



# LA RELAZIONE GEOTECNICA PER I PROGETTI INFRASTRUTTURALI

LE NORME TECNICHE SULLE COSTRUZIONI DM 14/1/2008  
RICHIAMI SUL CONCETTO DEGLI “STATI LIMITE”

Geol. Ing. Massimo Pietrantoni



## Richiami sul concetto degli “Stati Limite” – DM14/1/2008

- La sicurezza e le prestazioni devono essere valutate in relazione a:
  - ✓ “**Stati Limite**” Ultimo (SLU) e di Esercizio (SLE) che si possono raggiungere durante la vita nominale dell’opera
  - ✓ “**Robustezza**” nei confronti di azioni eccezionali
- *Stato Limite*
  - è una condizione oltre la quale l’opera non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata, quali:
    - capacità di evitare crolli, perdita di equilibrio, dissesti gravi, totali o parziali che possono compromettere l’incolumità delle persone o la perdita del bene (**SLU**)
    - capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (deformazioni, spostamenti, fessurazione,... ) (**SLE**)
- *Robustezza*
  - capacità di evitare danni sproporzionati rispetto a cause innescanti quali incendio, esplosione, urti..



- Il problema fondamentale dell’affidabilità strutturale:  
**equazione di sicurezza**
- Aleatorietà delle grandezze
- Approccio semiprobabilistico
- Coefficienti parziali di sicurezza
  - *Valori caratteristici e valori di progetto*
- Principali caratteristiche
  - Si basa sul concetto di **aleatorietà** delle grandezze (azioni, materiali, resistenze)
  - Si applica un metodo semiprobabilistico basato sull’impiego dei **coefficienti parziali di sicurezza**
  - Si considerano **varie soglie (SL)** del comportamento (esercizio, collasso, ...) nei confronti dei quali si differenzia il livello di rischio



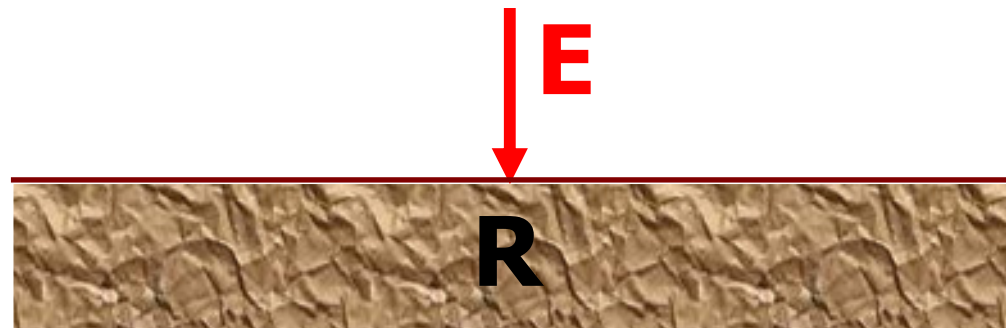
La sicurezza di un'opera deve essere verificata tramite il confronto tra le **Resistenze e l'Effetto delle Azioni**

✓  $R_d \geq E_d$

✓  $R_d$  = Resistenza di progetto

✓  $E_d$  = Valore di progetto dell'effetto delle azioni

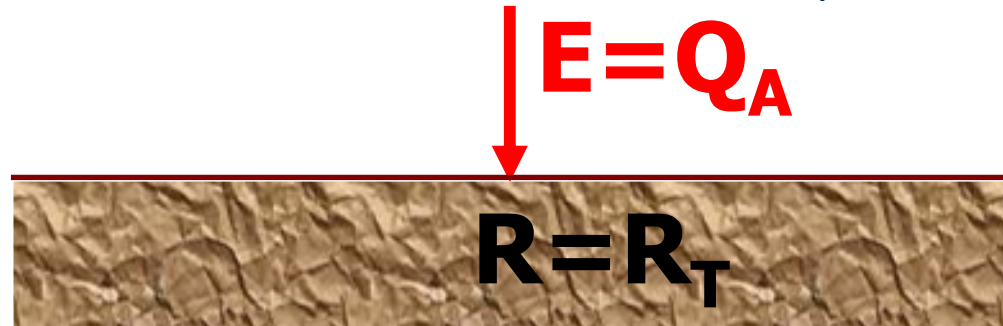
- Si verifica la relazione fra le due grandezze
  - **E** : Effetto dell'azione (Domanda)
  - **R** : Resistenza (Capacità)





## Richiami sul concetto degli “Stati Limite” – DM14/1/2008

- Ad esempio
  - E : Carico agente ( $Q_A$ )
  - R : Resistenza a rottura del terreno  $R_T$



- Deve risultare

$$R \geq E$$

- Si ha **sicurezza** se,

$$R - E \geq 0$$

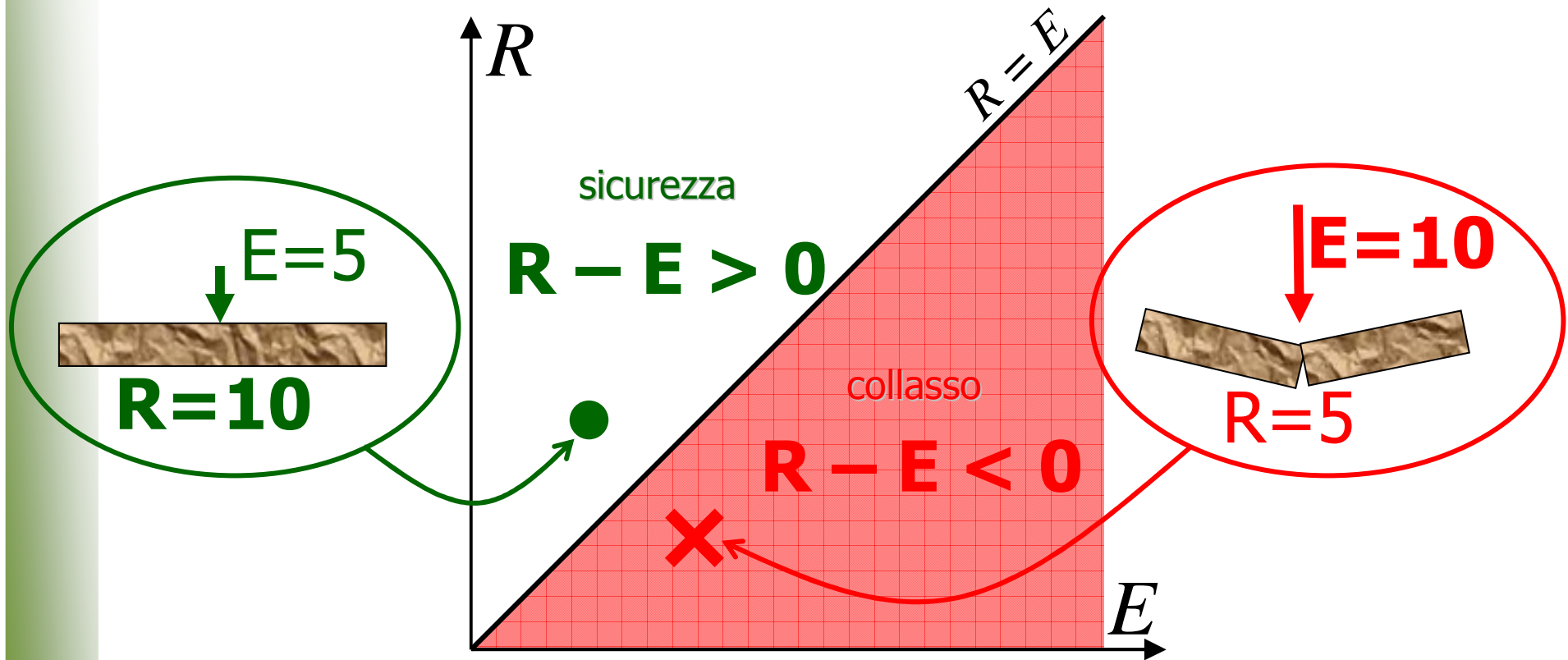
- Si ha **fallimento** se

$$R - E < 0$$

- Graficamente ...



# Richiami sul concetto degli “Stati Limite” – DM14/1/2008





## Aleatorietà

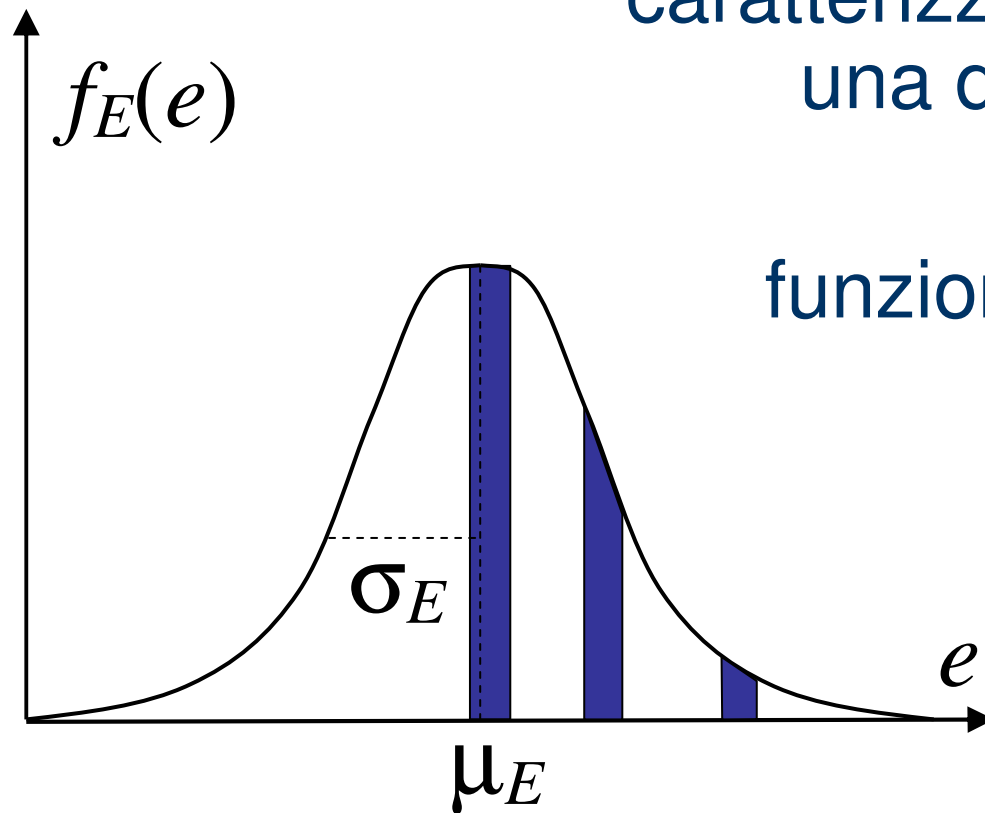
Nella realtà  **$E$**  è una grandezza ***aleatoria*** caratterizzata (se normale) da una densità di probabilità

$$f_E(e)$$

funzione di due parametri:

– media:  $\mu_E$

– dispersione:  $\sigma_E$





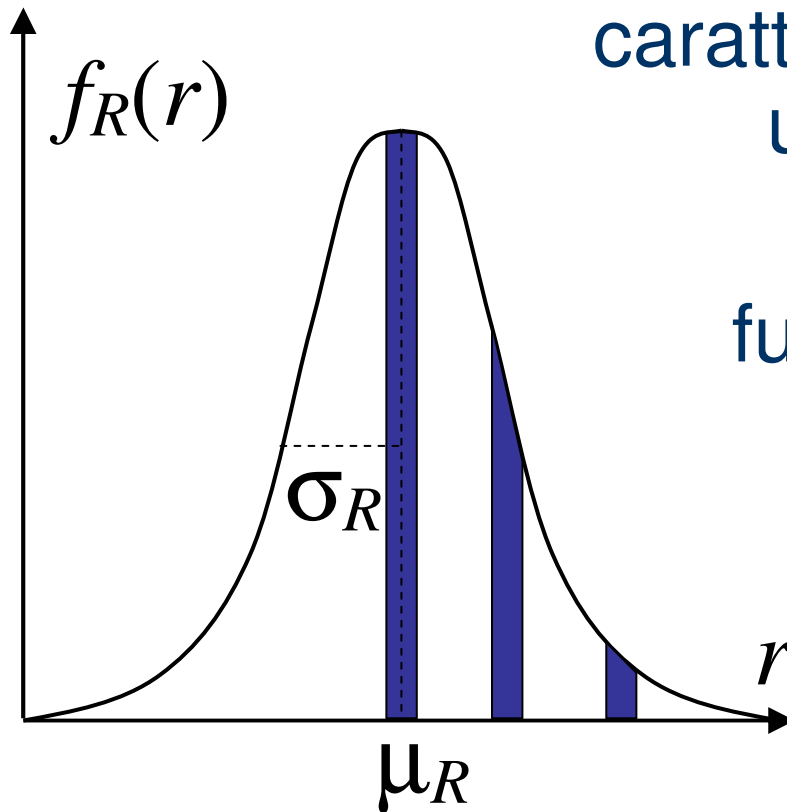
## Aleatorietà

Anche ***R*** nella realtà è ***aleatoria***  
caratterizzata (se normale) da  
una densità di probabilità  
 $f_R(r)$

funzione di due parametri:

– media:  $\mu_R$

– dispersione:  $\sigma_R$







## Le aleatorietà

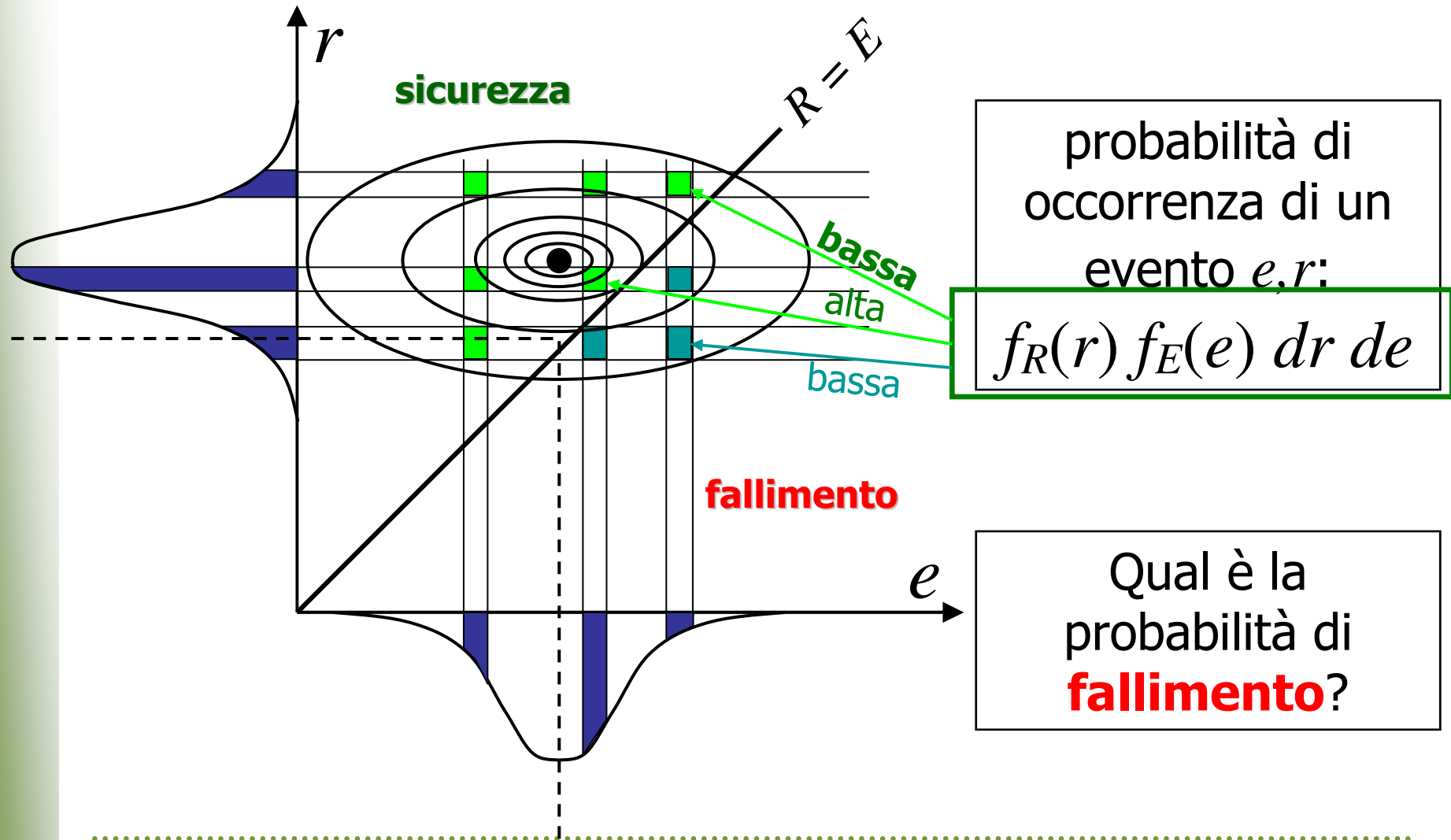
Le aleatorietà derivano da incertezze relative a:

- **Resistenze dei materiali** (opere e terreni) rispetto ai valori assunti dal progettista
- **Divario** tra gli effetti realmente indotti dai carichi e quelli calcolati
- **Geometria** della costruzione e del sottosuolo
- Intensità delle **azioni** dirette, indirette e di natura chimico-fisica
- Probabilità della loro **coesistenza**



# Richiami sul concetto degli “Stati Limite” – DM14/1/2008

Probabilità di fallimento (es. collasso)





Nel caso di valori aleatori normali ...

- ... la **probabilità di fallimento**  $p_f$  si calcola semplicemente come:

$$p_f = \Pr(R - E < 0) = \Phi \left( -\frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \right)$$

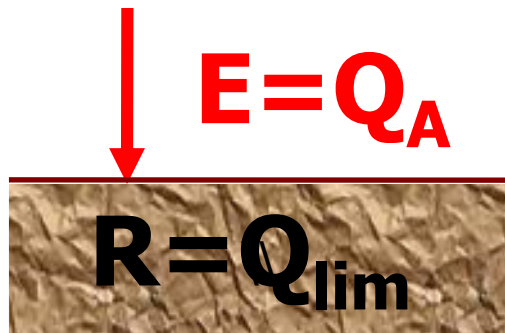
- si noti che:
  - Se  $\sigma_R$  e  $\sigma_E$  diminuiscono,  $p_f$  diminuisce
  - Se  $(\mu_R - \mu_E)$  aumenta,  $p_f$  diminuisce

$\Phi$  funzione cumulativa di una distribuzione normale standard



## Esempio

- Verifica di una fondazione diretta



- Carico:  $Q = Q_A \left( \mu_Q = 3.75 \text{ kN/m}^2, \sigma_Q = 1.25 \text{ kN/m}^2 \right)$
- Capacità:  $R = Q_{\text{lim}} \left( \mu_R = 10 \text{ kN/m}^2, \sigma_R = 1.5 \text{ kN/m}^2 \right)$

- La probabilità di collasso è:

$$p_f = \Phi \left( - \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right) = \Phi \left( - \frac{10 - 3.75}{\sqrt{1.5^2 + 1.25^2}} \right) = 6.85 \cdot 10^{-4}$$

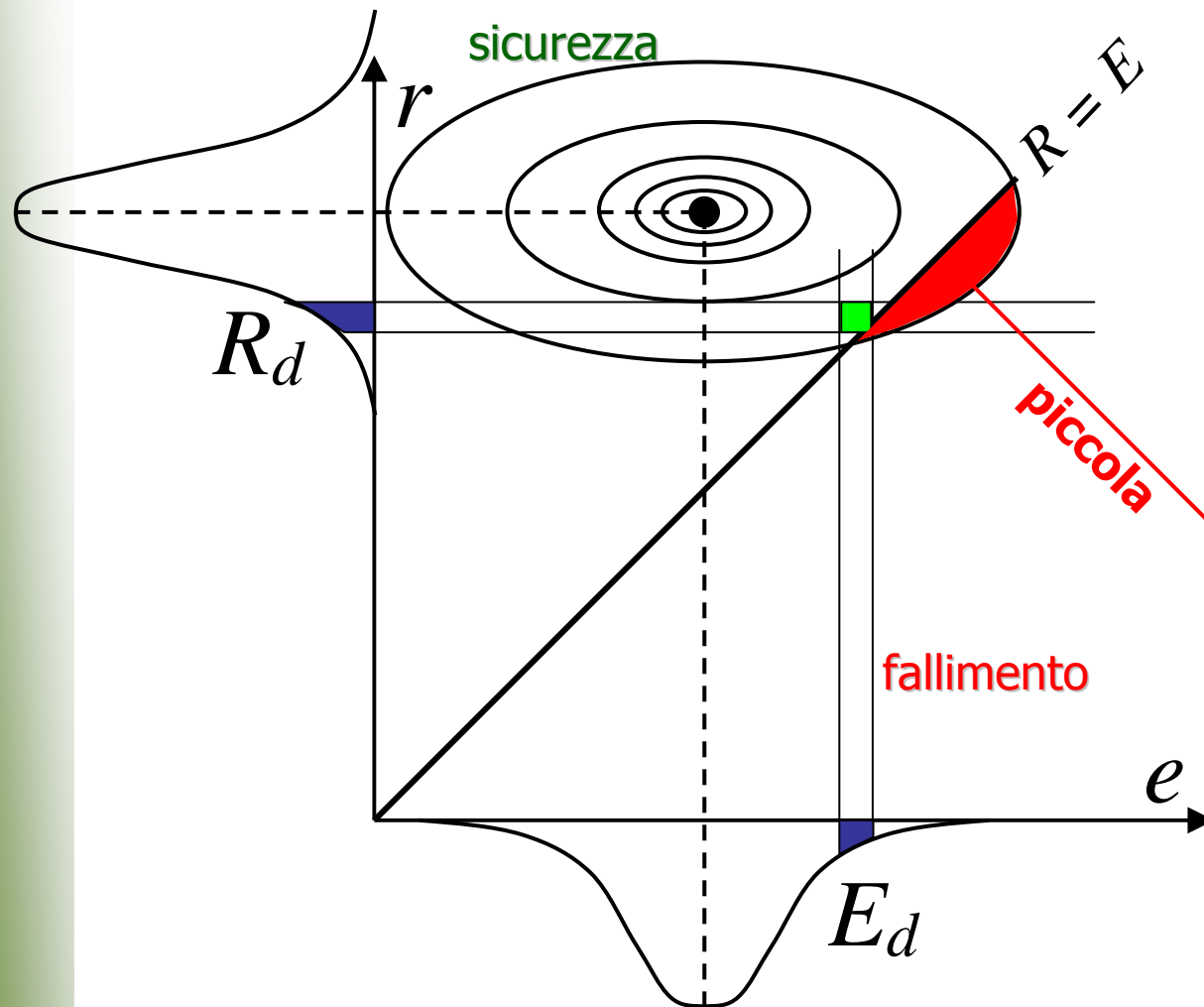


## Esempio

- La probabilità di collasso  $p_f$  trovata andrebbe confrontata con un valore ritenuto accettabile,  $P_{f,amm}$
- Questo metodo, detto di livello superiore, è adatto a strutture di una certa rilevanza
- Un metodo che tenga conto delle aleatorietà in modo più semplice ...



## Approccio semiprobabilistico



Si cerca una coppia di valori:

$R_d$  ed  $E_d$

per cui se si ha:

$R_d > E_d$

allora:

$P_f < P_{f,amm}$



Valori “di calcolo” o “di progetto”

- I valori di calcolo  $R_d$  ed  $E_d$  consentono di trasformare un problema aleatorio:

$$\Pr[R \geq E] \geq 1 - p_{f,amm}$$

in uno deterministico:

$$R_d \geq E_d$$

- Cioè: se  $R_d \geq E_d \rightarrow p_f \leq p_{f,amm}$



## Valori di calcolo

- I valori di calcolo  $R_d$  e  $E_d$  vengono espressi in funzione dei **valori caratteristici**  $R_k$  ed  $E_k$
- I valori caratteristici  $R_k$  e  $E_k$  sono i frattili di ordine 5% e 95% delle distribuzioni di  $R$  ed  $E$
- I rapporti  $\gamma_M = R_k/R_d$  e  $\gamma_F = E_d/E_k$  sono detti **coefficienti parziali**

Si definisce "**frattile**  $> o < al p\%$ " quel valore della variabile aleatoria cui corrisponde la percentuale  $p\%$  di non essere o di essere superato.

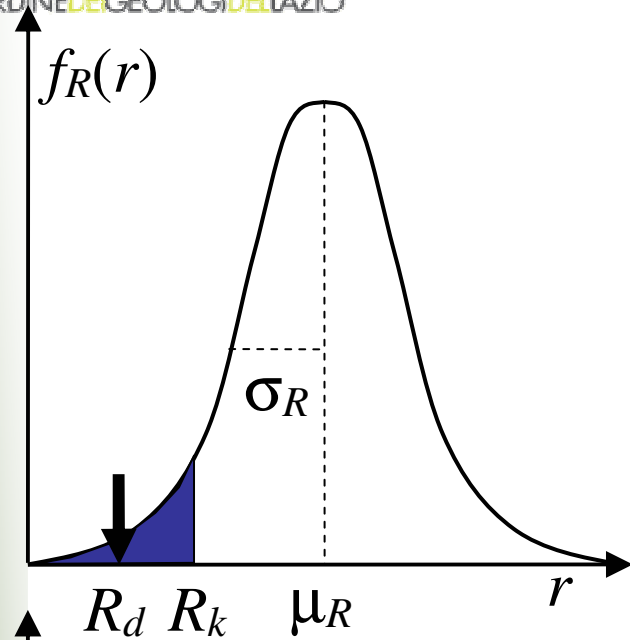
- I **coefficienti parziali di sicurezza**  $\gamma_M$  e  $\gamma_F$  coprono:
  - La variabilità delle rispettive grandezze
  - Le incertezze relative alle tolleranze geometriche
  - Incertezza del modello



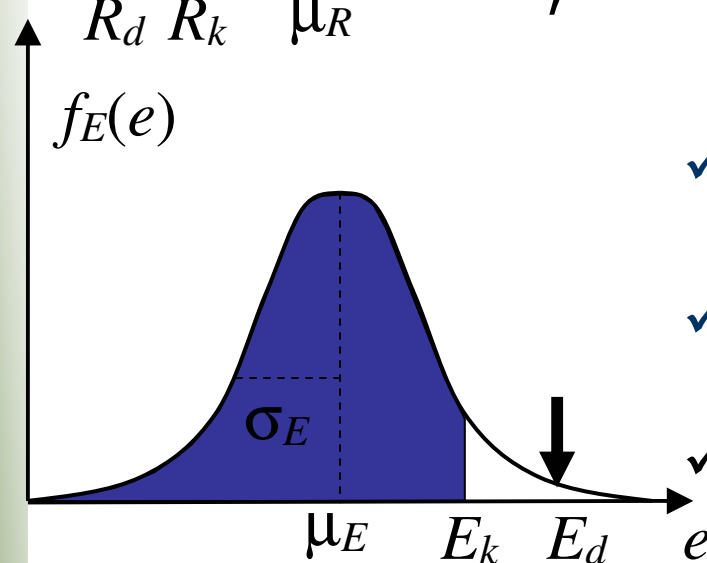


## Richiami sul concetto degli “Stati Limite” – DM14/1/2008

### $R_d$ , $R_k$ e $\gamma_m$



- ✓ Il valore caratteristico è:  $R_k = \mu_R - 1.64 \sigma_R$   
 $\Pr[R < R_k] = 5\%$
- ✓ Il valore di calcolo è:  
 $R_d = R_k / \gamma_M$
- ✓  $\gamma_M$  deriva da studi di calibrazione



- ✓ Il valore caratteristico è:  $E_k = \mu_E - 1.64 \sigma_E$   
 $\Pr[E < E_k] = 95\%$
- ✓ Il valore di calcolo è:  
 $E_d = E_k \cdot \gamma_F$
- ✓  $\gamma_F$  deriva da studi di calibrazione



Equazione di sicurezza

- E' dunque:

$$Rd \geq Ed \Rightarrow R_k / \gamma_M \geq E_k \cdot \gamma_F$$

- Nella forma più generale si ha:

$$R(f_k / \gamma_m) / \gamma_{Rd} \geq \gamma_{Sd} \cdot E(F_k \cdot \gamma_f)$$

$\gamma_m$  coefficiente sui materiali

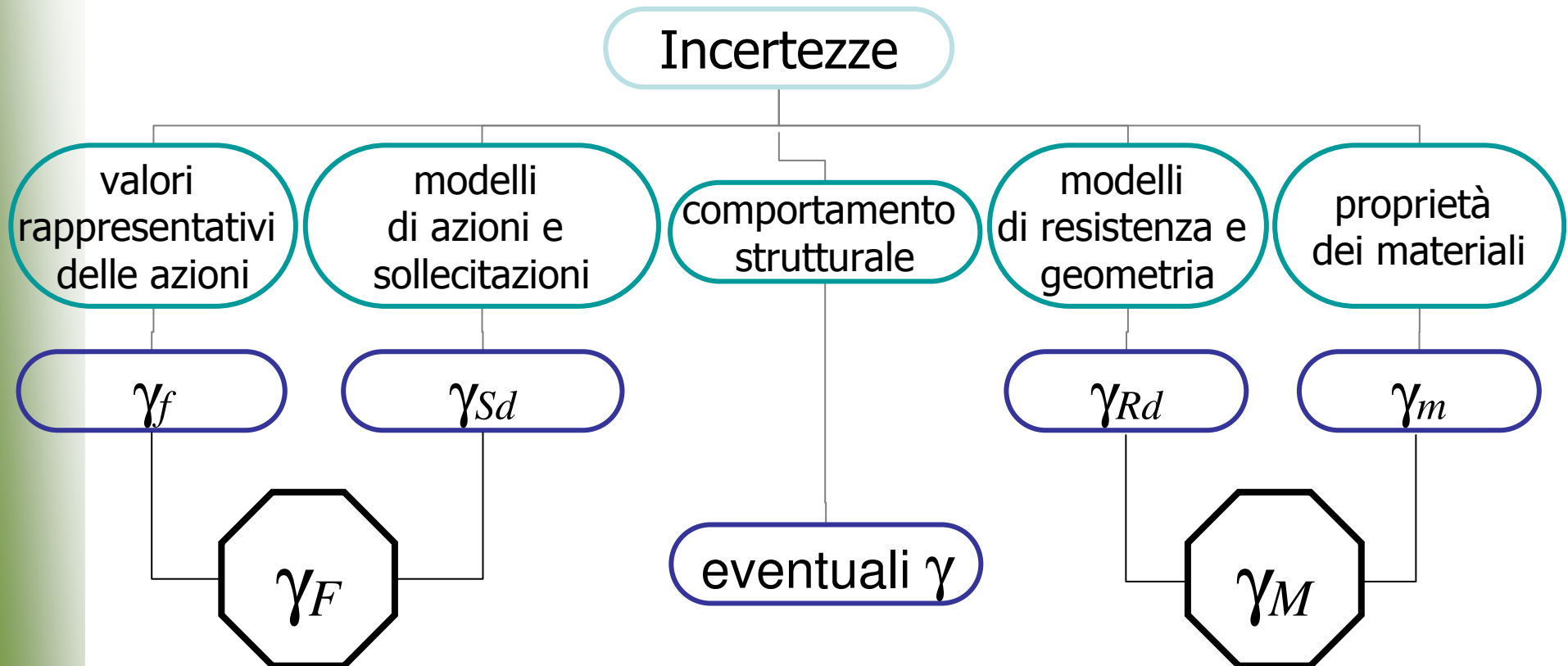
$\gamma_{Rd}$  coefficiente sul modello delle resistenze e la geometria

$\gamma_{Sd}$  coefficiente sul modello delle azioni e sollecitazioni

$\gamma_f$  coefficiente sulle azioni e sull'effetto delle azioni

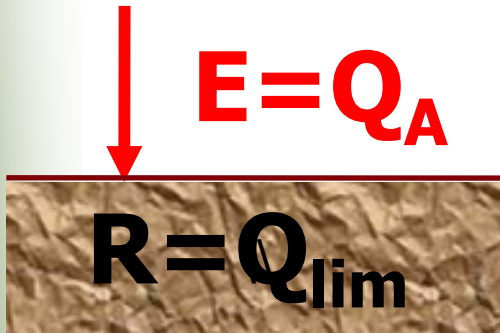


## Coefficienti parziali





Esempio



- Carico:  $Q = Q_A \left( \mu_Q = 3.75 \text{ kN/m}^2, \sigma_Q = 1.25 \text{ kN/m}^2 \right)$
- Capacità:  $R = Q_{lim} \left( \mu_R = 10 \text{ kN/m}^2, \sigma_R = 1.5 \text{ kN/m}^2 \right)$

- I valori caratteristici di  $E$  ed  $R$  sono:
  - $E_k = \mu_E + 1.64 \sigma_E = 3.75 + 1.64 \cdot 1.25 = 5.8 \text{ kNm}$
  - $R_k = \mu_R - 1.64 \sigma_R = 10 - 1.64 \cdot 1.5 = 7.5 \text{ kNm}$
- Si ha dunque:

$$7.5 / \gamma_M \geq 5.8 \cdot \gamma_F$$

Che sarebbe verificata per, ad es.:  $\gamma_M = 1.10$  e  $\gamma_F = 1.17$

Questo assicurerebbe una  $p_f = 6.85 \cdot 10^{-4}$



### *La probabilità di fallimento $p_{f,amm}$*

- Non esiste un criterio specifico ed unico per determinare  $p_{f,amm}$
- In generale viene fissato in relazione al livello di rischio associato ad ogni stato limite sulla base di criteri “sociali”
- La formula maggiormente utilizzata per ottenere una  $p_{f,amm}$  accettabile durante la vita utile della struttura è:

$$p_{f,amm} = 10^{-5} \cdot \xi_s \cdot T / L$$

$\xi_s$  = fattore legato al criterio “sociale”

–  $T$  = vita utile della struttura in anni

–  $L$  = numero medio di persone presenti nell’edificio nel periodo di rischio



## Gli Stati Limite (non sismici)

- **Definizione di Stato Limite**
  - E' la condizione superata la quale la struttura non soddisfa più esigenze per cui è stata progettata
- **Due categorie:**
  - **Stati Limite Ultimi (SLU)**
    - Al superamento del quale si ha collasso strutturale, crolli, perdita di equilibrio, dissesti gravi, ovvero fenomeni che mettono fuori servizio in modo irreversibile la struttura (o parti di essa)
  - **Stati Limite di Esercizio (SLE)**
    - Al superamento del quale corrisponde la perdita di una particolare funzionalità che condiziona o limita le prestazioni dell'opera



Azione sismica  
SL Esercizio

- **Stato Limite di Operatività (SLO)**
  - la costruzione nel suo complesso ... **non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi**
- **Stato Limite di Danno (SLD)**
  - la costruzione nel suo complesso ... **subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali**  
...mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature

./.



Azione sismica  
SL Ultimi

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)**
  - la costruzione **subisce rotture e crolli** dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali
  - la costruzione conserva una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)**
  - la costruzione **subisce gravi rotture** e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali
  - la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali





Verifiche nei confronti degli Stati Limite Ultimi strutturali (STR) e geotecnici (GEO)

**APPROCCIO 1:** due diverse combinazioni

**C1:** (A1+M1+R1) si amplificano le azioni o gli effetti delle azioni - STR

**C2:** (A2+M2+R2) si penalizzano i parametri di resistenza del terreno e le resistenze globali - GEO

**APPROCCIO 2:** (A1+M1+R3) unica combinazione (STR) e (GEO) si amplificano le azioni e si penalizzano le resistenze globali del terreno

*combinazione di carico sismica → azioni non amplificate*



# Richiami sul concetto degli “Stati Limite” – DM14/1/2008

## AZIONI

CARICHI	COEFFICIENTE PARZIALE $\gamma_F$	EFFETTO	EQU	UPL	HYD	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	$\gamma_G$	Favorevole	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
		Sfavorevole	1,1	1,1	1,3	1,3	1,0
Variabili	$\gamma_Q$	Favorevole	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Sfavorevole	1,5	1,5	1,5	1,5	1,3

## MATERIALI

PARAMETRO	$\gamma_M$	M1	M2
$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

## RESISTENZE

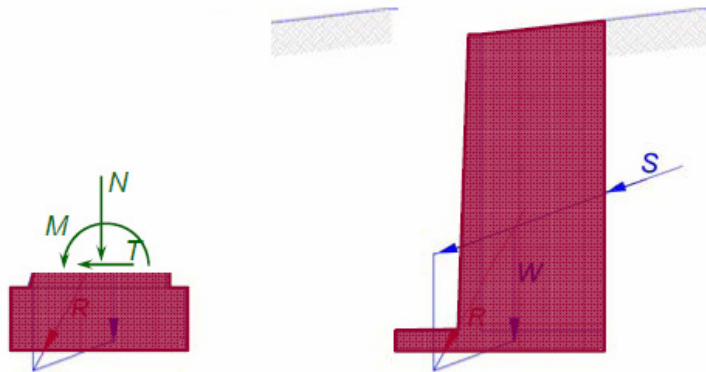
FONDAZIONI SUPERFICIALI									
	(R1)	(R2)	(R3)						
VERIFICA	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$						
Stabilità globale	-	1,1	-						
Capacità portante	1,0	1,8	2,3						
Scorrimento	1,0	1,1	1,1						
PALI DI FONDAZIONE									
	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
RESISTENZA	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$
<i>Carichi assiali</i>									
Base	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25
<i>Carichi trasversali</i>									
	1,0	1,6	1,3	1,0	1,6	1,3	1,0	1,6	1,3

OPERE DI SOSTEGNO			
	(R1)	(R2)	(R3)
VERIFICA	$\gamma_R$	$\gamma_R$	$\gamma_R$
Stabilità globale	-	1,1	-
Capacità portante	1,0	1,0	1,4
Scorrimento	1,0	1,0	1,1
Resistenza del terreno a valle	1,0	1,0	1,4
TIRANTI D'ANCORAGGIO			
		(R3)	
VERIFICA		$\gamma_R$	
<i>Sfilamento</i>			
Tiranti temporanei		1,1	
Tiranti permanenti		1,2	



## SCELTA DEGLI APPROCCI

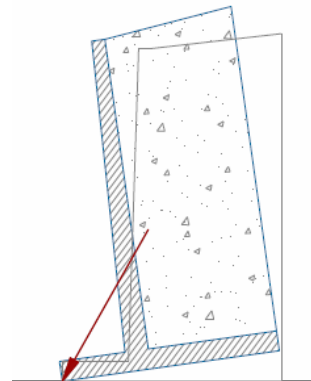
verifiche opere di sostegno a gravità



verifiche globali (GEO)

verifiche locali (STR)

verifica al ribaltamento → combinazione EQU



- meccanismo poco realistico
- non si mobilita la resistenza del terreno di fondazione
- meccanismo fragile

**EQU + M2** ( $\gamma_\phi = \gamma_c = 1.25$ )

carichi		$\gamma_F (\gamma_E)$	EQU
permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0.9
	sfavorevoli		1.1
permanenti non strutturali	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0.0
	sfavorevoli		1.5
variabili	favorevoli	$\gamma_{G3}$	0.0
	sfavorevoli		1.5

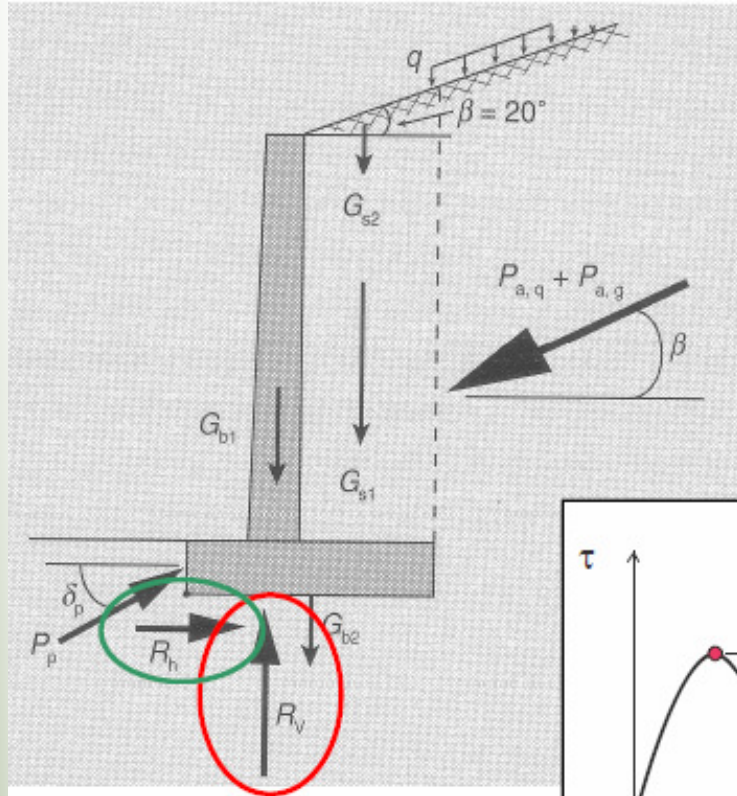


## PROGETTAZIONE GEOTECNICA

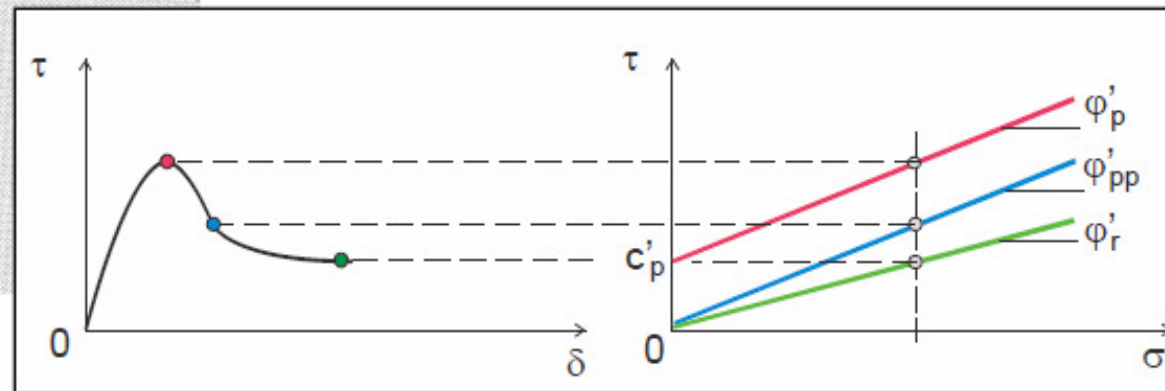
- 1) Scelta delle opere geotecniche
- 2) Identificazione degli stati limite
- 3) Scelta delle indagini e delle prove geotecniche
- 4) Identificazione dei valori rappresentativi e dei valori caratteristici dei parametri geotecnici
- 5) Identificazione e qualificazione delle azioni; definizione dei loro valori caratteristici
- 6) Scelta dell'approccio progettuale e definizione dei valori di progetto delle azioni, dei parametri geotecnici e delle resistenze
- 7) Verifiche



**Valori rappresentativi dei parametri geotecnici. Esempio: muro di sostegno**



E' opportuno che la verifica allo scorrimento sia effettuata con riferimento al valore a volume costante o allo **stato critico dell'angolo di attrito**, poiché il meccanismo di scorrimento, che coinvolge spessori modesti di terreno, e il disturbo del terreno, possono comportare modifiche significative dei parametri di resistenza.



Capacità portante: per l'elevato volume di terreno indisturbato coinvolto, si fa riferimento al **valore di picco dell'angolo di attrito**, senza trascurare il contributo della coesione efficace del terreno.



Passaggio dai **valori rappresentativi** dei parametri geotecnici ai corrispondenti **valori caratteristici**.

## Valori caratteristici dei parametri geotecnici

Eurocodice 7: Geotechnical Design

*Characteristic value as being **selected** as a **cautious estimate** of the value affecting the occurrence of the **limit state**.*

**selected** – evidenzia l'importanza dell'engineering judgment

**cautious estimate** – è richiesta una certa cautela

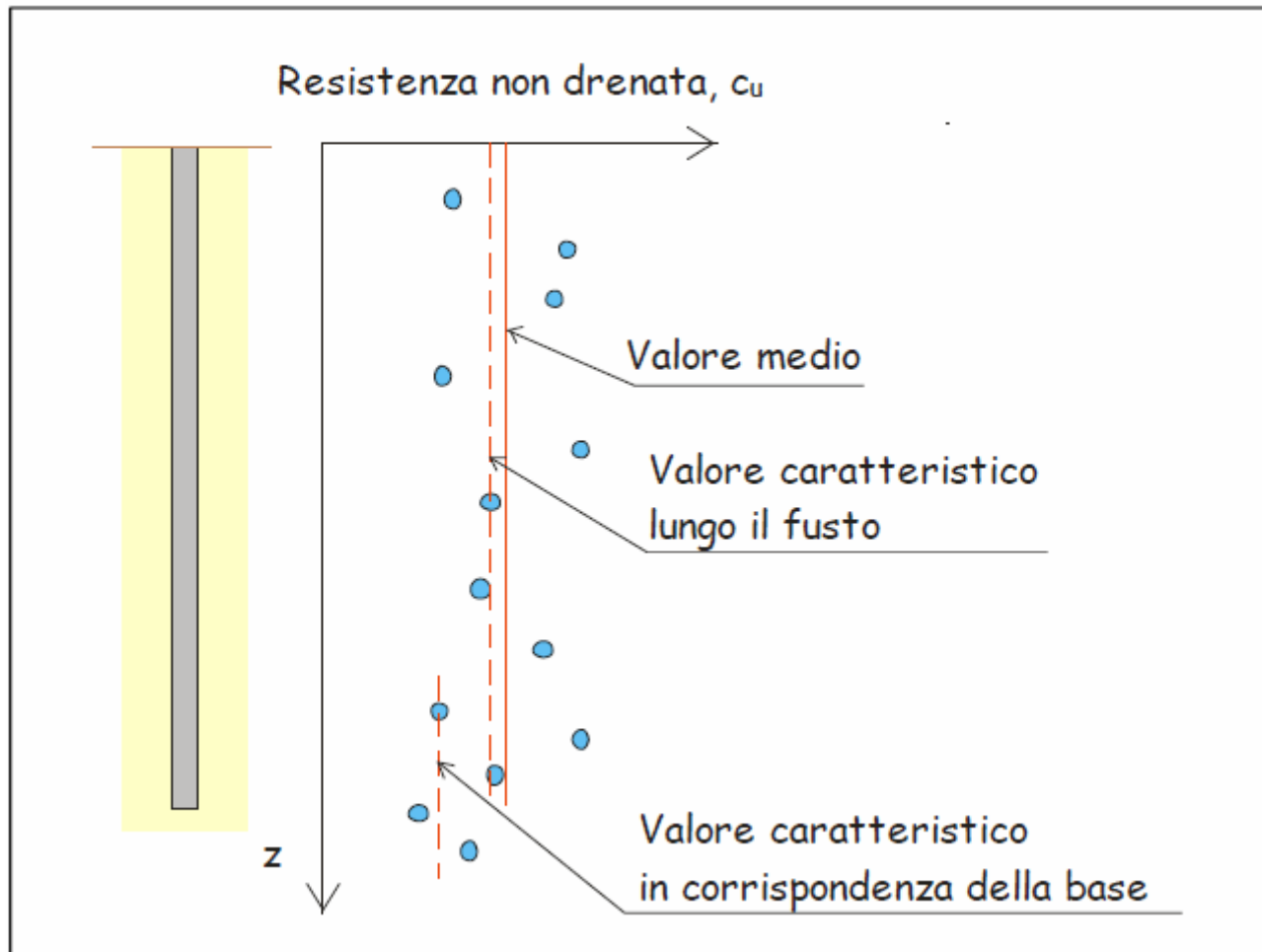
**limit state** – il valore scelto deve riferirsi allo stato limite considerato

## QUESTA DEFINIZIONE E' ASSUNTA NELLE NTC2008

“per valore caratteristico di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato”



## Valori caratteristici dei parametri geotecnici





# RITORNA AL CORSO BASE

