



Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso

**LA PROGETTAZIONE
DELLE
STRUTTURE DI CALCESTRUZZO
CON LE NUOVE NORME TECNICHE**

con il patrocinio del Consiglio Superiore dei LL.PP.

Franco Angotti

Verifiche di sicurezza:

la progettazione agli stati limite, azioni e combinazioni

Andria, 5 – 6 Giugno 2008

1^A PARTE

Verifiche di sicurezza: IL METODO AGLI STATI LIMITE azioni e combinazioni

Riferimenti

Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Capitolo 2 – Sicurezza e prestazioni attese

Eurocodice: EN 1990 (EC 0)

Principi di progettazione strutturale

Eurocodice: EN 1992-1-1 (EC 2)

Progetto di strutture in calcestruzzo

Appendici Nazionali

Guida all'uso dell'Eurocodice 2 – Vol. 1: nuova edizione

PRINCIPIO FONDAMENTALE

LE OPERE

DEVONO ESSERE PROGETTATE E COSTRUITE

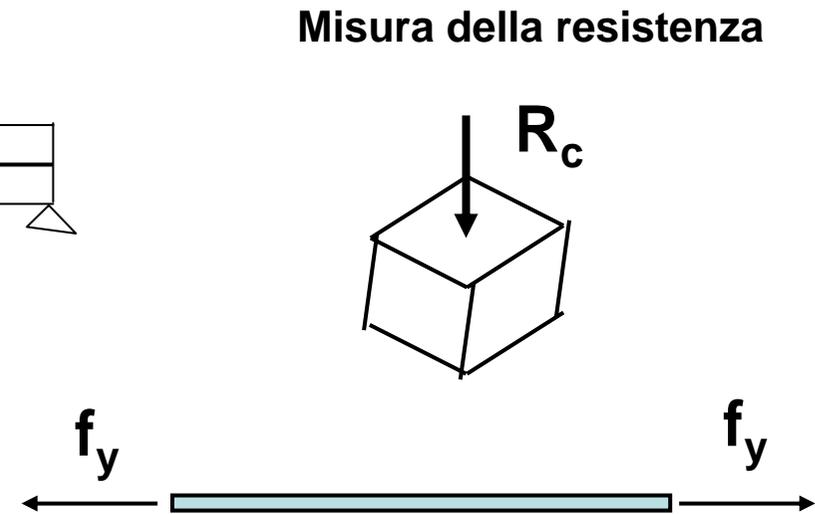
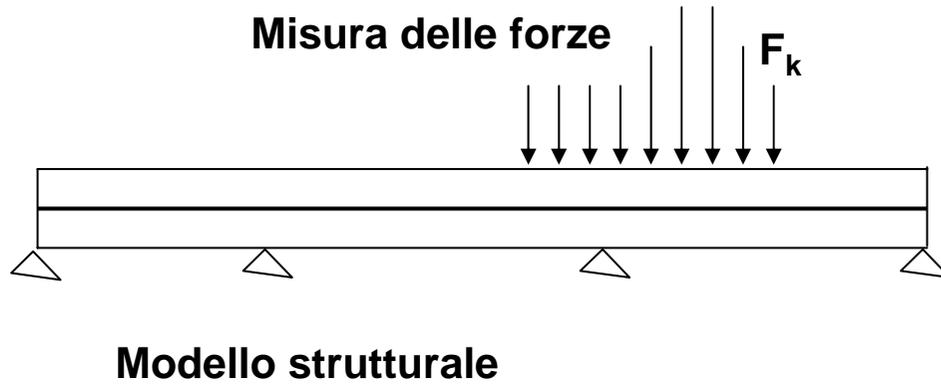
per ottenere

ADEGUATA RESISTENZA: sicurezza nei confronti di SLU

FUNZIONALITA' DI ESERCIZIO: sicurezza nei confronti di SLE

ADEGUATA ROBUSTEZZA: nei confronti di azioni eccezionali
(proporzione fra causa ed effetto)

OPPORTUNA DURATA: conservazione delle caratteristiche fisiche
e meccaniche dei materiale e delle strutture



Calcolo strutturale:

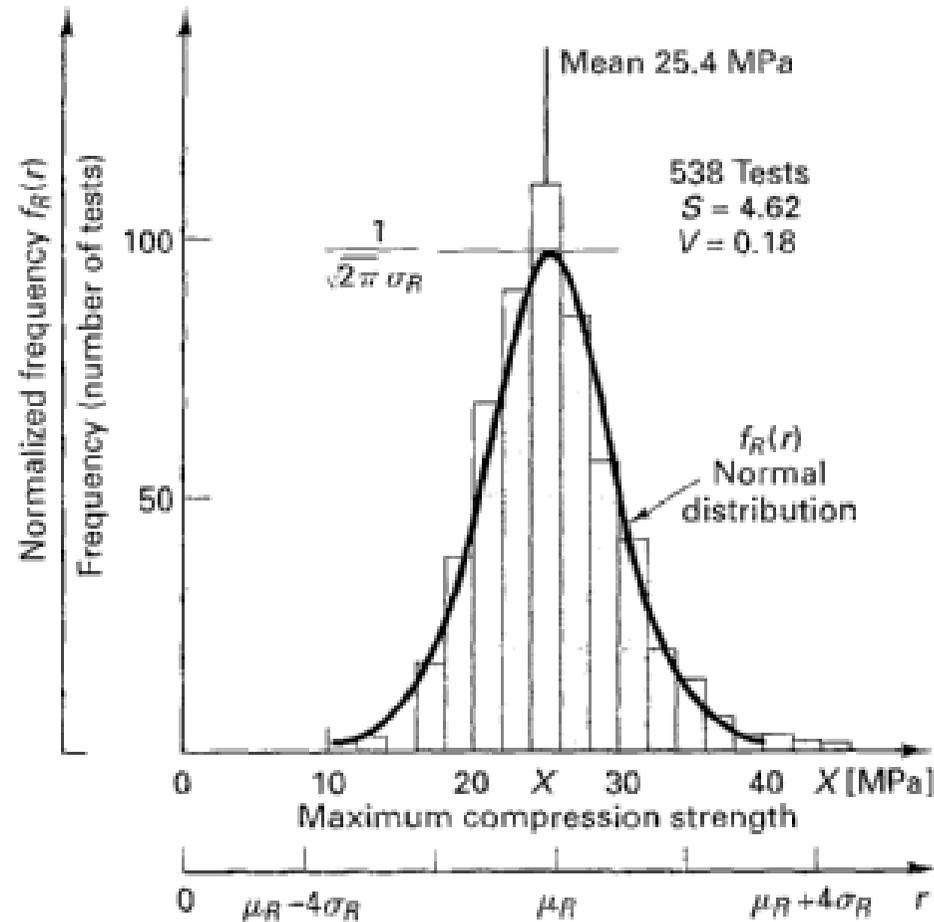
$$E_d = \gamma_{Sd} E_d(\gamma_{fi}, \psi_i, F_{ki}; a_d)$$

M, N, V, T, σ , ε , w, ecc.

Istogramma R_c

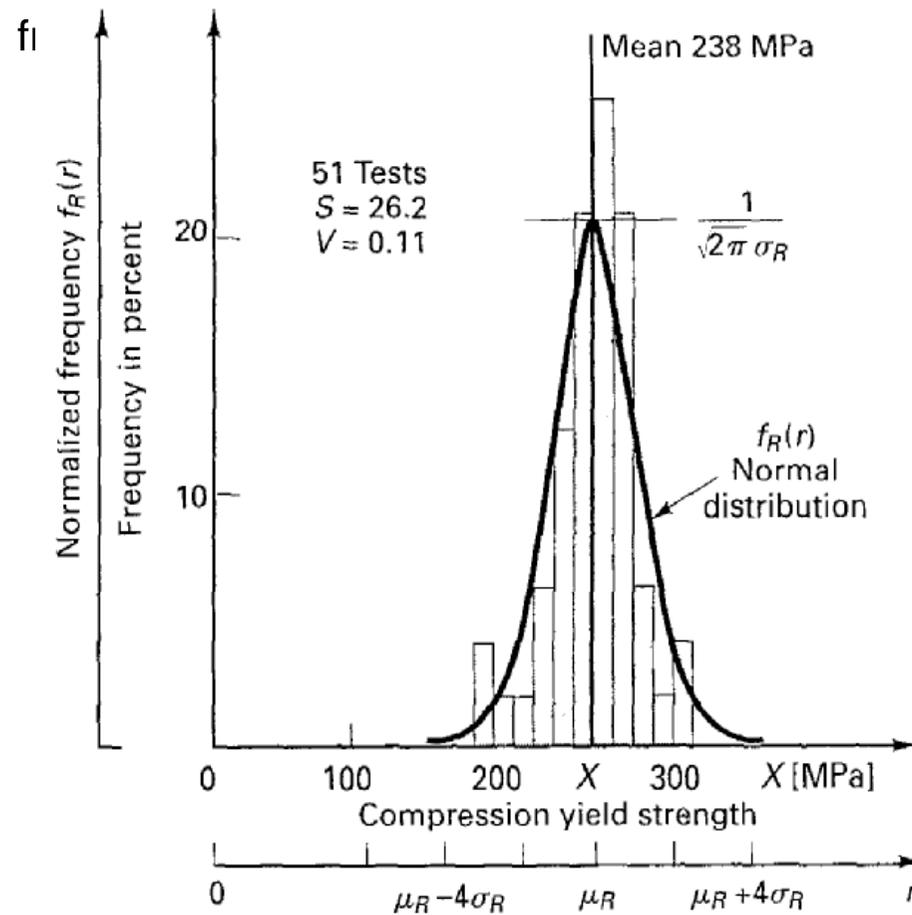
Totale di 538 prove

numero di prove

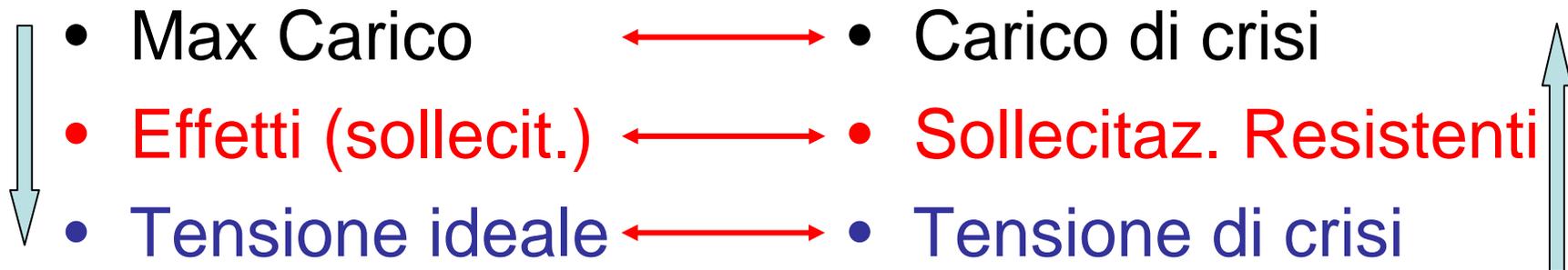


Istogramma f_y

51 prove



verifica della sicurezza



Modello deterministico:

$$\max \sigma_{id} \leq \sigma_0$$

$$\max E \leq R$$

Metodi probabilistici

Probabilità di crisi:

$$P_f = \text{Prob} (R \leq S)$$

Verifica di sicurezza:

$$P_f \leq P_f^*$$

Metodi probabilistici

Confronto fra S R:

$M_s = R - S$ margine di affidabilità

Evento favorevole = $M_s > 0$

Metodo di livello 3

R e S = variabili aleatorie

Se si conosce la distribuzione statistica di M_s :

$$P_f = P(M_s \leq 0) \leq P_f^*$$

a) per s.l.u. (rottura fragile, instabilità, ecc.):

$$P_f^* = 10^{-5} - 10^{-7}$$

b) per s.l.u. (rottura duttile, cedimenti, ecc.):

$$P_f^* = 10^{-4} - 10^{-5}$$

c) per s.l.e. (deformazioni eccessive, sensibilità alle vibrazioni, ecc.):

$$P_f^* = 10^{-2} - 10^{-3}$$

Metodo di livello 2 o metodo β

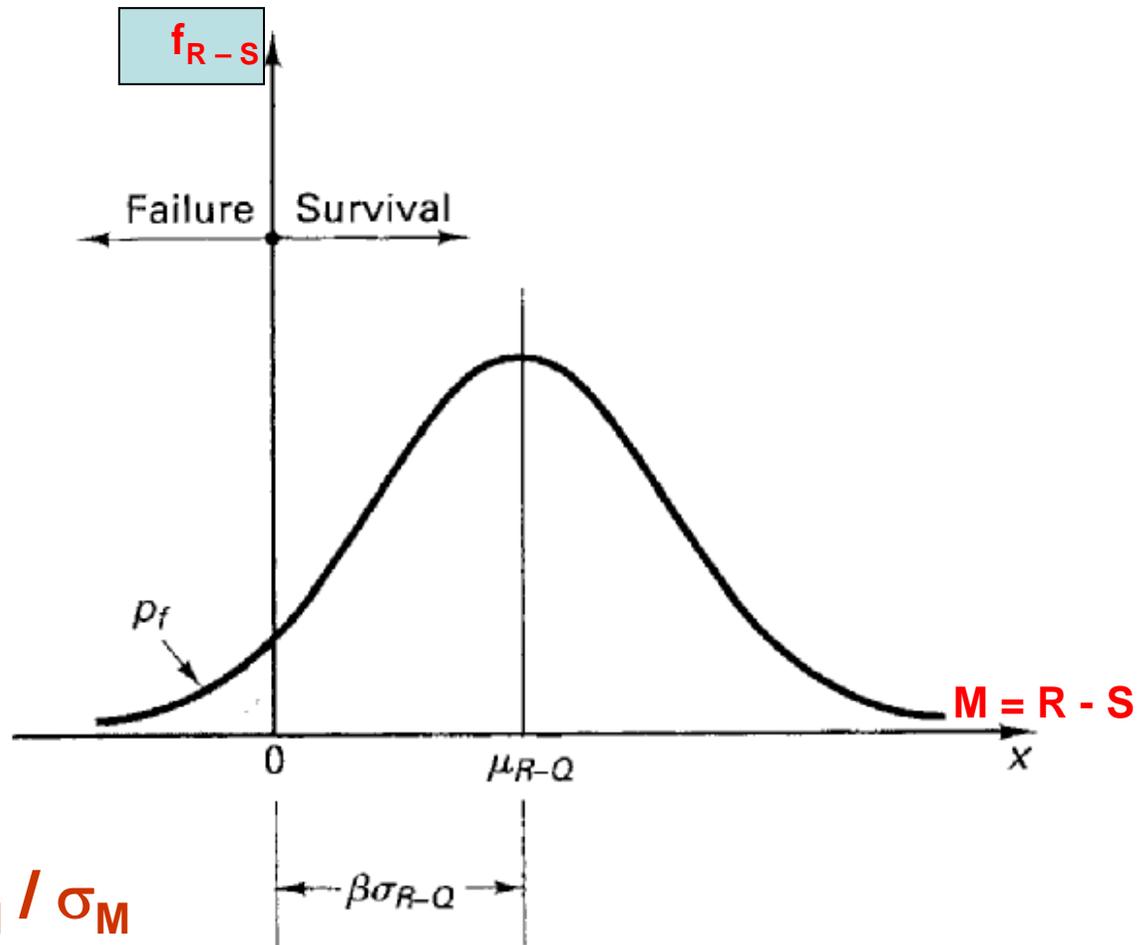
marginale di affidabilità = $M_s = R - S$

si conoscono solo media e μ_M

deviazione standard di M_s : σ_M

Indice di affidabilità = $\beta = \mu_M / \sigma_M$

$$f_{R-S}$$



$$\beta = \mu_M / \sigma_M$$

Se R ed S non correlate

ovvero

R ed S sono normali e statisticamente indipendenti:

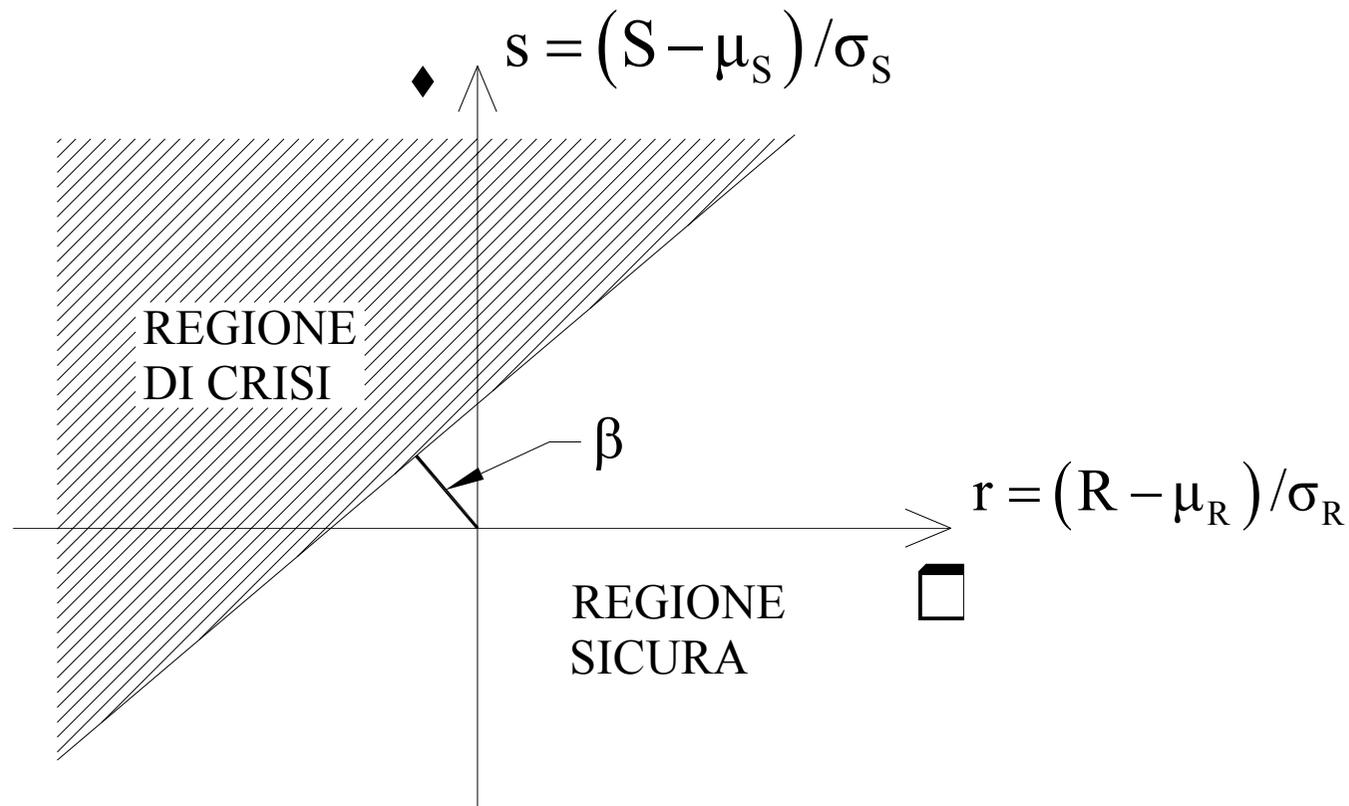
Media μ_R e μ_S

Deviazione standard σ_R e σ_S

Risulta:

$$\beta = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

Interpretazione geometrica di β



Nella pratica progettuale anche il metodo di livello 2 è difficilmente applicabile perché non si dispone dei dati necessari

Metodo di livello 1

metodo dei coefficienti parziali

o

semi-probabilistico

si basa sul rispetto di un insieme di regole utilizzando:

- **valori caratteristici** delle variabili
- **coefficienti parziali di sicurezza** γ_F e γ_M
- **elementi additivi** Δ per le altre incertezze (ad es. geometria)
(si può ad es. ad esempio tenere conto dell'aleatorietà del valore del copriferro e quindi dell'altezza utile di una sezione di c.a.)

Metodo di livello 1

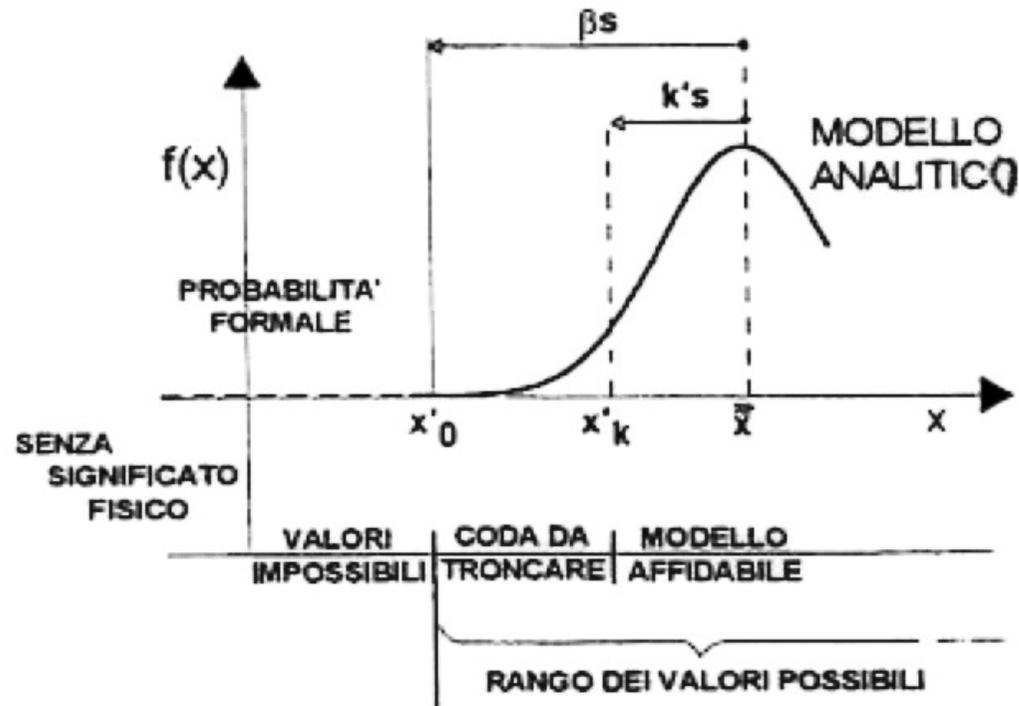
metodo dei coefficienti parziali

o

semi-probabilistico

Il metodo non richiede alcuna
conoscenza probabilistica da parte del
progettista

gli aspetti probabilistici del problema di sicurezza sono già considerati nel **processo di calibrazione del metodo**, ossia nella scelta dei valori caratteristici, dei coefficienti parziali di sicurezza, ecc., fissati dalle Norme.



Valore caratteristico: $x_k = x_m - ks$ [frattile 5%]

Valore di calcolo o di progetto: $x_d = x_m - \beta s = x_k / \gamma_m$ [frattile 5‰]

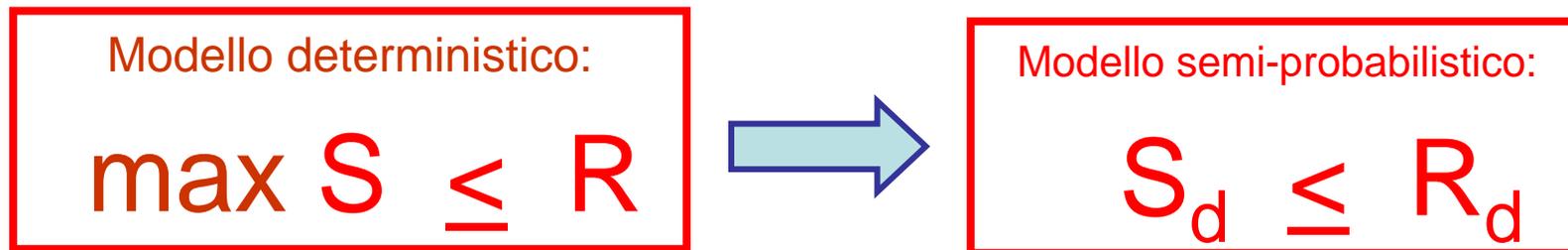
metodo dei coefficienti parziali o semi-probabilistico

Ipotesi:

R ed S sono variabili aleatorie indipendenti;

Si assumono i **valori caratteristici**: R_k ed S_k = frattili di un ordine prefissato

Si passa ai **valori di progetto** R_d ed S_d per coprire altre incertezze mediante l'applicazione di coefficienti parziali di sicurezza e di elementi additivi



I livelli di affidabilità si possono differenziare

per tener conto di:

- **cause** che portano al raggiungimento di uno stato limite;
- **conseguenze** del collasso in termini di rischio per la vita umana, danni alle persone, potenziali perdite economiche, rischi ambientali;
- **spesa** e procedure necessarie per ridurre il rischio di collasso.

Classi di conseguenze		Classi di affidabilità		Indice β (50 anni)
CC1	→	RC1	→	3,3 ($P_f \sim 10^{-3}$)
CC2	→	RC2	→	3,8 ($P_f \sim 10^{-4}$)
CC3	→	RC3	→	4,3 ($P_f \sim 10^{-5}$)

DEFINIZIONE DELLE CLASSI DI CONSEGUENZE

EN1990 Appendice B

Classi di conseguenze

ESEMPI DI EDIFICI

CC1

RARO AFFOLLAMENTO

CC2

NORMALE AFFOLLAMENTO

CC3

**GRANDE AFFOLLAMENTO
STRATEGICHE O PERICOLOSE**

Nelle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni

II RISCHIO viene DIFFERENZIATO

attraverso

VITA NOMINALE V_N E CLASSI D'USO C_U

Periodo di riferimento per l'azione SISMICA:

$$V_R = V_N C_U \geq 35 \text{ anni}$$

CLASSI D'USO (o DI IMPORTANZA) delle COSTRUZIONI

I	RARO AFFOLLAMENTO	$C_U = 0,7$
II	NORMALE AFFOLLAMENTO	$C_U = 1,0$
III	GRANDE AFFOLLAMENTO	$C_U = 1,5$
IV	STRATEGICHE O PERICOLOSE	$C_U = 2,0$

VITA NOMINALE V_N

OPERE PROVVISORIE 10 anni

OPERE ORDINARIE 50 anni

GRANDI OPERE 100 anni

PERIODO DI RIFERIMENTO (per azione sismica)

$$V_R = V_N C_U \geq 35 \text{ anni}$$

$$V_R = 35 - 50 - 75 - 100 - 150 - 200 \text{ anni}$$

Calibrazione dei γ

$$\gamma_m = \frac{x_k}{x_d} = \frac{x_m - ks}{x_m - \beta s} = \frac{1 - k\delta_m}{1 - \beta\delta_m}$$

MODELLO LOG-NORMALE ($k = 1,465$ per $p = 5\%$)

$$\gamma_m = \frac{x_k}{x_d} = e^{(\beta\delta_m - k\delta_m)}$$

$\beta = 3,8$

$\delta_m = s / x_m$

Indice di affidabilità

coefficiente di variazione del materiale

INTRODUCENDO LE ALEATORIETA' DI

GEOMETRIA :

δ_g

MODELLO:

δ_o

FATTORE DI SENSITIVITA' per lo SLU considerato:

α

FATTORE DI CONVERSIONE tra R_C potenziale e R_C struttura: η

$$\gamma_M = \frac{e^{(\alpha\beta\delta_r - k\delta_m)}}{\eta}$$

CON

$$\delta_r = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_g^2 + \delta_o^2}$$

Resistenza di calcolo dei materiali:

$$f_{di} = f_{ki} / \gamma_{Mi}$$

δ_m = coeff. var. materiale

δ_g = coeff. var. geometria

δ_o = coeff. var. modello

α = coeff. sensitività SLU

η = fattore di conversione

β = indice di affidabilità

CALCESTRUZZO:

$$\delta_m=0,15 \quad \delta_g=0,05 \quad \delta_o=0,05 \quad \alpha=0,80 \quad \eta=0,85 \quad \beta=3,8$$

$$\gamma_c \cong 1,5$$

ACCIAIO

$$\delta_m=0,05 \quad \delta_g=0,05 \quad \delta_o=0,05 \quad \alpha=0,80 \quad \eta=1,00 \quad \beta=3,2$$

$$\gamma_s \cong 1,15$$

valore di progetto di un'azione F

$$F_d = \gamma_f F_{rep} = \gamma_f \psi F_k$$

F_k = valore caratteristico

F_{rep} = valore rappresentativo pertinente

$$F_{rep} = \psi F_k$$

γ_f = coeff. parziale che tiene conto di deviazioni sfavorevoli di F dal valore rappresentativo

ψ = assume valori: $1, \psi_0, \psi_1, \psi_2$

Classificazione delle azioni

In base al modo di esplicarsi:

- a) **dirette**: forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili;
- b) **indirette**: coazioni (spostamenti impressi, variazioni di temperatura e di umidità, ritiro, precompressione, cedimenti di vincolo, ecc.)
- c) **degrado**:
 - **endogeno**: alterazione naturale del materiale di cui è composta l'opera strutturale;
 - **esogeno**: alterazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'opera strutturale, a seguito di agenti esterni.

Classificazione delle azioni

In base alla risposta strutturale:

- a) *statiche*: azioni applicate alla struttura che non provocano accelerazioni significative della stessa o di alcune sue parti;
- b) *pseudo statiche*: azioni dinamiche rappresentabili mediante un'azione statica equivalente;
- c) *dinamiche*: azioni che causano significative accelerazioni della struttura o dei suoi componenti.

Classificazione delle azioni

In base alla variazione della intensità nel tempo:

a) *permanenti* (G):

G1

peso proprio di tutti gli elementi strutturali;

peso proprio del terreno, quando pertinente;

forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno);

forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo);

G2

peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;

spostamenti e deformazioni imposti, previsti dal progetto e realizzati all'atto della costruzione;

pretensione e precompressione (P);

ritiro e viscosità;

spostamenti differenziali;

Classificazione delle azioni

In base alla variazione della intensità nel tempo:

b) *variabili* (**Q**):

di lunga durata: agiscono con un'intensità significativa, anche non continuamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura;

di breve durata: azioni che agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura;

c) *eccezionali* (**A**):

incendi;
esplosioni;
urti ed impatti;

d) *sismiche* (**E**): azioni derivanti dai terremoti.

Le azioni variabili Q

Q ha quattro valori rappresentativi:

Valore caratteristico: Q_k

Valore di combinazione: $\psi_0 Q_k$

Valore frequente: $\psi_1 Q_k$

Valore quasi permanente: $\psi_2 Q_k$

Valore caratteristico Q_k

Per la maggior parte delle azioni variabili: neve, vento, temperatura, sovraccarico solai

Q_k = valore che ha la probabilità di essere superato in un
anno

$$p = 0,02 = 2\%$$

Ovvero azione che ha un periodo di ritorno:

$$T_{ref} = 1/0,02 = 50 \text{ anni}$$

Valore di combinazione: $\psi_0 Q_k$

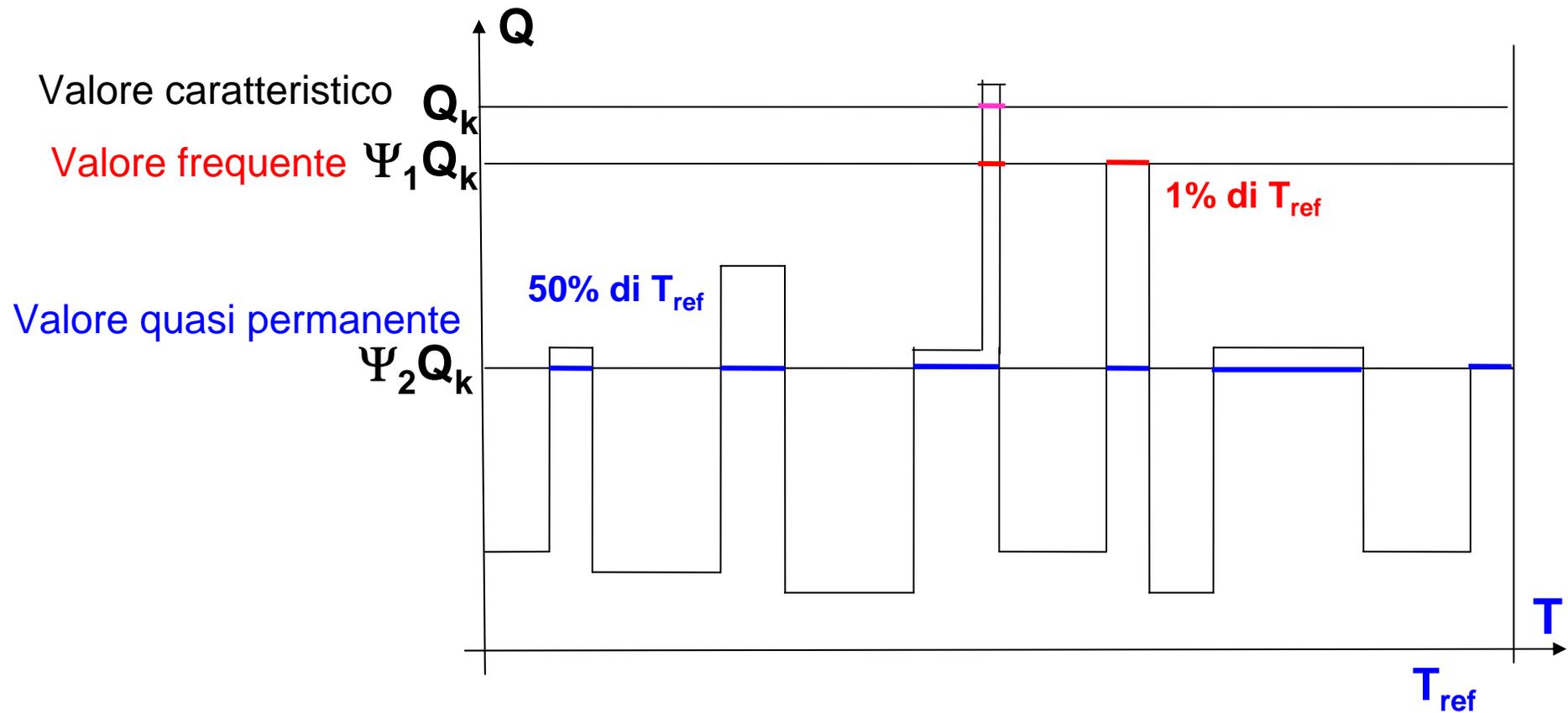
$\psi_0 Q_k$ intensità di un'azione variabile supposta contemporanea all'azione dominante

ψ_0 tiene quindi conto della ridotta probabilità di occorrenza simultanea dei valori più sfavorevoli di più azioni variabili indipendenti.

Esso è utilizzato per le verifiche agli SLU e SLE irreversibili.

Le azioni variabili Q

Sui solai degli edifici si rilevano le frazioni di tempo durante le quali Q viene superato di una % prefissata (1%, 50%)



COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE

CAT.	DESTINAZIONE	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2	COINCIDENTI CON I VALORI RACCOMANDATI EN1990
A	RESIDENZE ...	0,7	0,5	0,3	
B	UFFICI ...	0,7	0,5	0,3	
C	AFFOLLATI ...	0,7	0,5	0,6	
D	TRIBUNE ...	0,7	0,7	0,6	
E	BIBLIOTECHE ...	1,0	0,9	0,8	
F	PARCHEGGI ...	0,7	0,7	0,6	
G	RIMESSE ...	0,7	0,5	0,3	
H	COPERTURE ...	0,0	0,0	0,0	

ALTRE AZIONI

**COINCIDENTI
CON I VALORI
RACCOMANDATI
EN1990**

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
VENTO	0,6	0,2	0,0
NEVE quota ≤ 1000 m	0,5	0,2	0,0
NEVE quota > 1000 m	0,7	0,5	0,2
VARIAZIONI TERMICHE	0,6	0,5	0,0

Valore di progetto degli effetti:

$$E_d = S_d = \gamma_{Sd} g_S(\Sigma \gamma_{fi}, \psi_i, F_{ki}; a_d)$$

Σ = simbolo di combinazione

γ_{Sd} = coeff. parziale che copre le incertezze nel modellare gli effetti delle azioni e le stesse azioni

γ_{fi} = coeff. parziale che tiene conto di deviazioni sfavorevoli di F dal valore rappresentativo

ψ_i = coefficiente di combinazione

F_{ki} = valore caratteristico dell'azione

a_d = valore di progetto dei dati geometrici

Situazioni di progetto

- **Persistente** (condizione di uso normale)
- **Transiente** (condizioni temporanee- es. durante esecuzione o riparazione)
- **Eccezionale** (es. fuoco, urti, esplosioni, effetti di crolli locali ecc.)
- **Sismica**

La Verifica di sicurezza va condotta
nei confronti di:

stati limite ultimi (**classificati in 3 tipi**)

stati limite di esercizio

classificazione degli SLU secondo EN1990 e tipi di verifiche

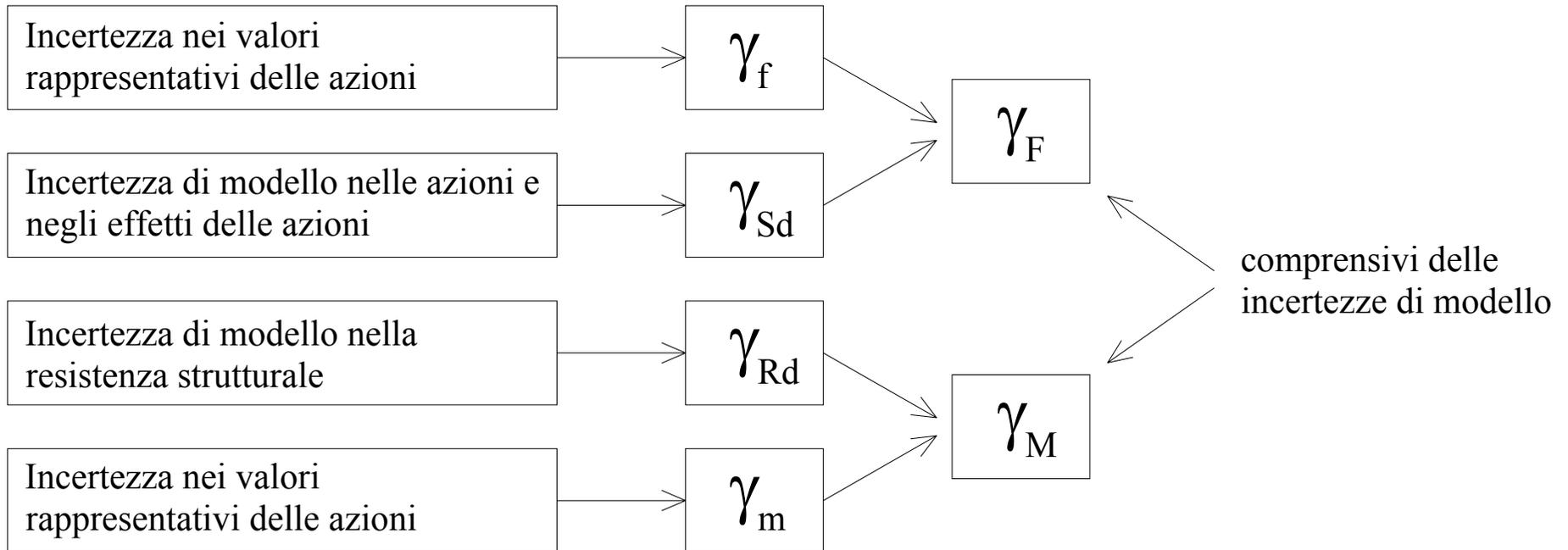
<i>Notazione</i>	<i>Definizione</i>
EQU	perdita dell'equilibrio statico della struttura o di una qualsiasi sua parte considerata come un corpo rigido , quando: <ul style="list-style-type: none">• piccole variazioni nell'intensità o nella distribuzione spaziale delle azioni provocate da una sola sorgente sono significative (es. variazioni del peso proprio, vedere Esempio 1.1)• le resistenze dei materiali da costruzione o del terreno non sono generalmente determinanti
STR	collasso interno o deformazione eccessiva della struttura o degli elementi strutturali, incluse le fondazioni, i pali, i muri di contenimento, ecc., quando il collasso è governato dalla resistenza dei materiali da costruzione della struttura
GEO	collasso o deformazione eccessiva del terreno quando le resistenze del terreno o della roccia sono determinanti nel garantire la resistenza
FAT	collasso per fatica della struttura o degli elementi strutturali

TIPI DI VERIFICHE

- EQU** SL DI EQUILIBRIO COME CORPO RIGIDO
(TERRENO ININFLUENTE: GALLEGGIAMENTO)
- STR** SL DI RESISTENZA DELLE STRUTTURE
("TERRENO FORTE – STRUTTURA DEBOLE")
- GEO** SL DI RESISTENZA DEL TERRENO
("TERRENO DEBOLE – STRUTTURA FORTE")

COMBINAZIONI DELLE AZIONI

SIMBOLOGIA



COMBINAZIONI DELLE AZIONI

- FONDAMENTALE (SLU)

$$\gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}\psi_{02}Q_{k2} + \dots$$

- CARATTERISTICA (SLE IRREVERSIBILE)

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02}Q_{k2} + \dots$$

- FREQUENTE (SLE REVERSIBILE)

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11}Q_{k1} + \psi_{22}Q_{k2} + \dots$$

- QUASI PERMANENTE (SLE DI LUNGA DURATA)

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21}Q_{k1} + \psi_{22}Q_{k2} + \dots$$

AZIONI PERMANENTI

G_1 e G_2

G_1 = peso proprio di tutti gli elementi strutturali;
e dei carichi permanenti portati **compiutamente definiti.**

peso proprio del terreno, quando pertinente;

forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno);

forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo);

G_2 = peso proprio di tutti gli elementi non strutturali.
e dei carichi permanenti portati **non compiutamente definiti.**

COEFFICIENTI PARZIALI PER LE AZIONI

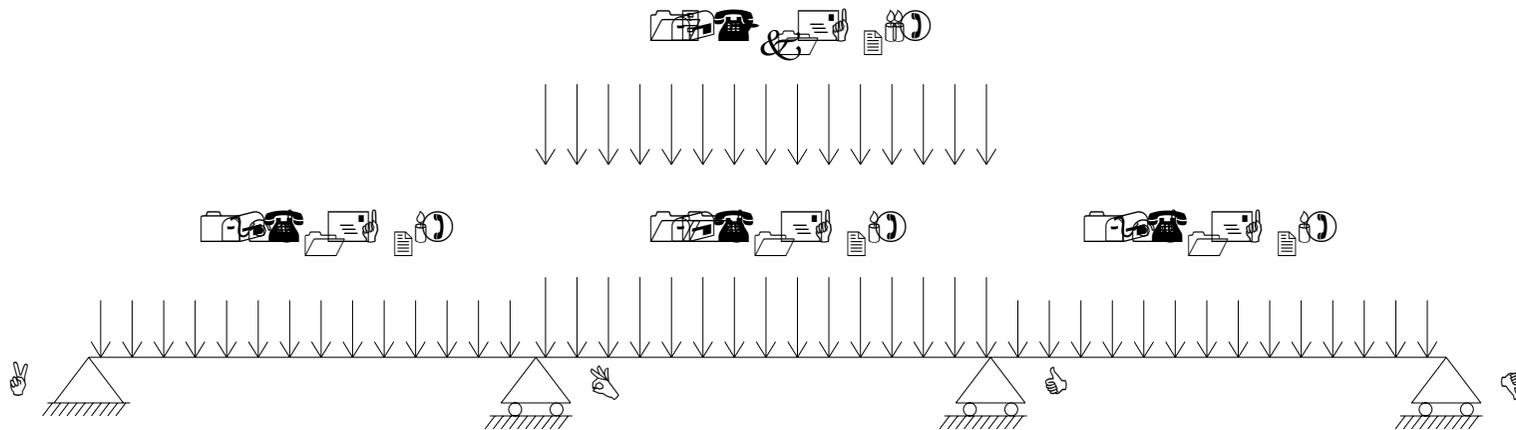
	γ_{G1} fav	γ_{G1} sfa	γ_{G2} fav	γ_{G2} sfa	γ_Q fav	γ_Q sfa	γ_ϕ	$\gamma_{c'}$	γ_{cu}
EQU	0,9	1,1	0,0	1,5	0,0	1,5	1,25*	1,25*	1,4*
STR	1,0	1,3	0,0	1,5	0,0	1,5	1,25*	1,25*	1,4*
GEO	1,0	1,0	0,0	1,3	0,0	1,3	1,25*	1,25*	1,4*

* PER IL CALCOLO DELLE SPINTE ATTIVE

Esempio 1.1. Combinazioni delle azioni agli SLU di una trave continua

Per la verifica dei dispositivi **antisollevamento** degli appoggi di estremità

EQU - *Equilibrio statico (Insieme A= Insieme EQU-NTC)*



peso proprio

G1

carico permanente portato

$G2 = G'_2 + G''_2$

G'_2 = carico permanente **compiutamente definito,**

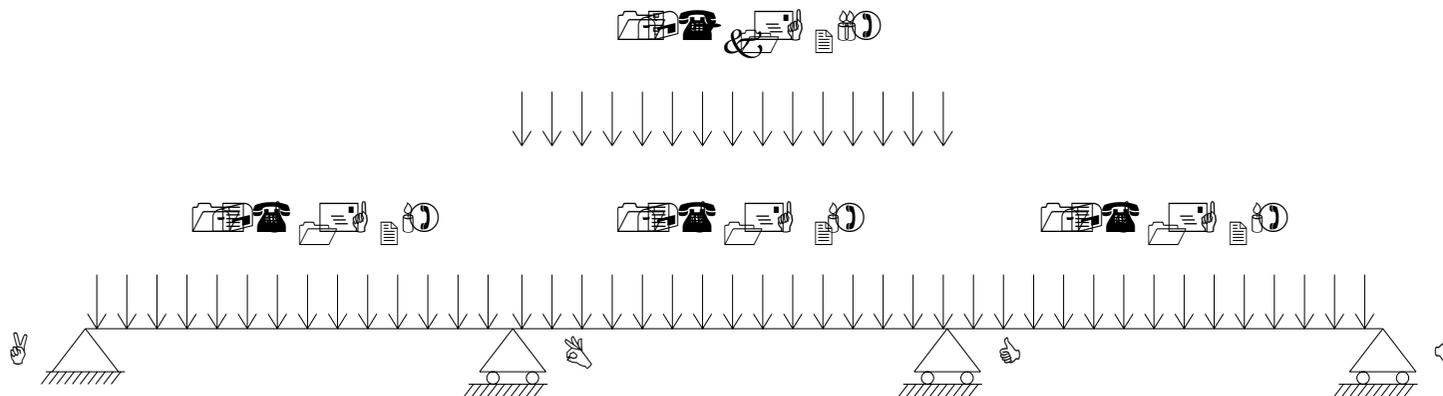
G''_2 = carico permanente **non compiutamente definito,**

Q_{k1} = carico di esercizio

Esempio 1.1. Combinazioni delle azioni agli SLU di una trave continua

Per la **verifica a flessione** della campata B C.

STR - Verifica a flessione in campata (Insieme B= Insieme A1-NTC)



peso proprio

G_1

carico permanente portato

$G_2 = G'_2 + G''_2$

G'_2 = carico permanente **computamente definito**,

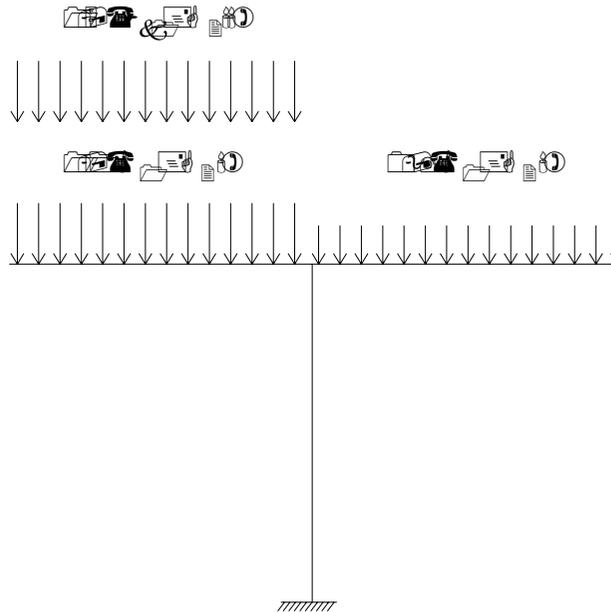
G''_2 = carico permanente **non computamente definito**,

Q_{k1} = carico di esercizio

Esempio 1.2. Combinazioni delle azioni agli SLU di una tettoia

Per la verifica al ribaltamento

EQU - *Equilibrio statico (Insieme A= Insieme EQU-NTC)*



peso proprio

G1

carico permanente portato

G2 = G'2 + G''2

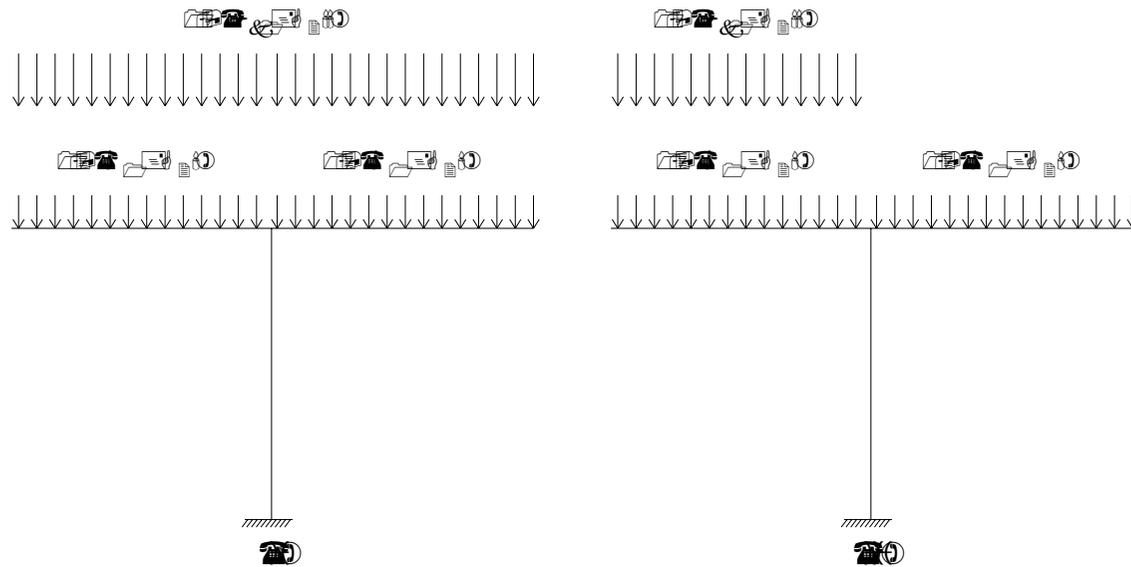
G'2 = carico permanente **compiutamente definito,**

G''2 = carico permanente **non compiutamente definito,**

Qk1 = carico di esercizio = neve

Esempio 1.2. Combinazioni delle azioni agli SLU di una tettoia

STR - *Verifica di resistenza del pilastro* (Insieme B= Insieme A1-NTC)



verifica a compressione

verifica a pressoflessione

2.7 VERIFICHE ALLE TENSIONI AMMISSIBILI

Ammessa solo per:
costruzioni di tipo 1 e 2
Classe d'uso I e II,
limitatamente a siti ricadenti in Zona 4

TIPOdi COSTRUZIONE

TIPO 1	OPERE PROVVISORIE	10 anni
TIPO 2	OPERE ORDINARIE	50 anni

CLASSI D'USO (o DI IMPORTANZA) delle COSTRUZIONI

I	RARO AFFOLLAMENTO	$C_U = 0,7$
II	NORMALE AFFOLLAMENTO	$C_U = 1,0$

SISMICITA'

Zona 4