

## **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

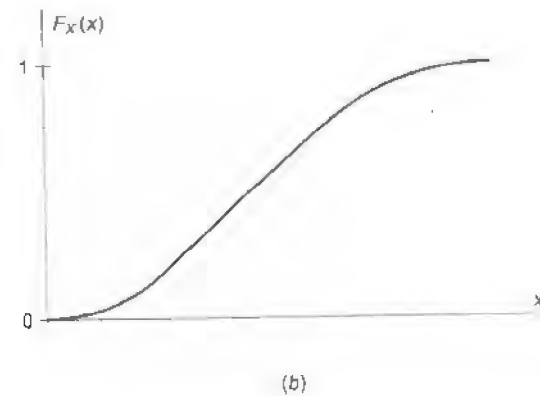
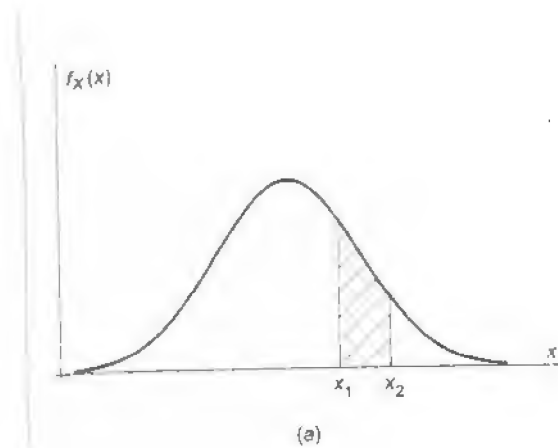
- **DM LL.PP.11 marzo 1988**
- **DM LL.PP. 16 gennaio 1996**
- **EC7: Geotechnical Design**
  - **Part 1: criteri generali**
  - **Part 2: caratterizzazione geotecnica**
- **OPCM 3274 (3431, 3519): Progetto Fondazioni e Opere di Sostegno dei terreni**
- **EC8-part5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects**
- **Testo Unico Settembre 2005**

# **LA MISURA DELLA SICUREZZA**

- **Comportamento Struttura**
  - Stato limite ultimo
  - Stato limite di servizio
- **Fonti di incertezza**
  - Caratteristiche materiale
  - Azioni applicate
  - Dimensioni geometriche
  - Valori di calcolo delle sollecitazioni (incertezze dei modello)
- **Analisi probabilistica**

## RICHIAMI: VARIABILI ALEATORIE

- $X$  = variabile aleatoria;
- $x$  = valore che la variabile può assumere;
- $f_X(x)$  = funzione di densità di probabilità o distribuzione di probabilità;
- $F_X(x)$  = funzione di distribuzione cumulativa



## DEFINIZIONI

- Momento del primo ordine (media)  $\mu_X = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x) dx$
- Momento del secondo ordine (varianza)  $\text{Var}(X) = \sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^2 f_X(x) dx$
- Deviazione standard  $\sigma_X$
- Coefficiente di variazione  $\text{COV} = \sigma_X / \mu_X$
- Covarianza  $\text{Cov}(X, Y) = \iint (x - \mu_X)^2 (y - \mu_Y)^2 f_X(x, y) dx dy$
- Coefficiente di correlazione  $r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$
- Probabilità unione (almeno uno, ... o .... o, somma)
- Probabilità intersezione (tutti e due ... e ... e, prodotto)



Per questo motivo, quando ci si riferisce ai *valori medi*, indicati come  $E[R]$ ,  $E[S]$ , il coefficiente di sicurezza viene definito *coefficiente di sicurezza centrale*, ossia

$$CFS \stackrel{\text{def}}{=} \frac{E[R]}{E[S]} \quad (3.10)$$

Poiché la resistenza del sistema e la sollecitazione sono variabili aleatorie, risulterà tale anche il coefficiente di sicurezza appena definito. Ne segue che, se le distribuzioni di  $R$  e  $S$  presentano zone di sovrapposizione, come mostrato in Figura 3.2, anche in presenza di un accettabile valore di  $CFS$  o di  $CFS$  può sussistere evidentemente una certa probabilità di rottura, espressa dalla relazione

$$p_f = P\{R \leq S\} \quad (3.11)$$

Utilizzando le definizioni (3.1) e (3.3), la (3.11) corrisponde all'evento combinato espresso dalla probabilità  $P\{s \leq S \leq s + ds\}$  e dalla probabilità  $P\{R \leq s\}$ , ossia

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(s) F_R(s) ds \quad (3.12)$$

Un modo conveniente di valutare la probabilità di rottura è quello di far riferimento al *marginale di sicurezza*  $MS$ , definito come

$$MS \stackrel{\text{def}}{=} R - S \quad (3.13)$$

$MS$  sarà anch'esso una variabile aleatoria, caratterizzata da momenti del primo e secondo ordine stimabili applicando le considerazioni che seguono (si veda per maggiori dettagli il testo di Benjamin e Cornell, 1970).

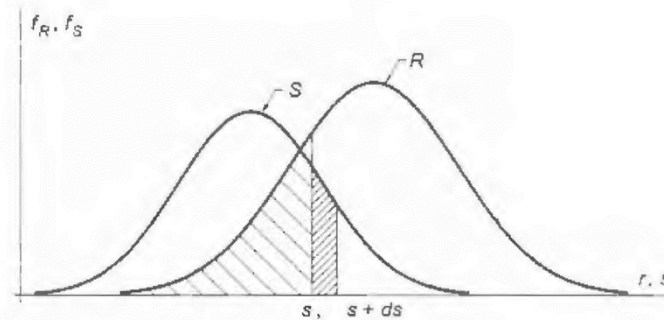


Figura 3.2 Probabilità di rottura.

## **EUROCODICI (Livello 1 semi - empirico)**

- **R ed S indipendenti**
- **Si fissano i valori estremi sulla base di una prefissata probabilità (valori caratteristici)**
- **Valori di progetto (dai valori caratteristici attraverso opportuni fattori di sicurezza parziali);**
- **$R > S$**

$$U = \frac{MS - \mu_{MS}}{\sigma_{MS}}$$

caratterizzata da una media nulla e da una deviazione standard unitaria. Se si definisce *indice di affidabilità* il rapporto

$$\beta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\mu_{MS}}{\sigma_{MS}} \quad (3.20)$$

la probabilità di rottura risulta espressa da

$$p_f = P\{U \leq -\beta\} = F_U(-\beta) \quad (3.21)$$

nella quale  $F_U$  è una generica funzione di distribuzione cumulativa. Indipendentemente dalla scelta di tale funzione, si può osservare come la probabilità di rottura sia tanto minore quanto maggiore risulta il valore dell'indice di affidabilità o, in base alla (3.20), quanto minore è il coefficiente di variazione del margine di sicurezza.

Analoghe considerazioni si applicano alla definizione del coefficiente di sicurezza e l'Esercizio 3.1 illustra la relazione esistente tra il coefficiente di sicurezza centrale e l'indice di affidabilità.

Nel caso in cui, per pura convenienza analitica, si faccia riferimento alla distribuzione normale, definita dalla legge

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(x-E[x])^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (3.22)$$

la probabilità associata all'area tratteggiata in Figura 3.3 è data da

$$\psi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (3.23)$$

nella quale

$$u = \left| \frac{x - E[x]}{\sigma} \right|$$

è la variabile standardizzata (sempre positiva), e la *probabilità di rottura* sarà data dall'espressione

$$p_f = \frac{1}{2} - \psi(\beta) \quad (3.24)$$

A conclusione di queste premesse, la Tabella 3.1 riporta la relazione tra la probabilità di rottura e l'indice di affidabilità per una distribuzione norma-

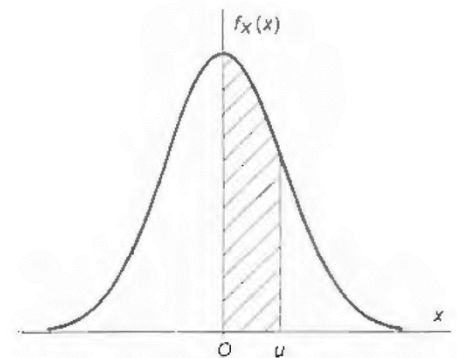


Figura 3.3 Distribuzione normale standardizzata.

## Eurocodici

- Valori caratteristici delle azioni ( $G_k, Q_k, A_k$ ) = valori rappresentativi per i quali sussiste una certa probabilità di non superamento in un dato intervallo di tempo;
- Valori caratteristici dei parametri relativi al comportamento meccanico (valori che comportano una certa probabilità di non superamento)  $f_{ck} = \mu_{fc} - 1.64 \cdot \sigma_{fc}$  (probabilità del 95%)
- Resistenza al taglio dei terreni (valore caratteristico = stima cautelativa)

*cut*

## EC7: FATTORI DI SICUREZZA

PARZIALI:  $E_d \leq R_d$

$$F_{\text{rep}} = \psi \cdot F_k \quad F_d = \gamma_F \cdot F_{\text{rep}} \quad X_d = X_k / \gamma_M$$

$$a_d = a_{\text{nom}} \pm \Delta a$$

$$E_d = E(\gamma_F \cdot F_{\text{rep}}; X_k / \gamma_M; a_d)$$

$$E_d = \gamma_E \cdot E(F_{\text{rep}}; X_k / \gamma_M; a_d)$$

$$R_d = R(\gamma_F \cdot F_{\text{rep}}; X_k / \gamma_M; a_d)$$

$$R_d = R(\gamma_F \cdot F_{\text{rep}}; X_k; a_d) / \gamma_R$$

$$\underline{R_d = R(\gamma_F \cdot F_{\text{rep}}; X_k / \gamma_M; a_d) / \gamma_R}$$

## **AZIONI**

- **Azioni dirette**
  - **Peso proprio struttura**
  - **Sovraccarichi permanenti**
  - **Sovraccarichi derivanti dall'utilizzo della struttura**
  - **Spinta delle terre o pressione dei liquidi**
- **Azioni indirette**
  - **Variazioni termiche**
  - **Cedimenti, spostamenti, ...**
  - **Ritiro, rigonfiamento, viscosità**
  - **Moto sismico**
  
- **Azioni permanenti (peso proprio, G)**
- **Azioni variabili (carichi di esercizio, vento, neve, Q)**
- **Azioni accidentali (esplosioni, urto veicoli, azioni sismiche, A)**

## VALORI CARATTERISTICI DELLE AZIONI

$$F_k = F_m (1 \pm 1.64 \cdot COV)$$

- PESO PROPRIO (dimensioni nominali e valore medio delle masse volumiche)
- ALTRE AZIONI PERMANENTI (incertezze su dimensioni e masse volumiche: si veda CNR-UNI 10002
  - Sperimentazione specifica (casi non ricorrenti)
  - Fissare limite superiore e inferiore ( $COV > 0.1$  o alterazione col tempo)
- AZIONI VARIABILI: CNR – UNI 10006
- AZIONI SISMICHE (OPCM3274, EC8)

## **PROPRIETA' DEI MATERIALI: VALORI CARATTERISTICI E DI PROGETTO**

### **Calcestruzzo:**

- resistenza a compressione  $f_{ck} = f_{cm} (1 - 1.64 \cdot COV)$ ;
  - dimensioni del provino
  - condizioni di stagionatura
  - specifiche per il confezionamento (resistenza, inerte, consistenza)
- resistenza a trazione, flessione e modulo di deformabilità sono funzione della resistenza a compressione
- resistenza a compressione (valore di progetto)  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$   
( $\gamma_c = 1.5 - 1.3$ )



## PROPRIETA' DEI MATERIALI: VALORI CARATTERISTICI E DI PROGETTO

### Acciaio:

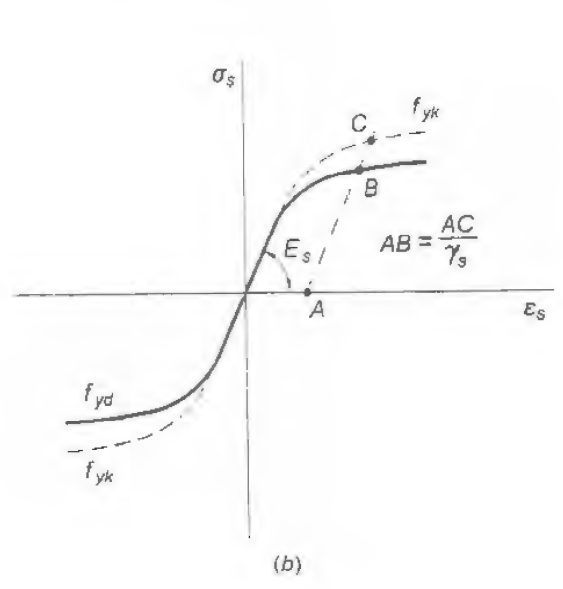
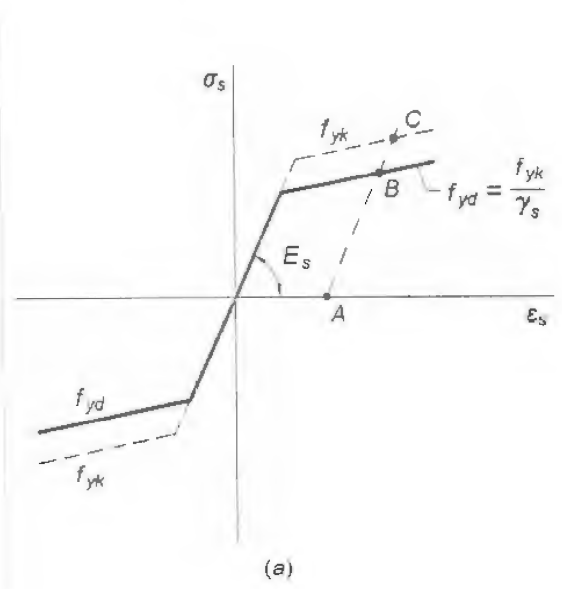
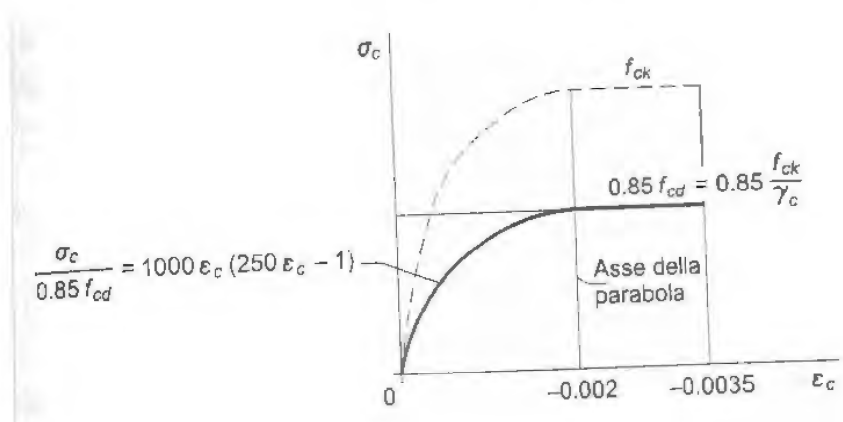
- tensione di snervamento valore caratteristico  
 $f_{yk} = f_{ym} (1 - 1.64 \cdot COV)$

- DM 9/1/96

	$f_{yk}$ [MPa]	$f_{tk}$ [MPa]	$f_{yd}$ [MPa]
FeB38k	375	450	326
FeB44k	430	540	374

- EC2  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  ( $\gamma_s = 1.15 - 1.0$ )

# DIAGRAMMI SFORZI-DEFORMAZIONI DI PROGETTO





### 3.5.2 Definizione di stato limite

Una struttura raggiunge uno *stato limite* quando cessa di svolgere una o tutte le funzioni per le quali è stata progettata, violando così, in parte o completamente, i requisiti di progetto.

In base a tale definizione si opera la distinzione tra *stati limite ultimi*, legati alla capacità della struttura di resistere alle azioni di progetto e *stati limite di servizio*, corrispondenti all'uso ordinario della struttura e alla sua durabilità.

I rischi connessi al raggiungimento di uno stato limite riguardano sia quelli legati alla perdita di vite umane o ai danni alle persone (comprese le conseguenze derivanti dalla reazione dell'opinione pubblica nel caso di un evento di collasso), sia quelli di natura economica, legati in special modo a un'interruzione del servizio della struttura, alla sua riparazione e ai danni indotti alle strutture adiacenti o all'ambiente con il quale la struttura interagisce.

Il raggiungimento di uno *stato limite ultimo* si identifica con una delle seguenti circostanze:

- perdita di equilibrio del complesso strutturale, considerato come corpo rigido;
- trasformazione della struttura in un meccanismo;
- raggiungimento del valore ultimo della resistenza in una sezione;

Tabella 3.8 Vita utile di alcune strutture (Pugsley, 1966).

Automobili	150 000 km o 10 anni
Aerei	30 000 ore di volo o 10 anni
Imbarcazioni	40 anni
Edifici di abitazione	100 anni
Uffici	50 anni
Fabbriche	40 anni
Depositi	80 anni
Ponti stradali	100 anni
Ponti ferroviari	80 anni
Opere portuali	200 anni
Chiese	500 anni
Cattedrali	1000 anni

## **EC7: STATI LIMITE ULTIMO**

**Stati Limite da prendere in considerazione:**

- **EQU: perdita di equilibrio (corpo rigido)**
- **STR: rottura o deformazioni eccessive elementi strutturali**
- **GEO: rottura o eccessivi cedimenti terreno**
- **UPL: sollevamento (sovrappressioni)**
- **HYD: sifonamento (gradienti idraulici)**

## **EC7: STATI LIMITE DI SERVIZIO**

**Stati Limite da prendere in considerazione:**

- **Fessurazione del cls (durabilità, estetica)**
- **Deformazioni (funzionalità, danni a elementi non strutturali)**
- **Vibrazioni (disturbi alle persone, funzionalità)**

## PROPRIETA' DEI MATERIALI: VALORI CARATTERISTICI E DI PROGETTO

### Calcestruzzo:

- resistenza a compressione  $f_{ck} = f_{cm} (1 - 1.64 \cdot COV)$ ;
  - dimensioni del provino
  - condizioni di stagionatura
  - specifiche per il confezionamento (resistenza, inerte, consistenza)
- resistenza a trazione, flessione e modulo di deformabilità sono funzione della resistenza a compressione
- resistenza a compressione (valore di progetto)  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$   
( $\gamma_c = 1.5 - 1.3$ )

## PROPRIETA' DEI MATERIALI: VALORI CARATTERISTICI E DI PROGETTO

### Acciaio:

- tensione di snervamento valore caratteristico  
 $f_{yk} = f_{ym} (1 - 1.64 \cdot COV)$

- DM 9/1/96

	$f_{yk}$ [MPa]	$f_{tk}$ [MPa]	$f_{yd}$ [MPa]
<b>FeB38k</b>	<b>375</b>	<b>450</b>	<b>326</b>
<b>FeB44k</b>	<b>430</b>	<b>540</b>	<b>374</b>

- EC2  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  ( $\gamma_s = 1.15 - 1.0$ )



## COMBINAZIONE DELLE AZIONI: VALORI RAPPRESENTATIVI

**SLU:**

- a) **Situazioni persistenti o transitorie**
- b) **Situazioni accidentali**
- c) **Azioni sismiche**

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \mathbf{G}_{K,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*j} \mathbf{G}_{K,j}^* + \gamma_P \mathbf{P}_K + \gamma_{Q,1} \mathbf{Q}_{K,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} \mathbf{Q}_{K,i}$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \mathbf{G}_{K,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*j} \mathbf{G}_{K,j}^* + \gamma_P \mathbf{P}_K + \gamma_A \mathbf{A}_K + \gamma_{Q,1} \Psi_{1,1} \mathbf{Q}_{K,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} \mathbf{Q}_{K,i}$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \mathbf{G}_{K,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*j} \mathbf{G}_{K,j}^* + \gamma_P \mathbf{P}_K + \gamma_A \mathbf{A}_{E,K} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} \mathbf{Q}_{K,i}$$

## STATI LIMITE

- SLU
  - Perdita equilibrio (EQU)
  - Rottura fondazione (STR)
  - Rottura terreno (GEO, HYD, UPLIFT)
  - Spostamenti e deformazioni eccessive (GEO)
- SLE
  - Spostamenti e deformazioni che possono compromettere uso, estetica, durabilità oltverosia il corretto funzionamento nel tempo dell'opera

## STATI LIMITE – AZIONE SISMICA

- $V_R = V_N * C_U (10 - 50 - 100) (0.7 - 1.0 - 1.5 - 2.0) (V_R > 35)$
- SLO (81%)
- SLD (63 %)
- SLU (10 %)
- SLC (5 %)

## AZIONE SISMICA

- $a_{gR}(\text{Tr})$   
(<http://essel.mi.ingv.it>)  
(allegato norma)
- $S_s(V_{s30}, F_o)$
- $S_T(1.0 - 1.2 - 1.4)$ 
  - $1.40 - 0.40 \cdot F_o \cdot a_{gR} / g \leq 1.20$
  - $1.70 - 0.60 \cdot F_o \cdot a_{gR} / g \leq 1.50$
  - $2.40 - 1.50 \cdot F_o \cdot a_{gR} / g \leq 1.80$
  - $2.00 - 1.10 \cdot F_o \cdot a_{gR} / g \leq 1.60$

ID	LON	LAT	I <sub>R</sub> =30			I <sub>R</sub> =50			I <sub>R</sub> =72			I <sub>R</sub> =101			I <sub>R</sub> =140			I <sub>R</sub> =201			I <sub>R</sub> =475			I <sub>R</sub> =975			I <sub>R</sub> =2475		
			a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>	a <sub>R</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub>
13111	6.5448	45.134	0.263	2.50	0.18	0.340	2.51	0.21	0.394	2.55	0.22	0.469	2.49	0.24	0.545	2.50	0.24	0.640	2.49	0.25	0.943	2.44	0.27	1.267	2.42	0.27	1.767	2.43	0.29
13333	6.5506	45.085	0.264	2.49	0.18	0.341	2.51	0.21	0.395	2.55	0.22	0.469	2.49	0.24	0.543	2.50	0.24	0.636	2.50	0.25	0.935	2.44	0.27	1.254	2.42	0.28	1.751	2.44	0.29
13555	6.5564	45.035	0.264	2.50	0.18	0.340	2.51	0.20	0.393	2.55	0.22	0.466	2.50	0.24	0.540	2.51	0.24	0.630	2.51	0.25	0.923	2.45	0.27	1.237	2.43	0.28	1.729	2.44	0.29
13777	6.5621	44.985	0.263	2.50	0.18	0.338	2.52	0.20	0.391	2.55	0.22	0.462	2.51	0.24	0.535	2.51	0.24	0.621	2.52	0.25	0.909	2.46	0.27	1.217	2.44	0.28	1.703	2.44	0.29
12890	6.6096	45.188	0.284	2.46	0.19	0.364	2.51	0.21	0.431	2.50	0.22	0.509	2.48	0.24	0.585	2.50	0.24	0.695	2.47	0.25	1.006	2.44	0.27	1.338	2.43	0.27	1.844	2.44	0.29
13112	6.6153	45.139	0.286	2.46	0.19	0.366	2.51	0.21	0.433	2.50	0.22	0.511	2.48	0.24	0.586	2.50	0.25	0.695	2.47	0.25	1.005	2.45	0.27	1.336	2.43	0.27	1.841	2.44	0.29
13334	6.621	45.089	0.288	2.46	0.19	0.367	2.51	0.21	0.434	2.50	0.22	0.511	2.49	0.24	0.586	2.51	0.25	0.694	2.48	0.25	1.001	2.45	0.27	1.332	2.43	0.27	1.835	2.44	0.29
13556	6.6268	45.039	0.288	2.46	0.19	0.367	2.51	0.21	0.433	2.51	0.22	0.510	2.49	0.24	0.584	2.51	0.25	0.691	2.48	0.25	0.996	2.45	0.27	1.325	2.44	0.28	1.828	2.44	0.29
13778	6.6325	44.989	0.288	2.46	0.19	0.366	2.52	0.21	0.430	2.51	0.22	0.507	2.50	0.24	0.580	2.51	0.25	0.686	2.49	0.25	0.989	2.45	0.27	1.318	2.44	0.28	1.819	2.44	0.29
14000	6.6383	44.939	0.286	2.47	0.19	0.363	2.52	0.21	0.426	2.52	0.22	0.502	2.50	0.24	0.576	2.52	0.24	0.679	2.49	0.25	0.981	2.45	0.27	1.307	2.44	0.28	1.807	2.44	0.29
14222	6.6439	44.889	0.284	2.47	0.19	0.360	2.53	0.21	0.421	2.53	0.22	0.497	2.50	0.24	0.570	2.52	0.24	0.671	2.50	0.25	0.970	2.45	0.27	1.294	2.44	0.28	1.792	2.44	0.29
12891	6.6803	45.192	0.306	2.43	0.20	0.389	2.50	0.21	0.467	2.47	0.23	0.544	2.49	0.23	0.625	2.50	0.25	0.736	2.47	0.26	1.049	2.46	0.27	1.374	2.46	0.28	1.875	2.46	0.29
10228	6.6826	45.794	0.283	2.42	0.20	0.364	2.46	0.22	0.430	2.46	0.24	0.505	2.44	0.25	0.577	2.48	0.26	0.679	2.48	0.26	0.992	2.43	0.27	1.335	2.38	0.28	1.924	2.30	0.30
13113	6.686	45.143	0.309	2.43	0.20	0.391	2.51	0.21	0.470	2.47	0.23	0.546	2.49	0.23	0.627	2.50	0.25	0.737	2.48	0.26	1.048	2.46	0.27	1.373	2.46	0.28	1.873	2.46	0.29
10450	6.6885	45.745	0.278	2.44	0.20	0.356	2.48	0.22	0.415	2.50	0.23	0.485	2.47	0.25	0.553	2.49	0.26	0.639	2.50	0.27	0.913	2.49	0.28	1.242	2.37	0.29	1.742	2.33	0.30
13335	6.6915	45.093	0.310	2.43	0.20	0.392	2.51	0.21	0.470	2.48	0.23	0.546	2.50	0.23	0.626	2.51	0.25	0.736	2.48	0.26	1.046	2.46	0.27	1.370	2.46	0.28	1.870	2.46	0.29
10672	6.6942	45.695	0.275	2.45	0.20	0.351	2.49	0.21	0.406	2.52	0.23	0.475	2.49	0.25	0.541	2.52	0.25	0.618	2.53	0.26	0.862	2.54	0.28	1.125	2.54	0.29	1.543	2.55	0.30
13557	6.6973	45.043	0.311	2.44	0.20	0.392	2.52	0.21	0.469	2.48	0.23	0.545	2.50	0.23	0.624	2.51	0.25	0.733	2.48	0.26	1.042	2.46	0.27	1.366	2.46	0.28	1.866	2.46	0.29
13779	6.7029	44.993	0.310	2.44	0.20	0.391	2.52	0.21	0.467	2.48	0.23	0.543	2.50	0.23	0.621	2.51	0.25	0.730	2.49	0.26	1.038	2.46	0.27	1.363	2.45	0.28	1.863	2.46	0.29
14001	6.7086	44.943	0.309	2.44	0.20	0.389	2.52	0.21	0.464	2.49	0.23	0.540	2.50	0.24	0.616	2.52	0.25	0.726	2.49	0.26	1.033	2.46	0.27	1.358	2.45	0.28	1.860	2.46	0.29
14223	6.7142	44.893	0.307	2.45	0.20	0.386	2.52	0.21	0.460	2.49	0.23	0.536	2.51	0.23	0.611	2.52	0.25	0.721	2.49	0.26	1.027	2.46	0.27	1.353	2.45	0.28	1.854	2.45	0.29
14445	6.7198	44.843	0.305	2.45	0.20	0.383	2.53	0.21	0.456	2.50	0.22	0.531	2.51	0.24	0.605	2.52	0.25	0.715	2.49	0.26	1.021	2.46	0.27	1.347	2.45	0.28	1.848	2.45	0.29
9785	6.7426	45.898	0.315	2.37	0.20	0.403	2.41	0.22	0.500	2.37	0.24	0.585	2.44	0.25	0.690	2.40	0.26	0.814	2.40	0.26	1.190	2.37	0.27	1.587	2.34	0.28	2.281	2.26	0.30
12670	6.7452	45.246	0.323	2.44	0.20	0.412	2.49	0.22	0.496	2.46	0.23	0.573	2.49	0.24	0.664	2.48	0.25	0.773	2.48	0.26	1.092	2.46	0.27	1.414	2.47	0.28	1.910	2.48	0.29
10007	6.7482	45.848	0.306	2.39	0.20	0.394	2.45	0.22	0.479	2.39	0.24	0.561	2.44	0.25	0.655	2.46	0.26	0.774	2.44	0.26	1.141	2.39	0.27	1.530	2.35	0.28	2.211	2.27	0.30
12892	6.7508	45.196	0.328	2.44	0.20	0.419	2.48	0.21	0.503	2.46	0.23	0.580	2.49	0.24	0.672	2.48	0.25	0.781	2.48	0.26	1.102	2.47	0.27	1.423	2.48	0.28	1.918	2.48	0.29
15777	6.7533	44.544	0.286	2.46	0.19	0.365	2.52	0.21	0.430	2.51	0.22	0.509	2.49	0.24	0.584	2.50	0.25	0.694	2.47	0.26	1.011	2.43	0.28	1.356	2.41	0.29	1.893	2.42	0.30
10229	6.754	45.798	0.299	2.41	0.20	0.383	2.47	0.22	0.459	2.43	0.24	0.537	2.44	0.25	0.617	2.49	0.26	0.744	2.44	0.26	1.078	2.41	0.27	1.454	2.38	0.28	2.104	2.27	0.30
13114	6.7564	45.147	0.331	2.44	0.20	0.423	2.48	0.21	0.505	2.47	0.23	0.583	2.49	0.24	0.675	2.48	0.25	0.783	2.49	0.26	1.101	2.47	0.27	1.422	2.48	0.28	1.915	2.49	0.29
15999	6.7588	44.495	0.281	2.45	0.19	0.360	2.51	0.21	0.423	2.52	0.22	0.501	2.49	0.24	0.577	2.50	0.25	0.684	2.47	0.26	0.998	2.43	0.28	1.346	2.40	0.29	1.881	2.43	0.30
10451	6.7596	45.749	0.293	2.43	0.20	0.374	2.48	0.22	0.443	2.47	0.24	0.518	2.47	0.25	0.590	2.49	0.26	0.694	2.49	0.27	1.030	2.41	0.27	1.384	2.35	0.28	1.967	2.29	0.30
13336	6.762	45.097	0.332	2.44	0.20	0.424	2.48	0.21	0.506	2.47	0.23	0.582	2.50	0.24	0.673	2.49	0.25	0.780	2.49	0.26	1.096	2.48	0.27	1.415	2.48	0.28	1.909	2.48	0.29
16221	6.7643	44.445	0.271	2.48	0.18	0.351	2.50	0.21	0.411	2.52	0.22	0.488	2.47	0.24	0.562	2.49	0.24	0.660	2.48	0.26	0.955	2.44	0.28	1.278	2.43	0.29	1.801	2.46	0.31
10673	6.7653	45.699	0.290	2.43	0.20	0.369	2.50	0.22	0.434	2.49	0.24	0.506	2.49	0.24	0.576	2.51	0.26	0.672	2.50	0.27	0.953	2.52	0.27	1.258	2.51	0.28	1.739	2.52	0.29
13558	6.7677	45.047	0.333	2.45	0.20	0.423	2.49	0.21	0.504	2.48	0.23	0.580	2.50	0.24	0.669	2.50	0.25	0.776	2.50	0.26	1.089	2.48	0.27	1.408	2.48	0.28	1.902	2.48	0.29
16443	6.7698	44.395	0.261	2.50	0.18	0.339	2.51	0.20	0.393	2.55	0.22	0.464	2.51	0.24	0.536	2.52	0.24	0.620	2.53	0.26	0.895	2.50	0.28	1.195	2.50	0.29	1.711	2.49	0.31
10895	6.771	45.649	0.289	2.44	0.20	0.366	2.51	0.22	0.430	2.51	0.24	0.502	2.50	0.24	0.574	2.52	0.25	0.675	2.49	0.26	0.967	2.47	0.28	1.279	2.47	0.28	1.764	2.49	0.29
13780	6.7732	44.997	0.332	2.45	0.20	0.422	2.49	0.21	0.502	2.48	0.23	0.577	2.51	0.24	0.665	2.50	0.25	0.771	2.50	0.26	1.083	2.48	0.27	1.401	2.48	0.28	1.896	2.48	0.29
16665	6.7755	44.345	0.250	2.53	0.18	0.325	2.53	0.20	0.379	2.57	0.22	0.441	2.55	0.24	0.510	2.55	0.24	0.587	2.58	0.26	0.838	2.56	0.28	1.125	2.53	0.30	1.621	2.53	0.31
14002	6.7789	44.947	0.331	2.46	0.20	0.419	2.50	0.21	0.499	2.48	0.23	0.574	2.51	0.24	0.661	2.50	0.25	0.767	2.50	0.26	1.077	2.48	0.27	1.395	2.48	0.28	1.891	2.48	0.29
14224	6.7844	44.897	0.329	2.46	0.20	0.416	2.51	0.21	0.495	2.48	0.23	0.570	2.51	0.24	0.656	2.51	0.25	0.762	2.50	0.26	1.072	2.48	0.27	1.390	2.47	0.28	1.8		

## COMBINAZIONI

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

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

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

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21}Q_{k1} + \psi_{22}Q_{k2} + \dots \quad \text{QUASI PERMANENTE}$$

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

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

Tabella 3.10 Valori dei coefficienti  $\psi$  per edifici, suggeriti dall'EC 1.

Azione	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
<b>Carichi esterni</b>			
Categoria A: edifici di abitazione o residenziali	0.7	0.5	0.3
Categoria B: uffici	0.7	0.5	0.3
Categoria C: sale di convegni	0.7	0.7	0.6
Categoria D: edifici commerciali	0.7	0.7	0.6
Categoria E: depositi	1.0	0.9	0.8
<b>Azioni dovute al traffico su strutture</b>			
Categoria F: peso di un veicolo $\leq 30$ kN	0.7	0.7	0.6
Categoria G: $30$ kN $\leq$ peso di un veicolo $\leq 160$ kN	0.7	0.5	0.3
Categoria H: coperture	0	0	0
<b>Carico di neve</b>	0.6*	0.2*	0*
<b>Azione del vento</b>	0.6*	0.5*	0*
<b>Effetti termici (esclusi quelli da incendio)</b>	0.6*	0.5*	0*

\* È possibile che i valori indicati subiscano modifiche a seconda della collocazione geografica dell'edificio

$$c) \quad 1.35 \cdot G_1 + 1.35G_2 + 1.5Q \quad (3.63)$$

Per gli stati limite di esercizio i valori di progetto dei carichi permanenti, dei carichi variabili e delle distorsioni sono presi uguali ai corrispondenti valori caratteristici

### 3.7 Combinazione delle azioni

Nella combinazione delle azioni vengono introdotti dei coefficienti di combinazione  $\psi$  (il cui valore è precisato in Tabella 3.10), per tener conto della scarsa probabilità che le azioni variabili possano esercitare i loro effetti contemporaneamente con la massima intensità.

Inoltre, in presenza di azioni sismiche o di azioni aventi carattere di eccezionalità non si richiede che la struttura **non subisca danni**, ma semplicemente che **non subisca danni irreparabili** e in particolare che non arrivi al collasso.

Per i suddetti motivi, nella combinazione delle azioni si introducono innanzitutto tre valori rappresentativi delle azioni:

- i) un valore di combinazione  $\psi_0 Q_k$  *1.35*
- ii) un valore frequente  $\psi_1 Q_k$
- iii) un valore quasi permanente  $\psi_2 Q_k$

Definiti i suddetti valori, le diverse combinazioni delle azioni possono essere rappresentate simbolicamente come segue (il termine simbolicamente

index 'k' indicates a design value equal to the characteristic value (application of a partial factor  $\gamma$  equal to 1.0). More details on the use of the three Design Approaches are given, for instance, in Frank et al. (2004).

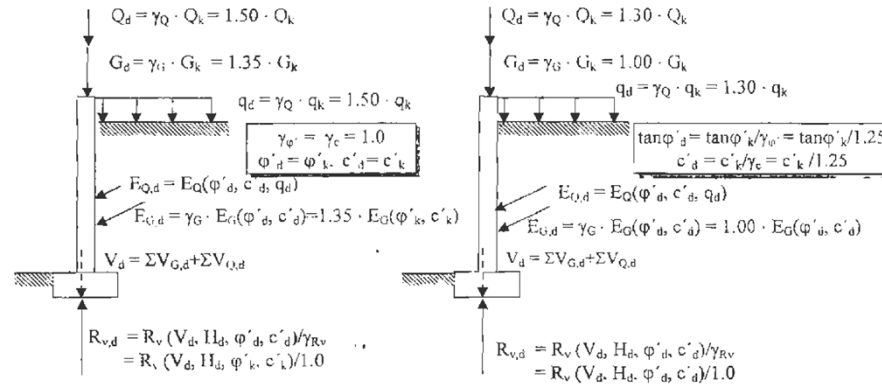


Fig. 2: Design Approach 1 - introduction of partial factors (recommended values) in the checking of ground bearing capacity using Combination 1 (left), Combination 2 (right). For simplicity, only vertical equilibrium is considered and only unfavourable actions have been shown in this figure.

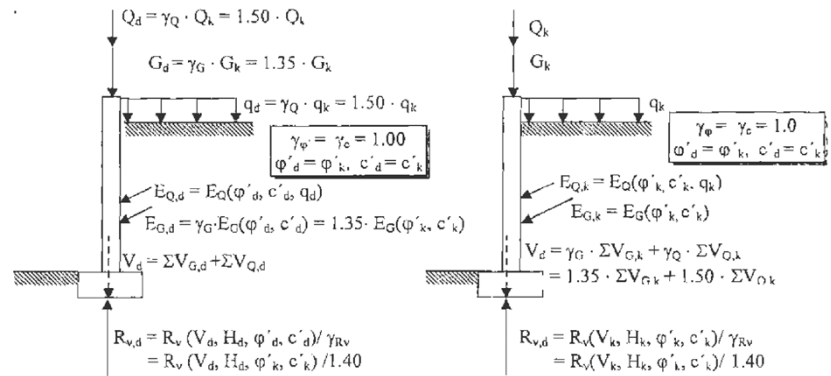


Fig. 3: Introduction of partial factors (recommended values) in the verification of ground bearing capacity using Design Approach 2, left: factoring actions at the source, Design Approach DA2, right: factoring effects of actions, Design Approach DA2\*. For simplicity, only vertical equilibrium is considered and only unfavourable actions have been shown in this figure.



# STATO LIMITE DI ESERCIZIO

## Coefficienti di combinazione

Azione	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Edifici di abitazione	0.7	0.5	0.3
Uffici	0.7	0.5	0.3
Sale convegni	0.7	0.7	0.6
Edifici commerciali	0.7	0.7	0.6
Depositi	1.0	0.9	0.8

## **APPROCCI DI CALCOLO – FOND. SUP.**

- **APPROCCIO 1**
  - **COMBINAZIONE 1 (A1 + M1 + R1)**
  - **COMBINAZIONE 2 (A2 + M2 + R2)**
- **APPROCCIO 2 (A1 + M1 + R3)**

## FATTORI DI SICUREZZA PARZIALI AZIONI

Coefficiente	EQU	HYD	A1 -STR	A2 - GEO
$\gamma_{G1}$	0.90	0.90	1.00	1.00
	1.10	1.30	1.30	1.00
$\gamma_{G2}$	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.50	1.50	1.50	1.30
$\gamma_Q$	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.50	1.50	1.50	1.30


## Coefficienti $\gamma_R$

Verifica	R1	R2	R3
Capacità portante (valori per muri)	1.00 (1.00)	1.80 (1.00)	2.30 (1.40)
Scorrimento (valori per muri)	1.00 (1.00)	1.10 (1.00)	1.10 (1.10)

# STATO LIMITE ULTIMO

Coefficienti parziali per il terreno (DM 15.9.2005)

Parametro		M1	M2	EC8
$C_u$	Resistenza al taglio non drenata	1.00	1.40	1.40
$\tau_{cy,u}$	Resistenza al taglio ciclica non drenata	-	-	1.25
$\phi'$	Angolo di resistenza al taglio	1.00	1.25	1.25
$q_u$	Resistenza compressione non confinata	1.00	1.60	1.6
$c'$	Coesione efficace	1.00	1.25	1.25
$\gamma$	Peso di volume	1.00	1.00	1.00

Condizione sismica:  $\gamma_E, \gamma_G, \gamma_P$  e  $\gamma_Q$  unitari;  $\gamma_M$  

## **STATO LIMITE ULTIMO**

$$\mathbf{E_d \leq R_d}$$

**Collasso per slittamento (Comb. sismica)**

$$\mathbf{V_d < F_{Rd} + E_{pd}}$$

**Collasso per rottura generale (Comb. rara)**

$$\mathbf{N_d < Q_{lim,d}}$$
$$\mathbf{f(N_d, V_d, M_d) < 0}$$

## **STATO LIMITE DI ESERCIZIO**

$$E_d \leq C_d$$

- $s_0$  cedimento immediato (rara)**
- $s_1$  cedimento di consolidazione (q-p)**
- $s_2$  cedimento dovuto al creep (q-p)**

$$s_{tot} = s_0 + s_1 + s_2$$

- Sollevamento (rigonfiamento)**
  
- Vibrazioni (apparati meccanici, sisma)**

# STATO LIMITE DI ESERCIZIO

$$E_d \leq C_d \text{ (EC7)}$$

**Coefficienti parziali  $\gamma_M = 1$**

**Combinazione di carico rara ( $s_0$ )**

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q,l} Q_{k,l} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \gamma_{Q,i} Q_{k,i}$$

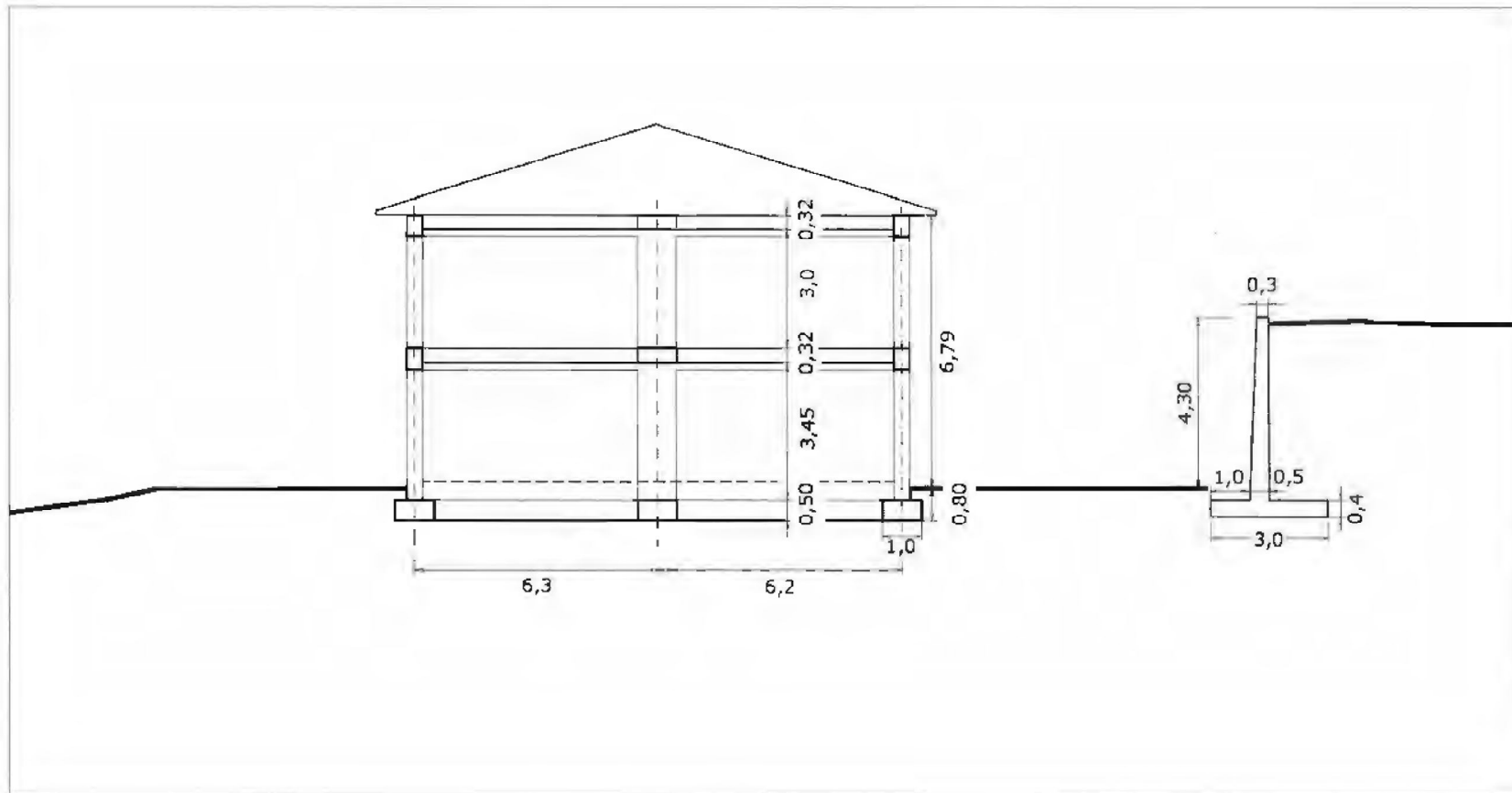
**Comb. di carico quasi permanente ( $s_1, s_2$ )**

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \gamma_{Q,i} Q_{k,i}$$



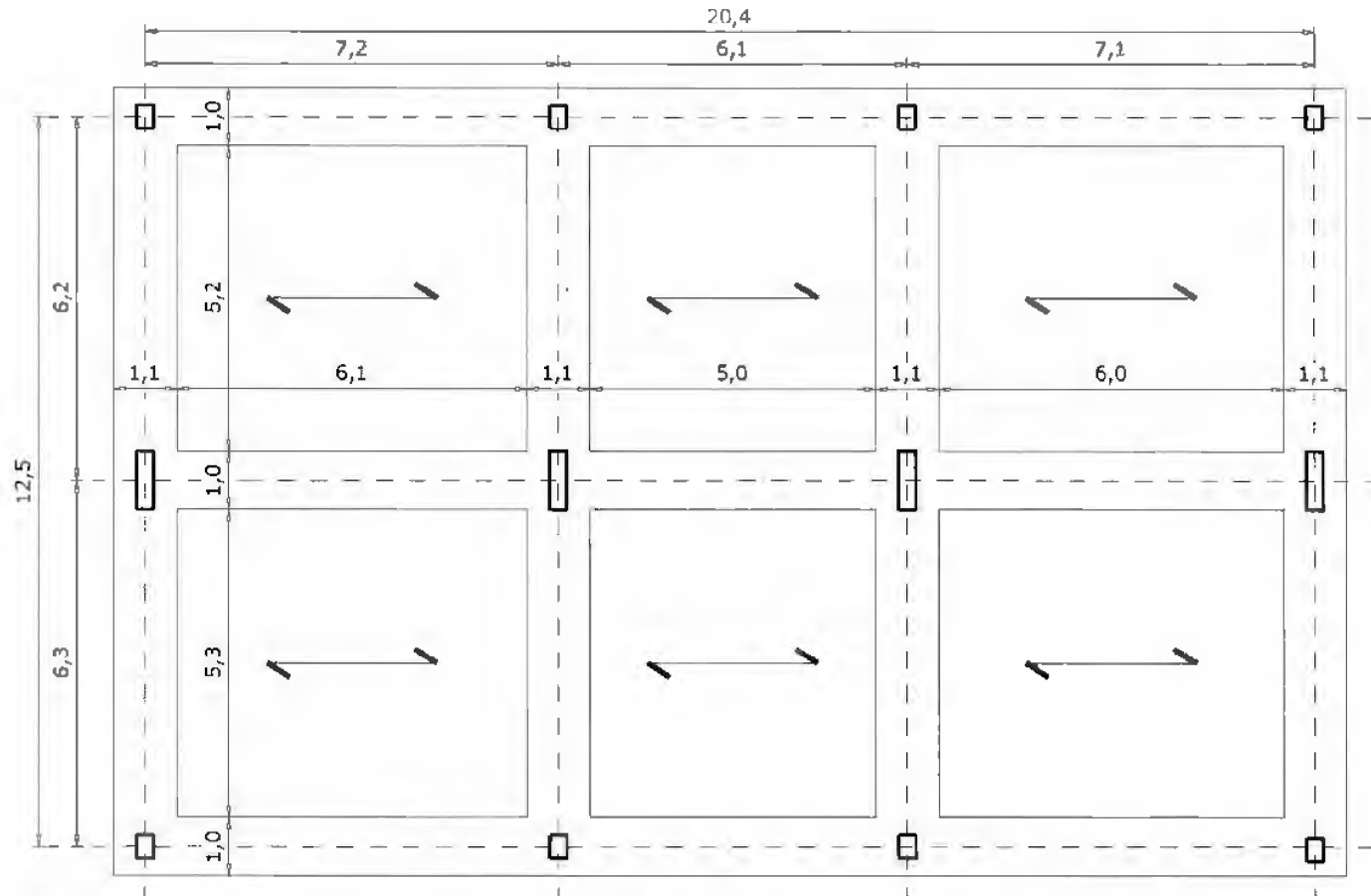
**ESEMPIO**

## Trave di fondazione in C.A.



# ESEMPIO

## Trave di fondazione in C.A.



## Trave di fondazione in C.A. Analisi dei Carichi

soffitto	3,50 kN/m <sup>2</sup> ;
pavimento e allettamento	1,30 kN/m <sup>2</sup> ;
tamponamenti interni per unità di superficie in pianta	0,80 kN/m <sup>2</sup> ;
tamponamenti esterni per unità di lunghezza	8,50 kN/m;
manto di copertura in tegole di laterizio	0,50 kN/m <sup>2</sup> ;
tavelloni e soletta di copertura di c.a.	1,50 kN/m <sup>2</sup> ;
muretti a nido d'ape a sostegno della copertura per unità di superficie in pianta	0,80 kN/m <sup>2</sup> ;
peso di volume del cemento armato	25,0 kN/m <sup>3</sup> ;
sovraccarico (ambienti suscettibili di affollamento)	3,0 kN/m <sup>2</sup> ;
carico neve (riferito alla proiezione orizzontale)	2,2 kN/m <sup>2</sup> ;
carico vento	0,9 kN/m <sup>2</sup> ;

$T_r = 475$  anni ( $V_r = 50$  anni,  $P_r = 10$  %)  $a_g = 0.25g$ ; Tipo  
C (1.25)

---

## Trave di fondazione in C.A. Sollecitazioni di Progetto

	A1			A2			Sismica
	I	II	III	I	II	III	
Nd	4107	3892	2289	2959	2885	2289	2611
Vd	55	78	78	47	67	67	874
Md	---	---	---	---	---	---	---
Obliquità	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.33

**I valori sono espressi in kN**

**La massima inclinazione (obliquità) dei carichi si ha in condizione di carico sismica**

## FATTORE DI SICUREZZA, MARGINE DI SICUREZZA, INDICE DI AFFIDABILITA'

- R (resistenza, capacità), S (sollecitazione, domanda);
- $FS = R / S$              $CFS = E(R) / E(S)$
- $P(R \leq S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(s) F_R(s) ds$  (Livello 3)
- Margine di sicurezza  $MS = R - S$
- $P(R \leq S) = P \left\{ \frac{MS - \mu_{MS}}{\sigma_{MS}} \leq \frac{-\mu_{MS}}{\sigma_{MS}} \right\}$  (Cornell 1969)
- $U = \frac{MS - \mu_{MS}}{\sigma_{MS}}$      $\beta = \frac{\mu_{MS}}{\sigma_{MS}}$      $P(R \leq S) = P\{U \leq -\beta\} = F_U(-\beta)$  (Livello 2)

## **EC7 – VERIFICHE GEO E STR**

$$E_d \leq R_d$$

**Tre possibili approcci con coefficienti opportunamente definiti (Design Approaches):**

- 1. Fattori parziali applicati alle azioni (C1) oppure ai parametri di resistenza del terreno (C2)**
- 2. Fattori parziali applicati alle azioni o agli effetti delle azioni e alla resistenza del terreno**
- 3. Fattori parziali applicati alle azioni o agli effetti delle azioni dalla struttura e ai parametri di resistenza del terreno**