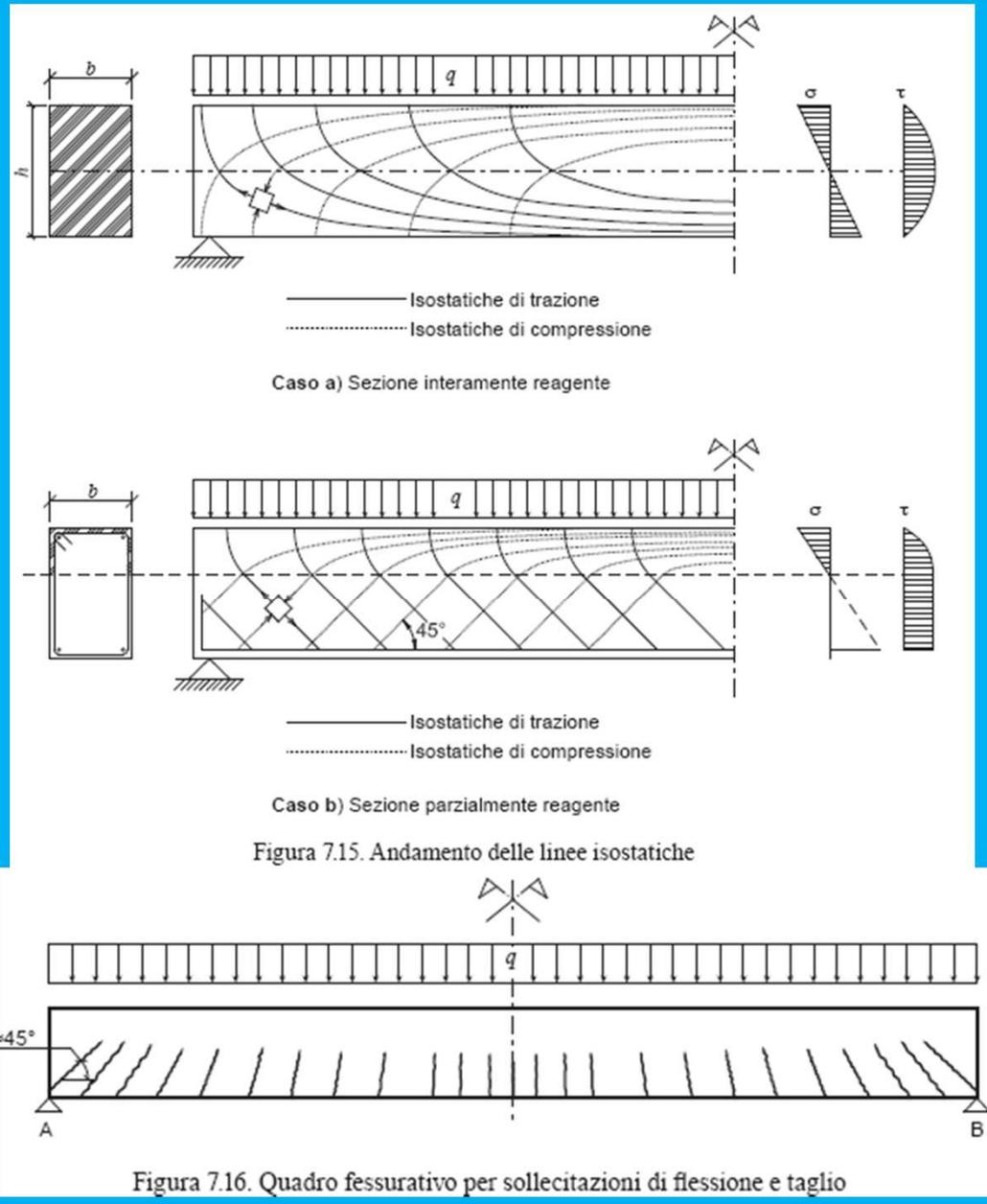
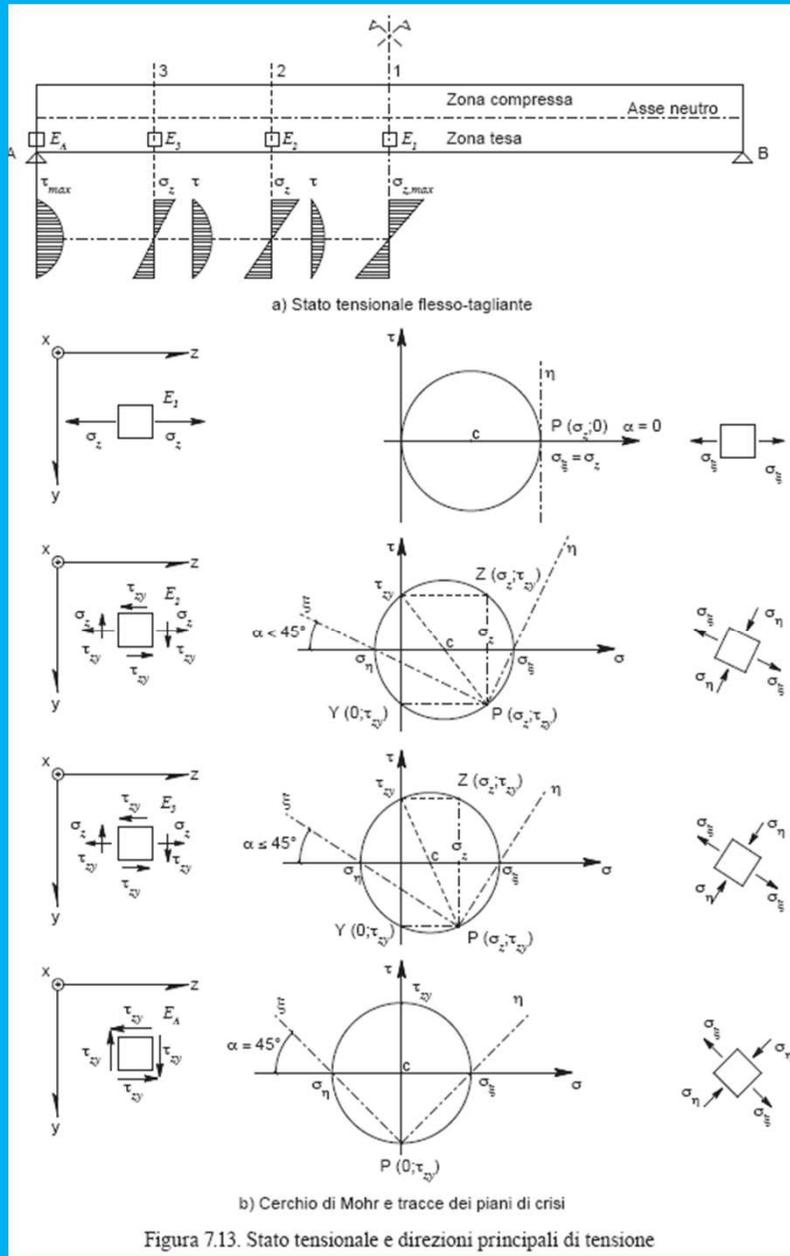
b. Ferri dritti con staffe, carico max 44 t



c. Ferri dritti con ferri piegati, carico max 45,6 t

Figura 7.6. Quadro fessurativo e carichi di rottura

# La Statica



# La Statica

## Modello a Pettine

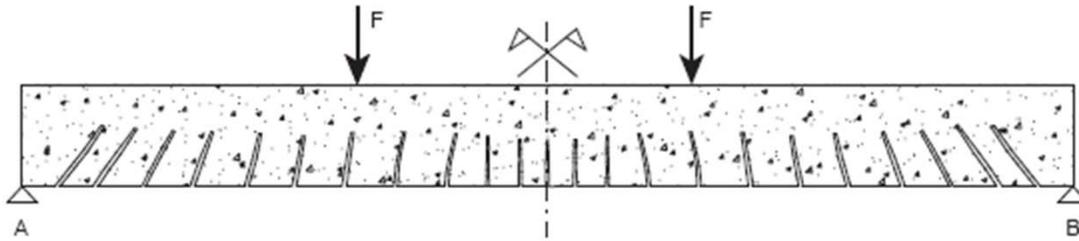
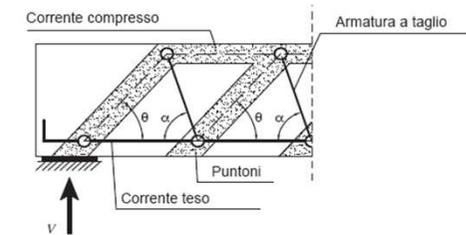
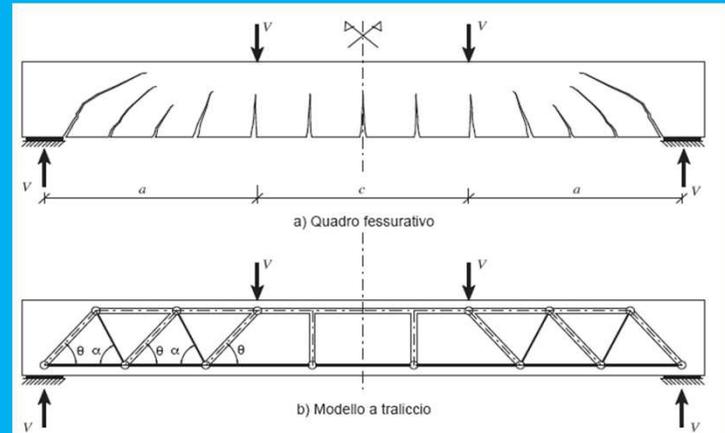


Figura 7.17. Meccanismo resistente a taglio: modello a pettine

- ingranamento degli inerti;
- effetto spinotto;
- effetto dello sforzo normale;
- traslazione del diagramma dei momenti.

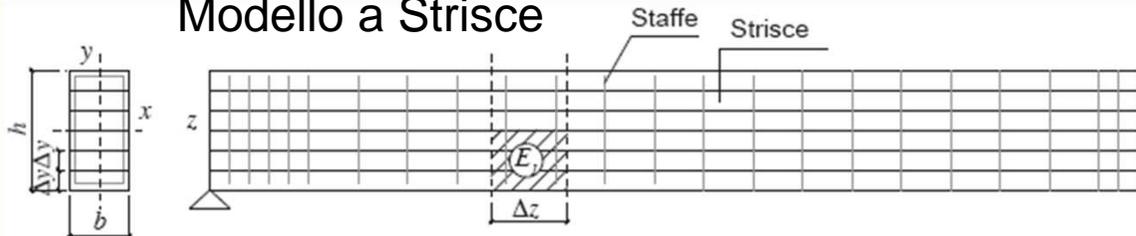
## Modello a Traliccio



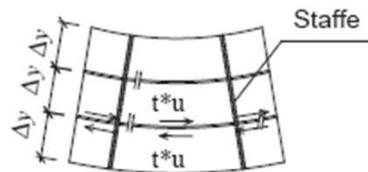
c) Meccanismo resistente

Figura 7.25. Modello a traliccio

## Modello a Strisce



a) Trave in c.a. equivalente a strisce armate



b) Elementino  $E_i$ : Rottura delle strisce

Figura 7.24. Travi in c.a. modello a strisce armate

# La Statica

## 8. LA PRESSOFLESSIONE

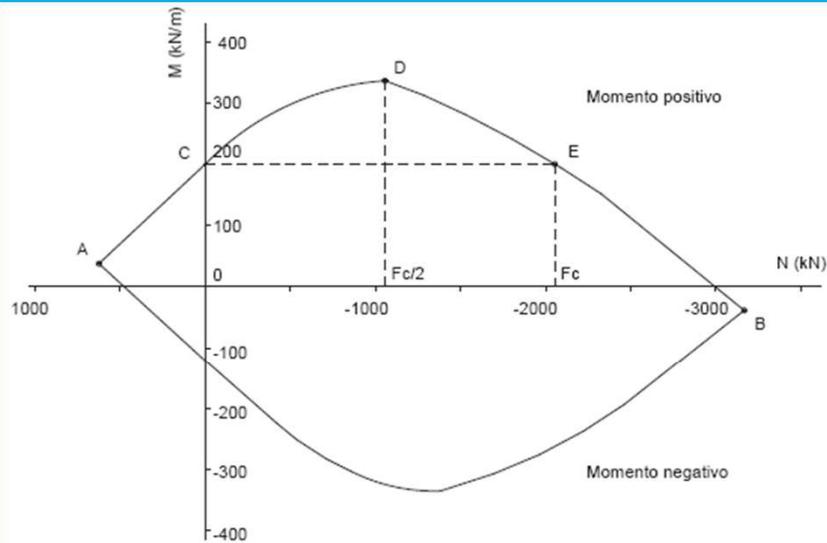


Figura 8.7. Domino  $M-N$  per sezione rettangolare con armatura non simmetrica

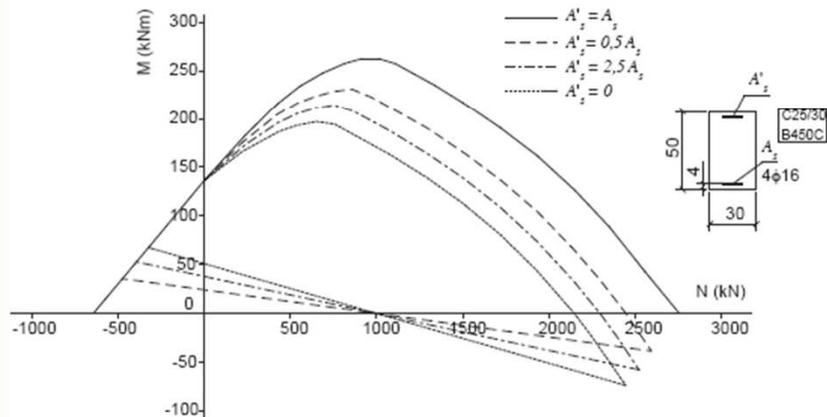


Figura 8.8. Domini  $M-N$  per sezione rettangolare

Nel caso di pressoflessione deviata la verifica della sezione può essere posta nella forma:

$$\left( \frac{M_{E_{yd}}}{M_{R_{yd}}} \right)^\alpha + \left( \frac{M_{E_{xd}}}{M_{R_{xd}}} \right)^\alpha \leq 1$$

dove

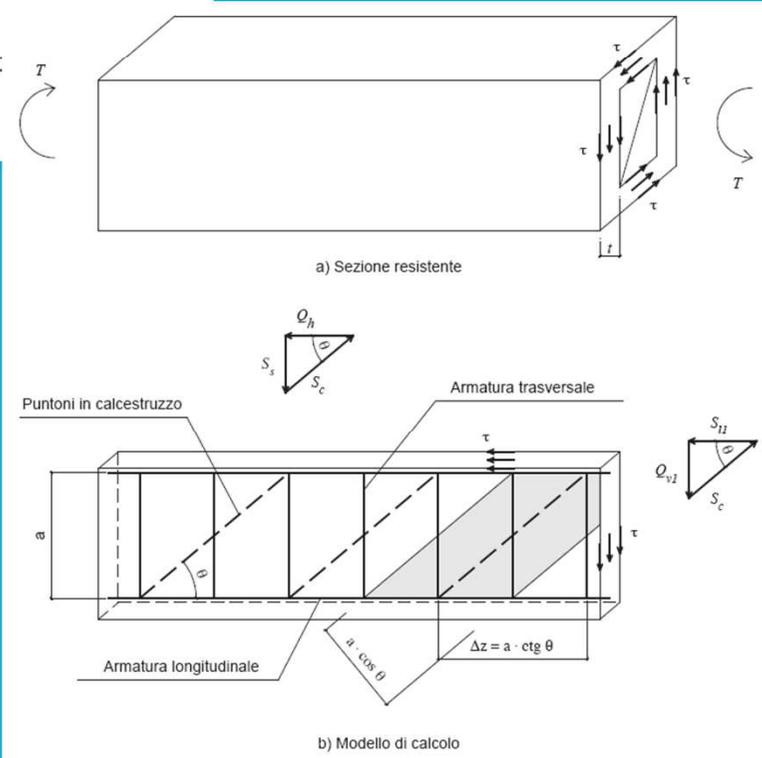
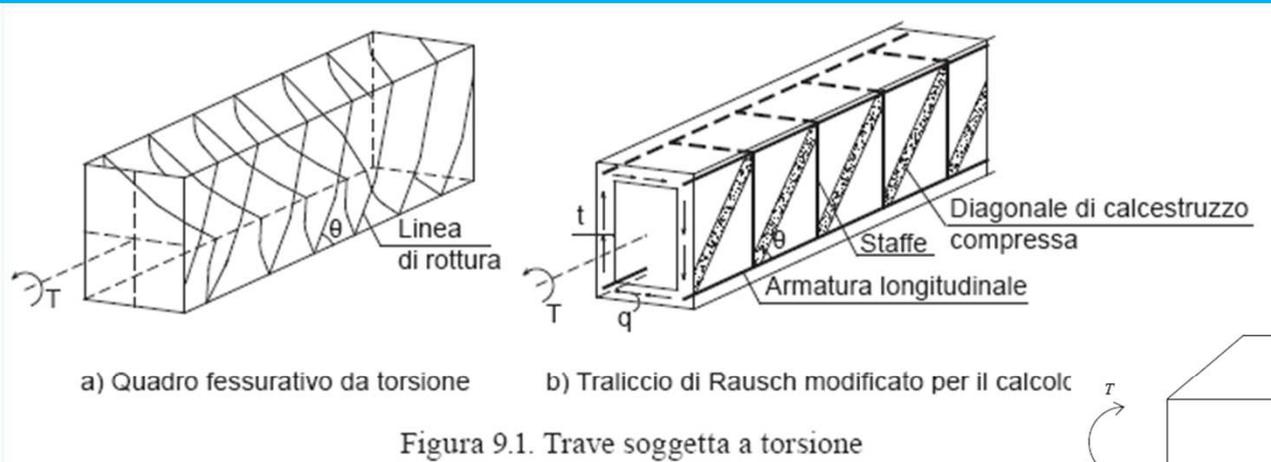
$M_{E_{xd}}, M_{E_{yd}}$  sono i valori di calcolo delle due componenti di flessione retta dell'azione intorno agli assi  $y$  e  $x$

$M_{R_{xd}}, M_{R_{yd}}$  sono i valori di calcolo dei momenti resistenti di pressoflessione retta corrispondenti a  $N_{Ed}$  valutati separatamente attorno agli assi  $y$  e  $x$

$\alpha = 1$  in mancanza di una specifica valutazione

# La Statica

## 9. LA TORSIONE



# La Sismica

## 10.2. Richiami di sismologia

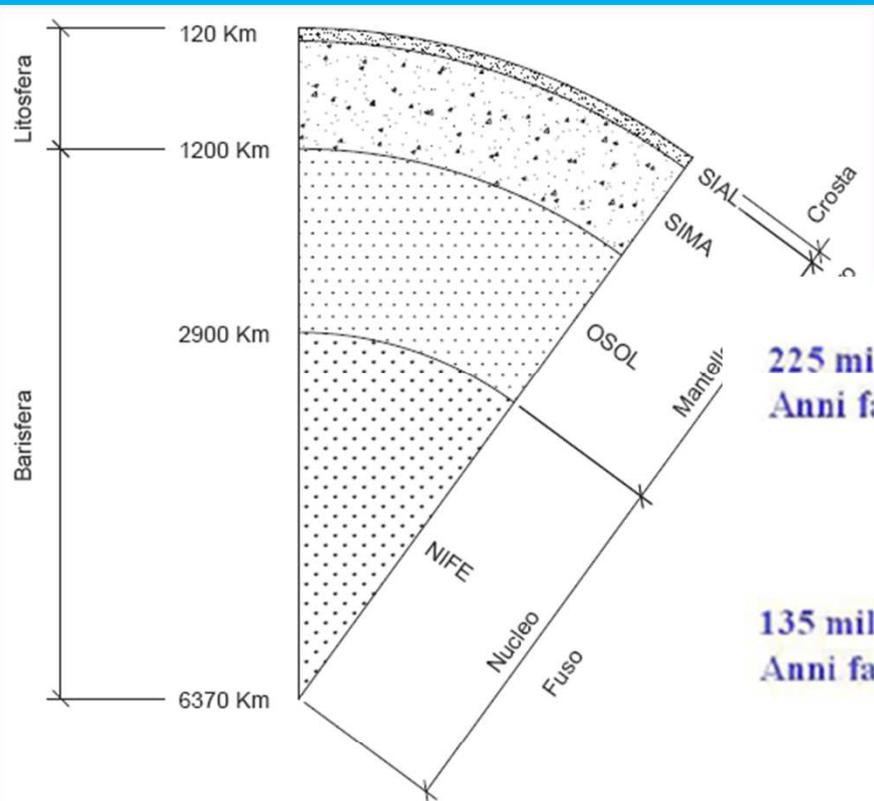


Figura 10.1. Struttura interna della Terra

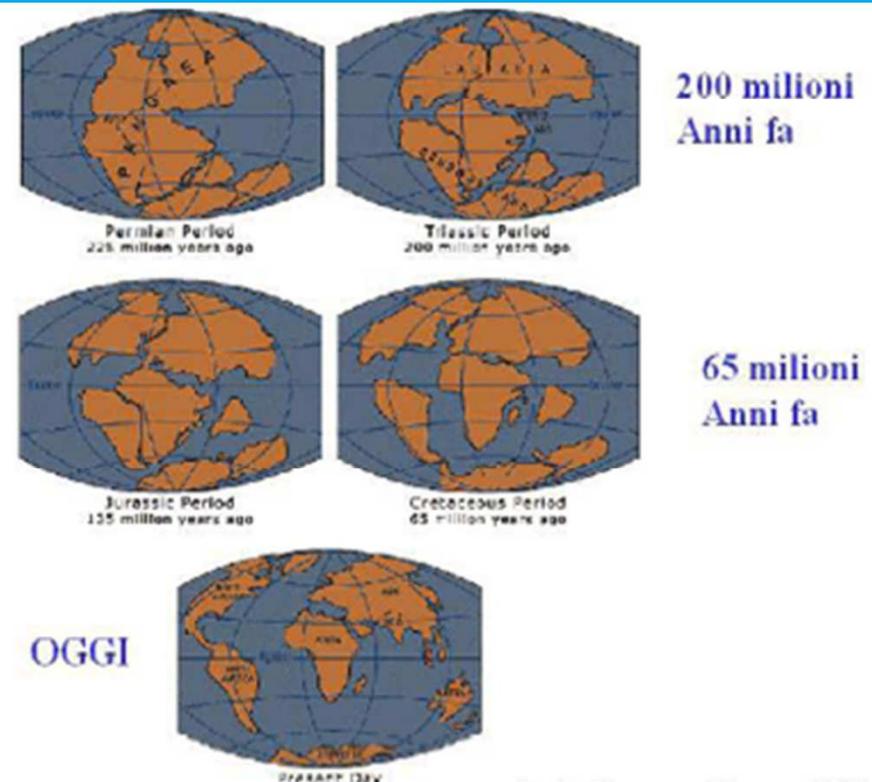
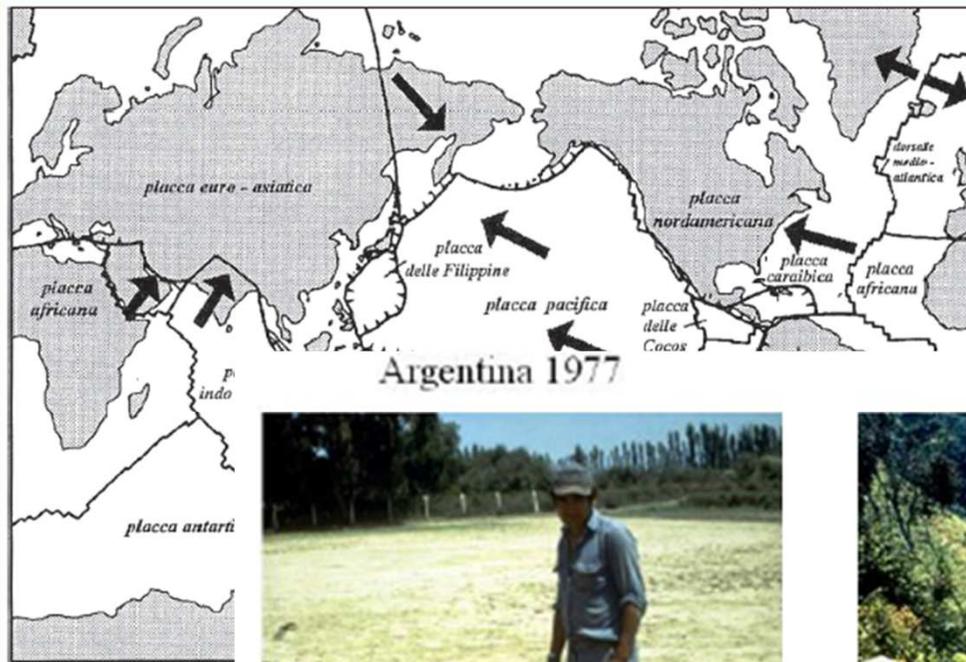
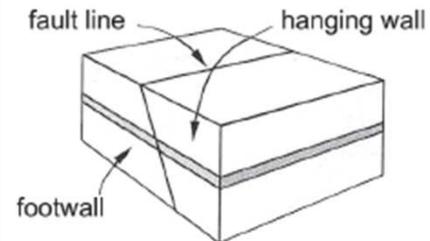


Figura 10.2 – Deriva Continentale

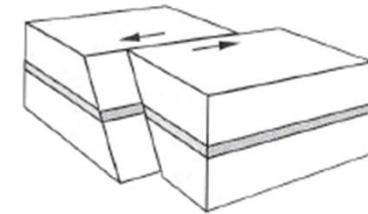
# La Sismica



Argentina 1977



(a) Prior to earthquake

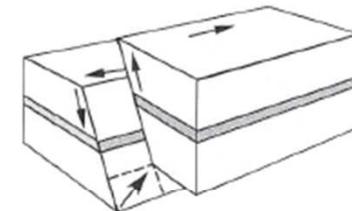


(b) Left-lateral (strike-slip) fault

Guatemala 1976



(d) Reverse fault



(f) Left-lateral reverse fault

pi di faglie



Figura 10.5 – Spostamenti relativi dei margini della faglia

# La Sismica

## 10.3. I terremoti

- terremoti tettonici;
- terremoti vulcanici;
- terremoti da crollo;
- terremoti da esplosione.

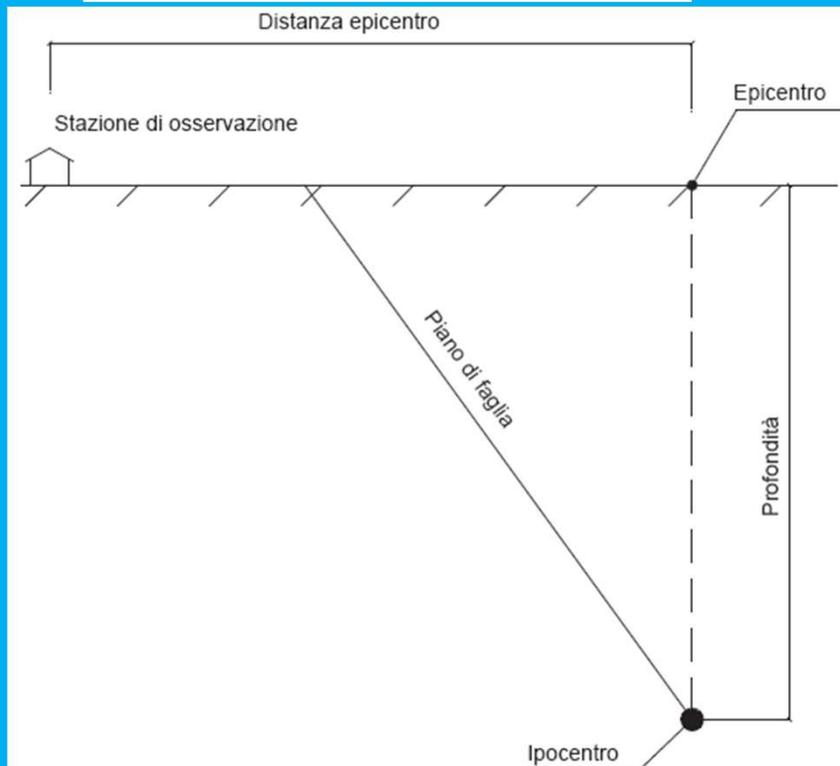


Figura 10.7. Terminologia terremoti

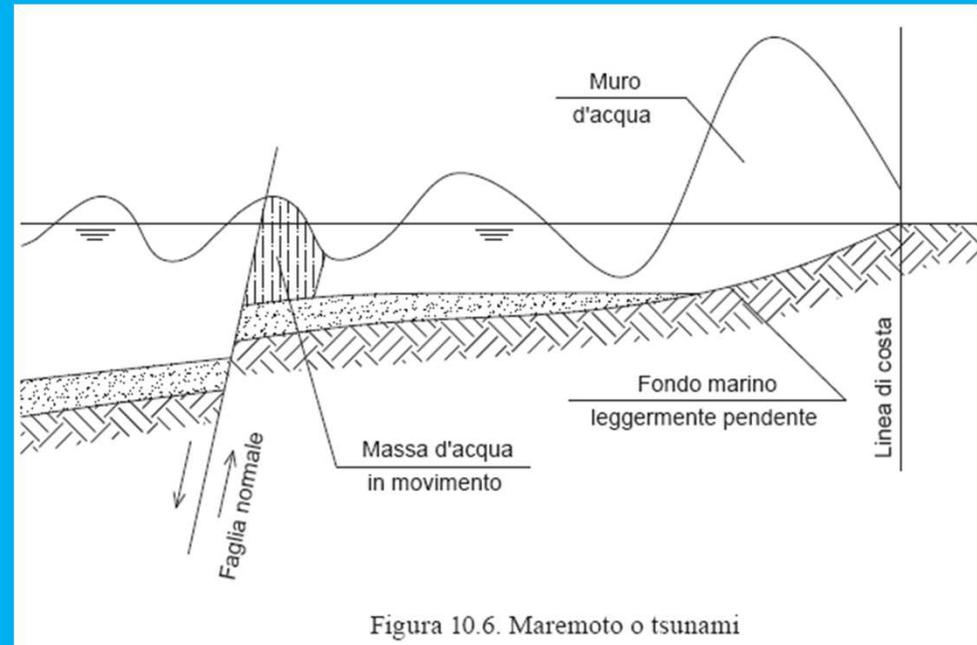


Figura 10.6. Maremoto o tsunami

# La Sismica

## SCALA MERCALLI

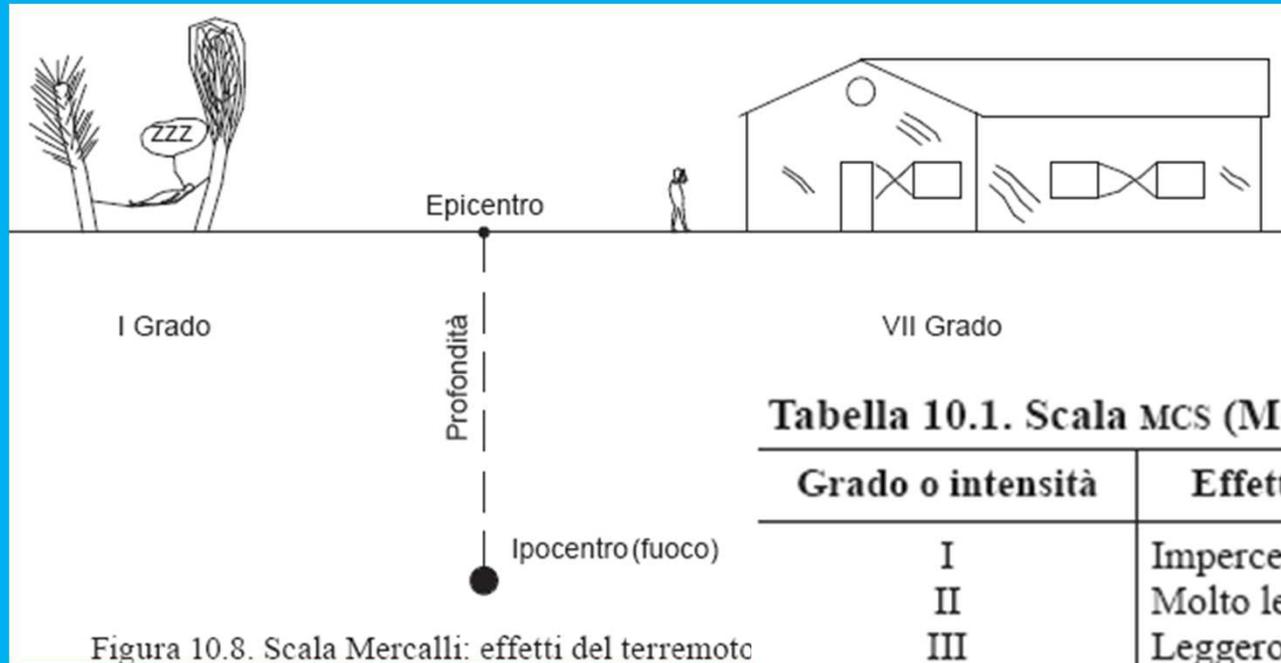


Tabella 10.1. Scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg)

Grado o intensità	Effetti osservati del terremoto
I	Impercettibile
II	Molto leggero
III	Leggero
IV	Moderato
V	Abbastanza forte
VI	Forte
VII	Molto forte
VIII	Rovinoso
IX	Distruttivo
X	Completamente distruttivo
XI	Catastrofico
XII	Grandemente catastrofico

# La Sismica

## SCALA RICHTER

$$M = \log_{10} \frac{A}{A_0}$$

$M$  = magnitudo Richter

$A$  = ampiezza massima registrata dal sismografo a 100 km dall'epicentro

$A_0 = 0,001 \text{ mm} = 1 \mu\text{m}$  (1 micron).

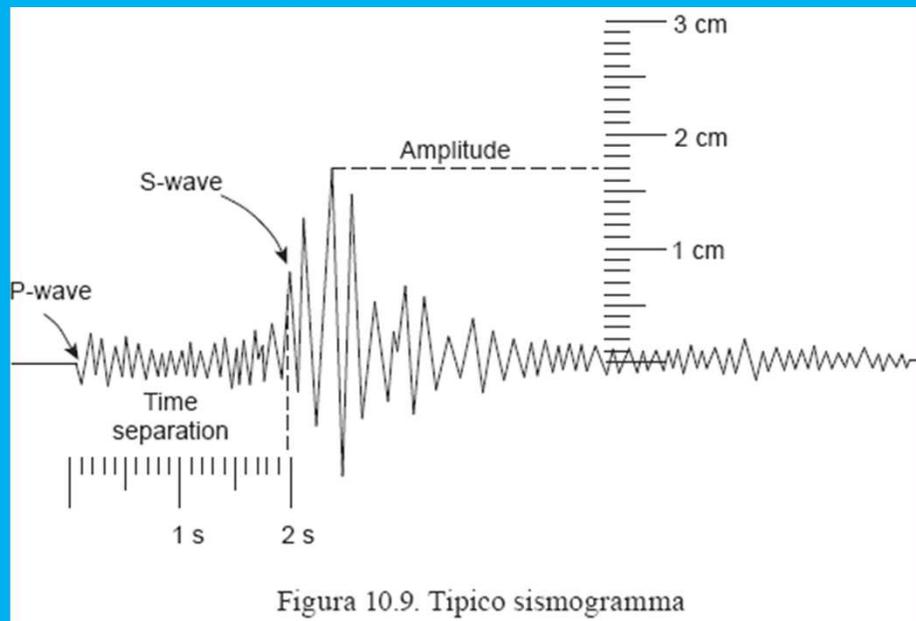


Figura 10.9. Tipico sismogramma

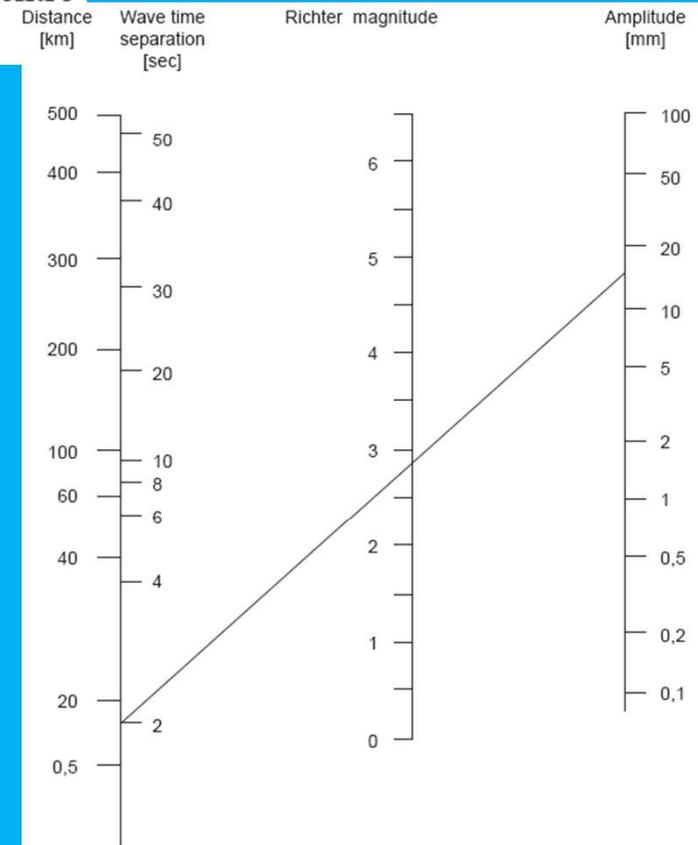


Figura 10.10. Normogramma per la correzione della magnitudo Richter

# La Sismica

**Tabella 10.2. I maggiori terremoti in Italia**

Data	Località	Magnitudo	Vittime
28/12/1857	Salerno	6,5	12.000
28/12/1908	Messina Reggio Calabria	7,5	86.926
13/01/1915	Avezzano	7	29.980
06/05/1976	Friuli	6,5	976
23/11/1980	Irpinia	7,2	2735

**Tabella 10.3. I maggiori terremoti nel mondo**

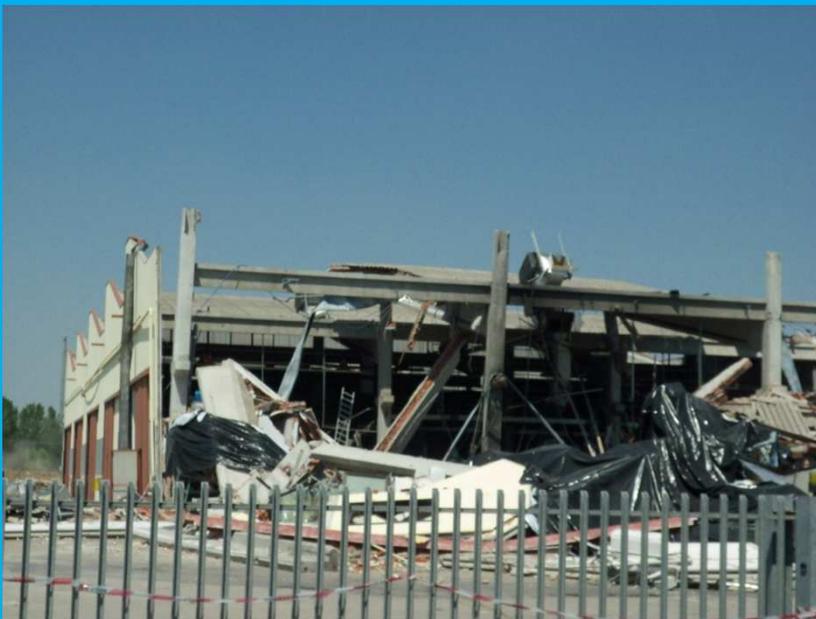
Data	Località	Magnitudo
08/03/1933	Giappone	8,9
16/12/1920	Cina	8,6
19/09/1985	Città del Messico	8,1
22/05/1960	Cile	9,5
28/03/1964	Alaska	9,2
26/12/2004	Sumatra	9,1

# La Sismica

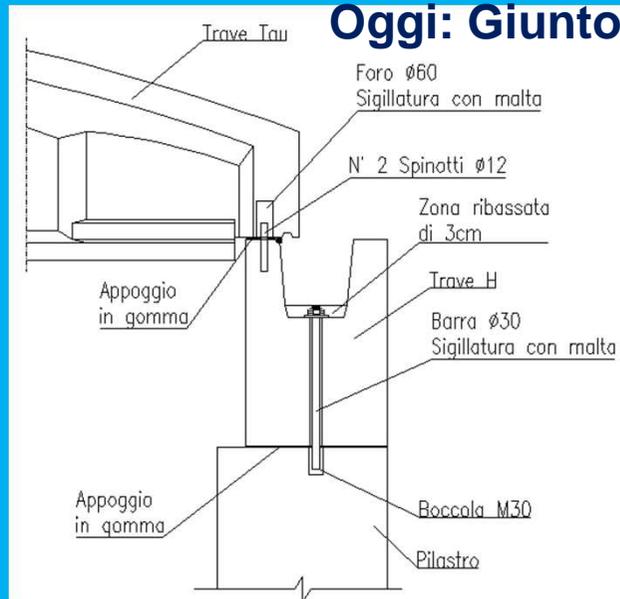


# La Sismica

Terremoto Emilia 20 Maggio 2012



Oggi: Giunto Antisismico !!



# La Sismica

## *10.6.1. Criteri generali di progettazione e considerazioni*

La progettazione strutturale a regola d'arte dovrebbe tener conto di almeno quattro caratteristiche principali che la struttura dovrà possedere, massimizzandone le efficienze, ovvero:

- qualità dei materiali;
- forma;
- iperstaticità e sovradimensionamento;
- regolarità e semplicità strutturale.

# La Sismica

QUALITÀ DEI MATERIALI



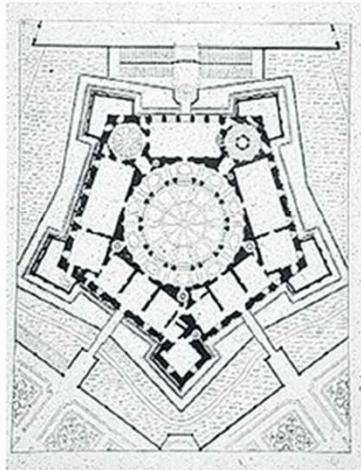
Figura 10.35. Terremoto de L'Aquila del 06/04/2009: materiali scadenti

# La Sismica

FORMA



a) Veduta del palazzo



b) Pianta



c) Incisione di Paul Letarouilly,  
XIX secolo



Figura 10.37. Forme irregolari

Figura 10.36. Palazzo Farnese, Vignola 1547-1565 circa: forma regolare

# La Sismica

## IPERSTATICITÀ E SOVRADIMENSIONAMENTO

L'iperstaticità ha a che fare con la ridondanza di vincoli statici strettamente necessari al sostegno della struttura.

Il sovradimensionamento ha a che fare con la ridondanza delle sezioni e delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

# La Sismica

## REGOLARITÀ E SEMPLICITÀ STRUTTURALE

Una struttura si dice *regolare*<sup>30</sup> quando presenta:

- forma geometrica basata su figure elementari (cerchio, quadrato, rettangolo) senza eccessive rientranze o sporgenze;
- distribuzione di massa e rigidezze uniforme in pianta e in elevazione e approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali.

Una struttura si dice *semplice* quando:

- presenta una distribuzione di elementi resistenti (pilastri, travi, setti, ecc.) strettamente necessari alla trasmissione dei carichi e delle forze laterali (sisma) nella maniera più diretta possibile<sup>31</sup>.

# La Sismica

## 10.6.4. Strutture dissipative e non dissipative

In termini energetici si può scrivere la seguente equazione di equilibrio:

$$E_i = E_m + E_c + E_k$$

dove

$E_m$  = energia cinetica posseduta dalla massa della struttura in movimento

$E_c$  = energia viscosa dovuta al comportamento visco-elastico del materiale e dall'attrito. Essa comporta lo smorzamento del moto (senza la quale le oscillazioni provocate dal sisma rimarrebbero in moto perpetuo)

$E_k$  = energia di deformazione elasto-plastica assorbita dalla struttura

$E_i$  = energia cinetica in ingresso posseduta dalla massa della struttura per effetto del moto sismico.

# La Sismica

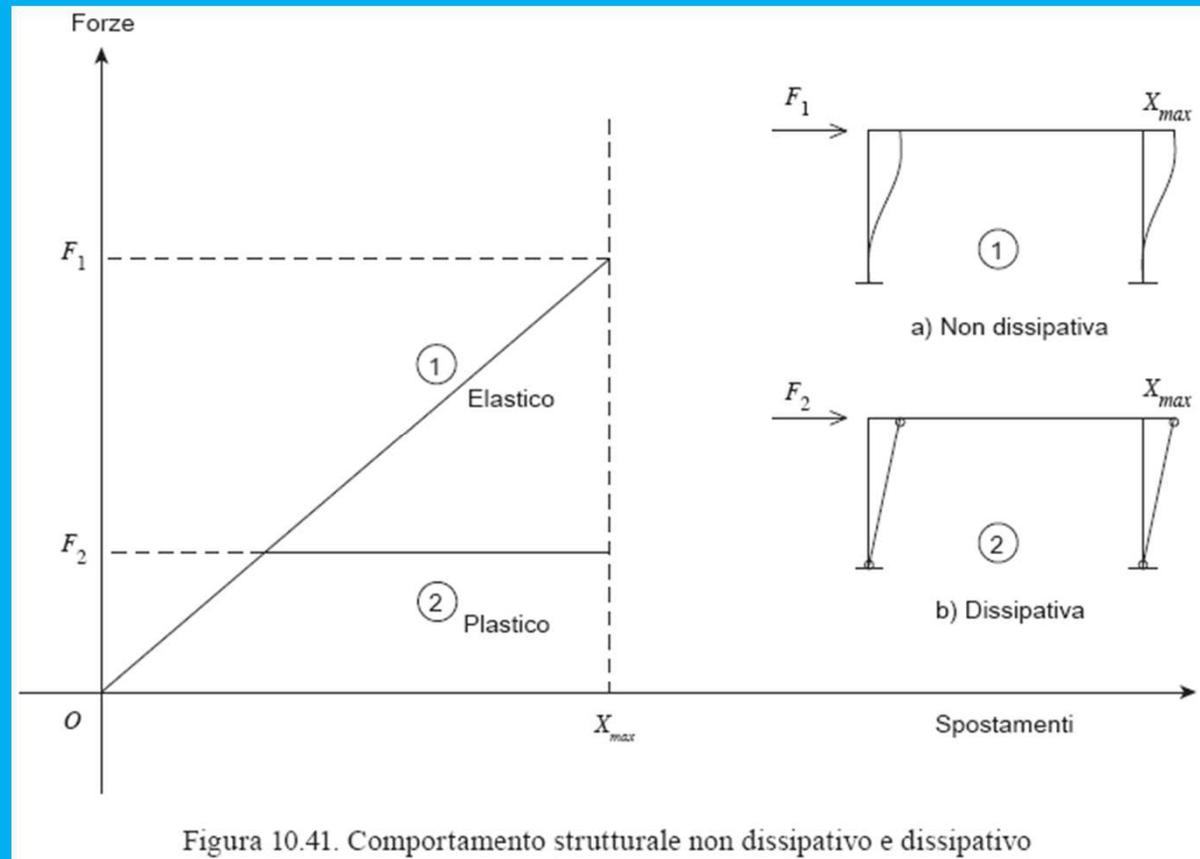
## NTC 08

“L’impostazione delle presenti norme, con le regole di progetto che da essa discendono, prevede che le costruzioni in cemento armato posseggano in ogni caso una adeguata capacità di dissipare energia in campo inelastico per azioni cicliche ripetute, senza che ciò comporti riduzioni significative della resistenza nei confronti delle azioni sia verticali che orizzontali”.

## Parere Consiglio Sup. L. P. – 14/12/2010

“In merito.....la Sezione ritiene che sia sempre possibile, anche se generalmente non conveniente, progettare strutture non dissipative con qualunque materiale (anche non fragile), purchè si adotti un fattore di struttura unitario, insieme con l’utilizzo del livello di azione corrispondente allo Stato Limite Ultimo (SLU). In tal caso non è necessario l’utilizzo di accorgimenti quali la gerarchia delle resistenze, il cui effetto può esplicarsi solo al superamento del comportamento elastico delle strutture. Resta comunque inteso che si debba ottemperare alle prescrizioni contenute nel capitolo 4 delle NTC 08 che garantiscono un livello significativo di duttilità”.

# La Sismica



***Grazie***