



FACOLTÀ DI INGEGNERIA
UNIVERSITÀ DI CATANIA

Corso di Aggiornamento:

PROGETTAZIONE STRUTTURALE SULLA BASE DELLE NORMATIVE PIÙ RECENTI

**GEOTECNICA, FONDAZIONI E
OPERE DI SOSTEGNO**

FRANCESCO CASTELLI

Spoleto, Villa Redenta, 5 - 7 Febbraio 2009


D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

MODULO:

GEOTECNICA, FONDAZIONI E OPERE DI SOSTEGNO
Spoleto, Villa Redenta, 5 - 6 - 7 Febbraio 2009

*Docente: Francesco Castelli
Facoltà di Ingegneria - Università di Catania*

- **CONSIDERAZIONI GENERALI:** comportamento meccanico dei terreni sotto azioni statiche e dinamiche; determinazione sperimentale delle proprietà meccaniche; principi di progettazione e metodologie di analisi.
- **ANALISI GEOTECNICA DEL SITO:** pericolosità ed effetti del sito; risposta sismica locale; liquefazione; stabilità di pendii e dei fronti di scavo.
- **OPERE GEOTECNICHE:** tipologie di fondazione; fondazioni superficiali; fondazioni su pali; regole generali di progettazione; azioni correlate alla fondazione; verifiche e criteri di dimensionamento; interazione terreno - struttura.



Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

ASPETTI GEOTECNICI

Parte I – Considerazioni generali


1. Comportamento meccanico dei terreni sotto azioni statiche e dinamiche
2. Principi di progettazione e metodologie di analisi
3. Moti sismici di riferimento

Parte II – Analisi geotecnica del sito

4. Pericolosità ed effetti del sito
5. Risposta sismica locale
6. Liquefazione
7. Stabilità di pendii e dei fronti di scavo

Parte III – Opere geotecniche

8. Fondazioni
9. Fondazioni superficiali
10. Fondazioni su pali
11. Opere di sostegno a gravità
12. Opere di sostegno flessibili
13. Opere in terra rinforzata
14. Costruzioni in sotterraneo e scavi a cielo aperto
15. Costruzioni in terra



Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

"L'Ingegneria Geotecnica è semplicemente quella branca della Ingegneria Civile che si occupa del progetto di strutture costruite nel terreno o nella roccia che utilizzano i terreni e le rocce come materiali da costruzione

Mentre nella maggior parte dei rami dell'Ingegneria Civile è possibile scegliere i materiali con cui si andrà a progettare e prescrivere le caratteristiche meccaniche, l'Ingegnere Geotecnico è costretto ad utilizzare i materiali che rinvengono in sito e ha solo possibilità relativamente limitate di migliorarne le caratteristiche meccaniche.....

Dal momento poi che i terreni e le rocce naturali sono il prodotto di processi geologici di larga scala, la conoscenza della Geologia è un aspetto importante nella preparazione dell'Ingegnere Geotecnico."

*John Atkinson
Geotecnica
Meccanica delle Terre e delle Fondazioni*

XXIII CONVEGNO NAZIONALE DI GEOTECNICA
Previsione e controllo del comportamento delle opere
Abano Terme (Padova) 16 - 18 Maggio 2007

Nell'ambito del Convegno è stato previsto un *Workshop* per illustrare e discutere il tema delle regole progettuali definite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, nella versione predisposta a seguito delle significative modifiche conseguenti alla fase di monitoraggio.

18 maggio 2007

Abano Terme - Teatro Congressi Pietro D'Abano

14:30 - 16:30 Workshop
(Sala Plenaria) Teatro Congressi Pietro d'Abano
La progettazione geotecnica alla luce delle nuove norme per le costruzioni
Prof. Ing. Alberto Burghignoli - Università di Roma "La Sapienza"
Dott. Ing. Marcello Mauro - Presidente del Consiglio Superiori Lavori Pubblici

QUADRO NORMATIVO

- D.M. Gennaio 16.01.1996
- OPCM n.3474 e s.m.i.
- EUROCODICI senza Allegati
- Testo Unico 14.09.2005

↓

Non equivalenti per livello di sicurezza assunto

- Esigenza di garantire il carattere prestazionale del testo, con le indicazioni e le precisazioni necessarie per raggiungere tale obiettivo.
- Necessità di un riferimento costante agli EUROCODICI.
- Inserimento organico delle norme sismiche.
- Opportunità di significativi cambiamenti nella parte geotecnica.

Ultima versione profondamente modificata rispetto a quella iniziale:

- Definiti gli **Approcci Progettuali**.
- Mantenuti i **Coefficienti di Sicurezza Globale**.
- Riformulato il **Metodo Osservazionale**.
- In limitate situazioni è ancora possibile il ricorso al **Metodo delle Tensioni Ammissibili**.
- Grosso spazio alla **Geotecnica**.
- Progettazione Geotecnica in zona sismica: mantenuto il **Metodo Pseudo-statico**.
- Formato sostanzialmente analogo a quello degli **EUROCODICI** (stessi criteri di verifica).

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \Rightarrow **STATI LIMITE**

La sicurezza e le prestazioni di un'opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale. Stato limite è la condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata.

In particolare, secondo quanto stabilito nei capitoli specifici, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:

- **sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU)**: capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;
- **sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE)**: capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;
- **robustezza nei confronti di azioni eccezionali**: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti.

Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile e si definisce collasso.

Il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Il metodo prestazionale

Tipo di analisi	Classe di prestazione		
	C	B	A
Metodi pseudo-statici o empirici			
Metodi dinamici semplificati			
Metodi dinamici completi			

	Progettazione finale (definitiva/esecutiva)
	Progettazione preliminare o zona sismica di bassa intensità

Quanto più elevata è la classe di prestazione richiesta per un'opera, tanto più sofisticato ed affidabile deve essere il metodo d'analisi.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \Rightarrow **STATO LIMITE ULTIMO**

2.2.1 STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

I principali Stati Limite Ultimi, di cui al § 2.1, sono elencati nel seguito:

- perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte;
 - spostamenti o deformazioni eccessive;
 - raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti di strutture, collegamenti, fondazioni;
 - raggiungimento della massima capacità di resistenza della struttura nel suo insieme;
 - raggiungimento di meccanismi di collasso nei terreni;
 - rottura di membrature e collegamenti per fatica;
 - rottura di membrature e collegamenti per altri effetti dipendenti dal tempo;
 - instabilità di parti della struttura o del suo insieme;
- Altri stati limite ultimi sono considerati in relazione alle specificità delle singole opere; in presenza di azioni sismiche, gli Stati Limite Ultimi sono quelli precisati nel § 3.2.1.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \Rightarrow **STATO LIMITE ESERCIZIO**

2.2.2 STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

I principali Stati Limite di Esercizio, di cui al § 2.1, sono elencati nel seguito:

- danneggiamenti locali (ad es. eccessiva fessurazione del calcestruzzo) che possano ridurre la durabilità della struttura, la sua efficienza o il suo aspetto;
 - spostamenti e deformazioni che possano limitare l'uso della costruzione, la sua efficienza e il suo aspetto;
 - spostamenti e deformazioni che possano compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti, macchinari;
 - vibrazioni che possano compromettere l'uso della costruzione;
 - danni per fatica che possano compromettere la durabilità;
 - corrosione e/o eccessivo degrado dei materiali in funzione dell'ambiente di esposizione;
- Altri stati limite sono considerati in relazione alle specificità delle singole opere; in presenza di azioni sismiche, gli Stati Limite di Esercizio sono quelli precisati nel § 3.2.1.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \Rightarrow **STATO LIMITE ULTIMO (SLU)**
STATO LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

VERIFICHE

Le opere strutturali devono essere verificate:

- per gli **stati limite ultimi** che possono presentarsi, in conseguenza alle diverse combinazioni delle azioni;
- per gli **stati limite di esercizio** definiti in relazione alle prestazioni attese.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni → STATO LIMITE ULTIMO

Allo **Stato Limite Ultimo** (SLU)

In generale si deve verificare che:

$$E_d \leq R_d$$

con:

- E_d = **Azione sollecitante di progetto**;
- R_d = **Resistenza di progetto**.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Verifiche allo stato limite ultimo (ULS)

Per ogni SLU si deve verificare, sulla base delle diverse Combinazioni e dei diversi Coefficienti Parziali, che l'Effetto delle azioni di progetto (E_d) sia non superiore alle Resistenze di progetto (R_d):

$$E_d \leq R_d$$

$$E_d = \gamma_E E \left(\gamma_{F,rep} \frac{X_k}{\gamma_M} \right) a_d \quad R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left(\gamma_{F,rep} \frac{X_k}{\gamma_M} \right) a_d$$

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni → STATO LIMITE ULTIMO

R_d : resistenza di progetto

È la resistenza caratteristica della "struttura", ridotta per un opportuno coefficiente di sicurezza parziale: es. la resistenza di progetto di una barra tesa è data dalla resistenza caratteristica (il valore che meglio approssima il valore vero) , divisa per un coeff. γ_M

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_M$$

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

E_d = **Azione sollecitante di progetto**

E' l'azione sollecitante di calcolo e deriva dalla combinazione delle sollecitazioni associate ai carichi elementari

$$E_d = E + \gamma_{G1} G_1 + \gamma_{G2} G_2 + \gamma_{Qi} Q_{ki} + \gamma_{Qj} \psi_{ij} Q_{kj}$$

con:

- E = azione dovuta al sisma;
- G = azione dovuta ai carichi permanenti;
- ψQ = azione dovuta ai carichi accidentali.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Valori dei Coefficienti di Combinazione

Categoria/Azione variabile	γ_{f1}	γ_{f2}	γ_{f3}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0.7	0.5	0.3
Categoria B Uffici	0.7	0.5	0.3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0.7	0.7	0.6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0.7	0.7	0.6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1.0	0.9	0.8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0.7	0.7	0.6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0.7	0.5	0.3
Categoria H Coperture	0.0	0.0	0.0
Vento	0.6	0.2	0.0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0.5	0.2	0.0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0.7	0.5	0.2
Variazioni termiche	0.6	0.5	0.0

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Coefficienti Parziali per le Azioni nelle Verifiche SLU

		Coefficiente γ_F	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{F1}	0.9	1.0	1.0
	sfavorevoli		1.1	1.3	1.0
Carichi permanenti non strutturali ⁽¹⁾	favorevoli	γ_{F2}	0.0	0.0	0.0
	sfavorevoli		1.5	1.5	1.3
Carichi variabili	favorevoli	γ_{F3}	0.0	0.0	0.0
	sfavorevoli		1.5	1.5	1.3

⁽¹⁾Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano congiuntamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

stato limite di equilibrio come corpo rigido: EQU
 stato limite di resistenza della struttura compresi gli elementi di fondazione: STR
 stato limite di resistenza del terreno: GEO

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni → STATO LIMITE **ULTIMO**

Nelle verifiche nei confronti degli stati limite ultimi strutturali (STR) e geotecnici (GEO) si possono adottare, in alternativa, due diversi approcci progettuali.

Nell'Approccio 1 si impiegano due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) e, eventualmente, per la resistenza globale del sistema (R). Nella *Combinazione 1* dell'Approccio 1, per le azioni si impiegano i coefficienti γ riportati nella colonna A1 delle Tabelle sopra citate. Nella *Combinazione 2* dell'Approccio 1, si impiegano invece i coefficienti γ riportati nella colonna A2.

Nell'Approccio 2 si impiega un'unica combinazione dei gruppi di coefficienti parziali definiti per le Azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) e, eventualmente, per la resistenza globale (R). In tale approccio, per le azioni si impiegano i coefficienti γ riportati nella colonna A1.

I coefficienti parziali γ_M per i parametri geotecnici e i coefficienti γ_R che operano direttamente sulla resistenza globale di opere e sistemi geotecnici sono definiti nel successivo Capitolo 6.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni → STATO LIMITE **ULTIMO**

6 PROGETTAZIONE GEOTECNICA

La verifica della suddetta condizione deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi.

Nel primo approccio progettuale (Approccio 1) sono previste due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti: la prima combinazione è generalmente più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno, mentre la seconda combinazione è generalmente più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico.

Nel secondo approccio progettuale (Approccio 2) è prevista un'unica combinazione di gruppi di coefficienti, da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

RESISTENZA DI PROGETTO R_D

Il valore di progetto della resistenza R_d può essere determinato:

- in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, diviso per il valore del coefficiente parziale γ_M specificato nella successiva Tab. 6.2.II e tenendo conto, ove necessario, dei coefficienti parziali γ_R specificati nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera;
- in modo analitico, con riferimento a correlazioni con i risultati di prove in sito, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R riportati nelle tabelle contenute nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera;
- sulla base di misure dirette su prototipi, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R riportati nelle tabelle contenute nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera.

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_s$	γ_ϕ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_s	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	s_u	γ_{su}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_s	1,0	1,0

LA PROGETTAZIONE GEOTECNICA SECONDO L'EUROCODE 7

EUROCODE 7 – 2003

Gli Approcci progettuali

EC7 prescrive che vengano analizzati più scenari, considerando di volta in volta, diversi insiemi (A) di coeff. delle azioni γ_F , combinati con diversi coeff. γ_M (M) sui parametri geotecnici a loro volta combinati con diversi coeff. γ_R (R) sulle resistenze.

Talora diverse combinazioni possono dare luogo a scenari ridondanti.

Di solito, ma non sempre, le combinazioni fra i diversi coefficienti sono congegnate in modo tale che, quando si adottino coeff. $\gamma_M > 1$, i corrispondenti γ_R siano pari a 1 e viceversa (se penalizzo i parametri geotecnici di base, non penalizzo le resistenze da cui essi dipendono, e viceversa).

EUROCODE 7

Coefficienti parziali sulle azioni o sull'effetto delle azioni

Azioni	Simbolo	A1	A2
Permanenti	γ_g	1.35	1.0
Favorevoli		1.0	1.0
Accidentali	γ_q	1.5	1.3
Favorevoli		0	0

Coefficienti parziali sulle caratteristiche di resistenza

Parametro	Simbolo	M1	M2
Angolo di attrito	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	γ_{cu}	1.0	1.4
Resistenza non confinata	γ_{qu}	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	γ_s	1.0	1.0

*applicato alla tanp'

Coefficienti parziali di resistenza per pendii e stabilità globale

Resistenza	Simbolo	R1	R2	R3
Resistenza	$\gamma_{R,s}$	1.0	1.1	1.0

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

METODO OSSERVAZIONALE

Nei casi in cui a causa della particolare complessità della situazione geotecnica e dell'importanza e impegno dell'opera, dopo estese ed approfondite indagini permangano documentate ragioni di incertezza risolvibili solo in fase costruttiva, la progettazione può essere basata sul metodo osservazionale.

Nell'applicazione di tale metodo si deve seguire il seguente procedimento:

- devono essere stabiliti i limiti di accettabilità dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno;
- si deve dimostrare che la soluzione prescelta è accettabile in rapporto a tali limiti;
- devono essere previste soluzioni alternative, congruenti con il progetto, e definiti i relativi oneri economici;
- deve essere istituito un adeguato sistema di monitoraggio in corso d'opera, con i relativi piani di controllo, tale da consentire tempestivamente l'adozione di una delle soluzioni alternative previste, qualora i limiti indicati siano raggiunti.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

- MODELLO GEOLOGICO

- La caratterizzazione e la modellazione geologica del sito consiste nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio.
- In funzione del tipo di opera o di intervento e della complessità del contesto geologico, specifiche indagini saranno finalizzate alla documentata ricostruzione del modello geologico.
- Esso deve essere sviluppato in modo da costituire utile elemento di riferimento per il progettista per inquadrare i problemi geotecnici e per definire il programma delle indagini geotecniche.
- Metodi e risultati delle indagini devono essere esaurientemente esposti e commentati in una relazione geologica.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

- MODELLO GEOTECNICO

- Per modello geotecnico si intende uno schema rappresentativo delle condizioni stratigrafiche, del regime delle pressioni interstiziali e della caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce comprese nel volume significativo, finalizzato all'analisi quantitativa di uno specifico problema geotecnico.
- Le indagini geotecniche devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o di intervento e devono permettere la definizione dei modelli necessari alla progettazione.
- I valori caratteristici delle grandezze fisiche e meccaniche da attribuire ai terreni devono essere ottenuti mediante specifiche prove di laboratorio su campioni di terreno e attraverso l'interpretazione dei risultati di prove e misure in sito.
- Per valore caratteristico di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato.
- È responsabilità del progettista la definizione del piano delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica.
- Le indagini e le prove devono essere eseguite e certificate dai laboratori facenti parte dell'elenco depositato presso il Servizio Tecnico Centrale del Ministero delle Infrastrutture.
- Nel caso di costruzioni o di interventi di modesta rilevanza, che ricadano in zone ben conosciute dal punto di vista geotecnico, la progettazione può essere basata sull'esperienza e sulle conoscenze disponibili, ferma restando la piena responsabilità del progettista su ipotesi e scelte progettuali.

Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

ASPETTI GEOTECNICI

Parte I - Considerazioni generali

1. Comportamento meccanico dei terreni sotto azioni statiche e dinamiche
2. Principi di progettazione e metodologie di analisi
3. Moti sismici di riferimento

Parte II - Analisi geotecnica del sito

4. Pericolosità ed effetti del sito
5. Risposta sismica locale
6. Liquefazione
7. Stabilità di pendii e dei fronti di scavo

Parte III - Opere geotecniche

8. Fondazioni
9. Fondazioni superficiali
10. Fondazioni su pali
11. Opere di sostegno a gravità
12. Opere di sostegno flessibili
13. Opere in terra rinforzata
14. Costruzioni in sotterraneo e scavi a cielo aperto
15. Costruzioni in terra

La **Geotecnica** è la disciplina dell' **Ingegneria** che studia la risposta meccanica di **terreni e rocce** alle azioni di superficie trasmesse da strutture e altri manufatti, alle forze di volume derivanti da gravità, eventi sismici e moti di filtrazione e alle variazioni di geometria prodotte da erosione e scavi.

Scopo primario è di dare risposte ai quesiti sulla stabilità del territorio e di definire i margini di sicurezza delle opere, per gli aspetti dipendenti dal comportamento del terreno, rispetto alle possibili condizioni di stato limite ultimo (SLU) e di servizio (SLE), nelle fasi di **progetto, costruzione, collaudo ed esercizio**.

Essa fa uso dei metodi sia **teorici** sia **sperimentali** della meccanica applicata.

↓

Importanza di conoscere il COMPORTAMENTO MECCANICO

PROPRIETÀ MECCANICHE DEL TERRENO

Argilla < 2_μ

(terreni "A GRANA FINE")

Sabbia > 1 mm

(terreni "A GRANA GROSSA")

Catene di tensione trasmettono stati di tensione all'interno del terreno

BENCHÉ LA STRUTTURA INTERNA (FORMA; GRANULOMETRIA) DEI VARI TIPI DI TERRENO SIA ASSAI DIVERSA, IL LORO COMPORTAMENTO MACROSCOPICO È QUALITATIVAMENTE SIMILE

UNA DIFFERENZA FONDAMENTALE È LEGATA ALLA PERMEABILITÀ

ARGILLA

$K \approx 10^{-7}$ cm/s

SABBIA

$K \approx 10^{-1}$ cm/s

POICHÉ È IMPOSSIBILE, DA UN PUNTO DI VISTA PRATICO, SEGUIRE NEL DETTAGLIO LO STATO TENSIONALE NEI GRANELLI E CONOSCERE LE CONDIZIONI INIZIALI ED AL CONFINO, SI OPERA CON RIFERIMENTO AD UN MEZZO CONTINUO EQUIVALENTE SOLIDO CHE OCCUPA TUTTO IL VOLUME.

TUTTAVIA, LA RISPOSTA MECCANICA DEI TERRENI, IN TERMINI DI DEFORMABILITÀ E RESISTENZA, È SPIEGABILE TENENDO PRESENTE LA NATURA PARTICELLARE DEL MEZZO COSTITUITO DA GRANULI.

Terreno a grana fine

Contenuto d'acqua:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (\%)$$

Stato solido

Stato semisolido

Stato plastico

Stato liquido

Limiti di Atterberg da prove di laboratorio

Indice di plasticità $PI = w_L - w_P$

Indice di liquidità $LI = \frac{(w - w_P)}{PI}$

Indice di consistenza $IC = \frac{(w_L - w)}{PI} = 1 - LI$

Terreno a grana grossa

Densità relativa:

$$D_r = \frac{(e_{max} - e_s)}{(e_{max} - e_{min})} \cdot 100 \quad (\%)$$

$e = \frac{V_v}{V_s}$ da prove di laboratorio

D _r (%)	Stato di addensamento
0-15	Molto sciolto
15-35	Sciolto
35-65	Medio
65-85	Denso
85-100	Molto denso

Aumento della densità relativa

IL TERRENO E' QUINDI UN CONTINUO POROSO

IL FLUIDO INTERSTIZIALE (GENERALMENTE ACQUA) PERCOLA ATTRAVERSO UNA FITTA RETE TRIDIMENSIONALE DI CANALI

LO STATO TENSIONALE TOTALE $\{\sigma\}$ APPLICATO AL TERRENO AVRA' UNA COMPONENTE INTERSTIZIALE $\{u\}$ CON LA QUALE INTERAGISCE

$$\sigma_x = \gamma \cdot z + q$$

$$\sigma_h = f(\sigma_z)$$

$$u = \gamma_w \cdot h_w$$

- CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI -

Prove in Situ

Prove di Laboratorio

Analisi dei problemi geotecnici

Caratterizzazione geotecnica del sottosuolo = Caratterizzazione da un punto di vista fisico-meccanico di quella parte di sottosuolo che influenza il comportamento dell'opera di progetto.

A tal fine occorre considerare:

- costituzione del sottosuolo e geometria delle stratificazioni
- presenza e regime delle acque sotterranee
- proprietà fisico-meccaniche dei terreni
- stato tensionale attuale e passato

L'esecuzione di un'indagine geotecnica costituisce un **elemento essenziale** di qualsiasi progetto di ingegneria che interagisca con il sottosuolo.

Finalità delle indagini

Scopo delle indagini geotecniche è la riduzione delle incertezze relative alle caratteristiche dei terreni (funzione dell'importanza dell'opera). Le indagini sono la base per la corretta definizione dei parametri del **modello geotecnico** del problema da studiare.

Ruolo di **grande rilievo** delle indagini nel quadro generale della progettazione di un'opera di ingegneria civile (spesso sottovalutato nella pratica). Il **grado di approfondimento** dell'indagine dipende dall'importanza del progetto e dalle sue fasi di sviluppo.

Contributo delle indagini geotecniche (con riferimento ad un'opera da realizzarsi ex-novo):

- supporto alla progettazione
- scelta del sito
- analisi di fattibilità
- supporto all'organizzazione del lavoro

Programmare una campagna di indagini

Acquisire tutte le informazioni sul sito in esame (situazione geologica, materiale bibliografico, indagini precedenti)

Scelta di articolazione ed estensione delle indagini

- funzione dell'opera geotecnica (fase di progetto, volume significativo, parametri geotecnici)
- budget a disposizione

Scelta dei mezzi d'indagine

- limiti e potenzialità degli strumenti
- aspetti significativi ai fini della progettazione
- interpretazione e significatività dei risultati

Soggetti coinvolti:

- progettista (elabora programma, sovrintende all'esecuzione, interpretazione dei risultati)
- impresa specializzata (prove in situ)
- laboratorio geotecnico (prove di laboratorio)

A chi affidare la programmazione/realizzazione delle indagini?

Estensione e frequenza delle indagini

Volume significativo (relativamente ad un'opera) = volume di terreno che, con le sue proprietà, influenza in modo significativo il comportamento dell'opera stessa

Il volume significativo è funzione di:

- tipo e dimensioni dell'opera
- costituzione del sottosuolo
- carichi applicati

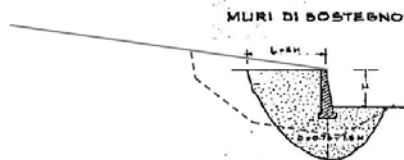
Volume significativo: indicazioni di massima sul volume significativo da investigare con indagini geotecniche, per i principali tipi di manufatto (per analisi in condizioni di equilibrio limite e di deformazioni ammissibili).

N.B. Indicazioni fornite per approccio in campo statico

[da A.G.I. 1977]

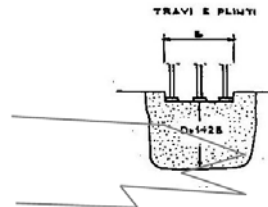
Per indagini finalizzate a problemi geotecnici in aree sismiche, il volume significativo deve tener conto della possibilità di fenomeni di instabilità, dovuti a:

- ❖ innesco o riattivazione di frane (sia di neoformazione, sia temporaneamente inattive o quiescenti), con possibilità di estensione della massa instabile, a monte dell'opera di sostegno, al di là del valore $L = 2H$ suggerito da A.G.I. (valore, peraltro, di per sé raramente rispettato nella comune pratica progettuale);



(Per indagini finalizzate a problemi geotecnici in aree sismiche, il volume significativo deve tener conto della possibilità di fenomeni di instabilità, dovuti a:)

- ❖ liquefazione di depositi sabbiosi saturi, anche al di sotto e all'esterno della massa di terreno interessata dal c.d. "bulbo delle pressioni", con possibile ripercussione sulla stabilità delle fondazioni stesse (o delle strutture di sostegno).



Prove in sito e prove di laboratorio

Le indagini necessarie alla caratterizzazione geotecnica del sottosuolo (i.e. quantificare la risposta meccanica delle terre) possono essere effettuate tramite:

- prove di laboratorio
- **prove in sito**
- analisi retrospettiva del comportamento di opere in vera grandezza (monitoraggio, misure in sito)

Vantaggi offerti dalle prove in sito

- volume di terreno indagato, che consente di portare in conto le peculiarità macrostrutturali del terreno
- più rapide ed economiche delle prove effettuate in laboratorio
- possibilità di indagare terreni per i quali il prelievo di campioni è impossibile
- (con alcune attrezzature) registrazione continua di parametri, peculiarità stratigrafiche

Limitazioni delle prove in sito:

- natura del materiale indagato non direttamente identificata
- problema al contorno da risolvere in sede di interpretazione
- disturbo introdotto dallo strumento di misura, interpretazione empirica della prova.

Prove in sito e prove di laboratorio

	Prove in sito	Prove di laboratorio
VANTAGGI	volume di terreno	natura del materiale
	economicità e rapidità	condizioni al contorno
	terreni a grana grossa	condizioni di drenaggio
	peculiarità stratigrafiche e strutturali	percorsi di carico
SVANTAGGI	natura del materiale	volume di terreno
	condizioni al contorno	tempi lunghi
	interpretazione empirica	disturbo del campione

Le prove in sito e quelle di laboratorio sono **complementari** e NON alternative le une alle altre.

Prove in sito e caratterizzazione geotecnica

Parametri geotecnici / Strumento d'indagine	Profilo stratigrafico	Stato tensionale	Resistenza al taglio (Non drenata)	Resistenza al taglio (Drenata)	Deformabilità	Permeabilità
CPT, CPTU	X		X	X		X
SPT	X			X		
Dilatometro		X			X	
Scissometro			X			
Pressiometro		X	X		X	
Prove geofisiche					X	
Prove di permeabilità						X

Tabella 3 - Potenzialità delle indagini in situ (Lancellotta, 1997).

Finalità	Mezzi di indagine	Terreni coesivi	Terreni non coesivi
Profilo stratigrafico	Sondaggi	D	D
	Prove penetrometriche	IN	IN
Rilievo falda	Dilatometro	IN	IN
	Pneumometri	D	D
Caratteristiche di permeabilità	Sondaggi	D	D
	Pozzi	D	D
Prove emungimento	Prove in foro di sondaggio	-	D, R
	Misure piezometriche	D	-
Parametri di deformabilità	Pressiometro Ménard	D, R	D, R
	Pressiometro autoporforante	D	D
Prove penetrometriche statiche	Pressiometro statico	NR	E
	Prove penetrometriche dinamiche	NR	E
Dilatometro	Prova carico su piastra	D	D
	Prova carico su piastra	D	D
Pressione orizzontale a riposo	Cross-Hole, Down-Hole	D	D
	Pressiometro	D	D
Parametri di resistenza al taglio	Prova penetrometrica statica	E	E
	Prova penetrometrica dinamica	NR	E
Dilatometro	Vane Test	D, E	-
	Prova carico su piastra	D	-
Pressione orizzontale a riposo	Pressiometro autoporforante	D, R	D, R
	Fratturazione idraulica	D, R	-
Dilatometro	Dilatometro	E, R	E, R

D = Determinazione diretta
E = Determinazione empirica
NR = Non rilevabile
IN = Non indagabile
R = Con riserva

PRINCIPIO DEGLI SFORZI EFFICACI

MOLTO SINTETICAMENTE $\sigma = \sigma' + u$

LO STATO TENSIONALE TOTALE $\{\sigma\}$ SI RIPARTISCE IN UNA COMPONENTE EFFICACE $\{\sigma'\}$ E UNA COMPONENTE INTERSTIZIALE $\{u\}$

NEL SEGUITO SI FARA' RIFERIMENTO:

A TENSIONI POSITIVE DI COMPRESSIONE σ (RARAMENTE A QUELLE DI TRAZIONE) SOPPORTABILI SIA DA SCHELETRO SOLIDO CHE DA FLUIDO INTERSTIZIALE

A TENSIONI TANGENZIALI (TAGLIO) τ SOPPORTABILI DAL SOLO SCHELETRO SOLIDO

ULTERIORE IPOTESI CHE SEMPLIFICA MOLTO LE ANALISI

TERRENO SECCO $\rightarrow S=0$
 TERRENO SATURO $\rightarrow S=1$

CONDIZIONI GEOTECNICHE "TIPICHE"

- IN GENERALE GLI STATI TENSIONALI INDOTTI DA CARICHI ESTERNI O VARIAZIONI GEOMETRICHE AGISCONO (ALTERANDONE LO STATO) SIA SULLE TENSIONI EFFICACI CHE SU QUELLE NEUTRE PRE-ESISTENTI
- LA DETERMINAZIONE DELLA PRESSIONE INTERSTIZIALE (NEUTRA) E' FONDAMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLO STATO TENSIONALE EFFICACE E QUINDI DELLO STATO DEFORMATIVO.
- PURTROPPO E' SPESSO POCO AGEVOLE CONOSCERNE CON ESATTEZZA I VALORI;

4 CASI TIPICI:

- TERRENO SECCO \rightarrow NO INTERAZIONE $\sigma = \sigma'$
- ACQUA IN QUIETE $\rightarrow u$ IDROSTATICA NOTA
- FILTRAZIONE: REGIME STAZIONARIO \rightarrow NECESSITA' CONOSCENZA CONDIZIONI AL CONTERNO
- FILTRAZIONE: REGIME TRANSITORIO \rightarrow NECESSITA' CONOSCENZA CONDIZIONI AL CONTERNO + IPOTESI SEMPLIFICATIVE + PARAMETRI DEL TERRENO

CASO DI GRANDE INTERESSE PER GLI ASPETTI DEFORMATIVI (ASSESTAMENTI TERRENO E OPERE) DI INTERESSE PRATICO PARTICOLARMENTE PER TERRENI A GRANA FINE (BASSA PERMEABILITA') \rightarrow FENOMENO DI "CONSOLIDAZIONE"

IN GEOTECNICA SI RICONOSCONO DUE CONDIZIONI DI RIFERIMENTO:

"CONDIZIONI "DRENATE"

"CONDIZIONI "NON DRENATE"

CONDIZIONI DRENATE

Caratterizzate da:

Processo di carico accompagnato da moto di filtrazione (drenaggio)

le pressioni neutre rimangono costanti ($\Delta u = \dot{u} = 0$)

pressioni totali = pressioni efficaci ($\Delta \sigma = \Delta \sigma'$)

CONDIZIONI DRENATE E NON DRENATE:

OLTRE ALLA VELOCITA' DI FILTRAZIONE (PERMEABILITA') E' NECESSARIO TENERE CONTO DELLA VELOCITA' DI APPLICAZIONE DEL CARICO CHE PUO' ESSERE MOLTO Variabile

Dimensioni delle particelle	k (m/s)
Gravie	$> 10^{-2}$
Sabbie	$10^{-3} - 10^{-1}$
Limo	$10^{-7} - 10^{-9}$
Argilla	$< 10^{-10}$

+

Evento	Durata
Impatto (terremoto, battitura di pali)	$< 1s$
Ondata marina	10^1
Decaricamento di una trincea	10^2 a 10^3 h
Carico di una piccola fondazione	10^2 a 10^3 giorni
Decaricamento di una nuova di grandi dimensioni	10^3 a 10^4 anni
Rilevato	10^2 a 10^3 anni
Fondazione	10^3 a 10^4 anni

NELL'ANALISI DI QUALUNQUE PROBLEMA DI ING. GEOTECNICA E' FONDAMENTALE VALUTARE QUALI CONDIZIONI SONO RAPPRESENTATIVE (E PIU' PERICOLOSE) PER IL PROBLEMA IN ESAME. LE PROCEDURE CHE SI UTILIZZANO NEI DUE CASI SONO COMPLETAMENTE DIVERSE.

↓

SCELTA PARAMETRI DI CALCOLO

Importanza permeabilità terreno + tempo applicazione del carico

p.es.

- ✓ impatto: $t < 1$ s
- ✓ carico statico plinto: $t \approx$ settimane
- ✓ grande rilevato: $t \approx$ anni

ESEMPI DI VERIFICHE DI STABILITA' IN CONDIZIONI

DRENATE

rilevato costruito molto lentamente su un deposito argilloso consistente

NON DRENATE

rilevato costruito rapidamente su un deposito argilloso poco consistente

Più in generale fondazione superficiale su terreno argilloso poco consistente

PENDII NATURALI vengono generalmente verificati in condizioni drenate (lungo termine, sforzi efficaci) in quanto le pressioni interstiziali sono in equilibrio; si devono però tenere in debito conto le più sfavorevoli condizioni ed evoluzioni della falda

RESISTENZA DEI TERRENI

Poiché il comportamento meccanico dei terreni è retto dallo stato tensionale efficace, il criterio di rottura più idoneo ad esprimere la resistenza appare dunque il Criterio di Mohr-Coulomb:

$$\tau_R = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi'$$

La resistenza al taglio è funzione dello stato tensionale efficace, quindi essa risulta determinabile se è noto il valore u della pressione dell'acqua interstiziale. In condizioni non drenate, all'applicazione di un carico corrisponde un incremento della pressione u (si generano sovrappressioni Δu). Nelle prove di laboratorio il valore della pressione neutra viene direttamente misurato ed è pertanto possibile esprimere la resistenza del materiale in funzione delle tensioni efficaci. Nelle applicazioni pratiche, il problema è più complesso, in quanto il valore della u dipende dalle caratteristiche strutturali del deposito e dalla non linearità di comportamento del terreno. Per superare tali difficoltà è prassi corrente il ricorso al Criterio di Tresca, ossia ad una resistenza definita in termini di tensioni totali, trascurando l'interazione tra lo scheletro solido e l'acqua interstiziale (approccio convenzionale):

$$\tau_R = c_u$$

Per tale ragione c_u viene anche detta resistenza in condizioni non drenate (ovvero undrained strenght, s_u).

RESISTENZA DEI TERRENI

CONDIZIONI DRENATE:

$$\tau_R = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi'$$

$c' =$ coesione (resistenza per $\sigma'_n = 0$)
 $\phi' =$ angolo di resistenza al taglio

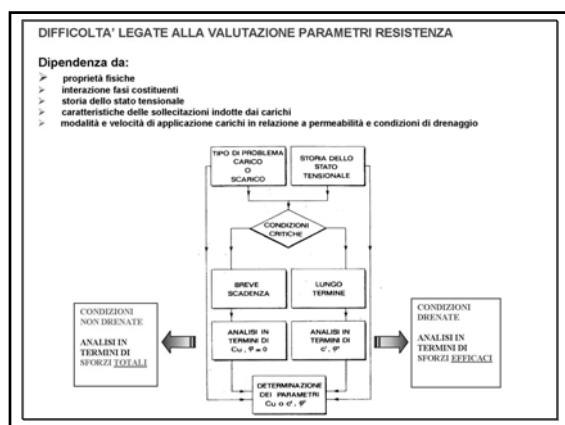
CONDIZIONI NON DRENATE:

$$\tau_R = c_u$$

$c_u =$ resistenza in termini di tensioni totali

Nota: $c' = 0$ SE TERRENO A GRANA GROSSA O A GRANA FINE NORMALCONSOLIDATO

Nota: determinazione dei parametri di resistenza al taglio da prove di taglio diretto o prove triassiali



VERIFICHE GEOTECNICHE

Requisito comune

Ulteriore Requisito

STABILITÀ*

LIMITATI SPOSTAMENTI

Problemi ricorrenti:

- *Problemi di deformazione (spostamenti)
- *Problemi di resistenza (perdita stabilità)

Sono aspetti di uno stesso fenomeno, legati al **comportamento tenso-deformativo** del terreno, che spesso, per motivi pratici, vengono trattati separatamente.

Problemi di deformazione (spostamenti)

- corretta scelta dei parametri
- non linearità di comportamento meccanico

Problemi di resistenza (perdita stabilità)

- valutazione condizioni più critiche per la struttura
- corretta scelta dei parametri
- ipotesi di equilibrio limite (??)
- fenomeni di rottura progressiva (soglie di resistenza) in pendii, scavi, opere sostegno, fondazioni.

ASPETTI CONNESSI A RESISTENZA e DEFORMABILITÀ*

Per studiare il comportamento di un terreno, come per un qualunque altro materiale, è necessario definire come variano le sue deformazioni con lo stato tensionale.

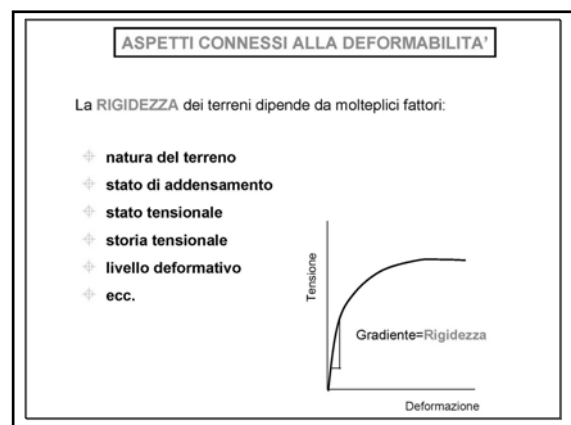
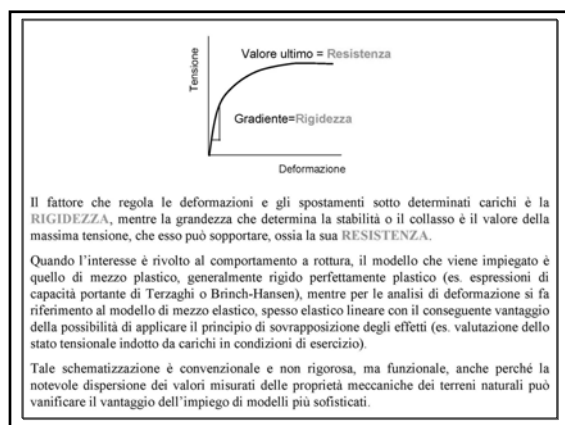
Tale legame, espresso in termini analitici, prende il nome di **LEGGE COSTITUTIVA**, ed è funzione della natura del materiale.

Gli **obiettivi** nella definizione di un modello di comportamento sono fondamentalmente due:

- completezza;**
- semplicità** (sia per quanto riguarda l'impiego finalizzato alla risoluzione di problemi pratici, sia per la valutazione dei parametri necessari).

Ciò risulta assai difficile nel caso dei terreni, il cui comportamento è: **ELASTICO NON LINEARE, ANISOTROPO, PLASTICO, VISCOSO E DIPENDENTE DALLE CONDIZIONI DI DRENAGGIO.**

Generalmente, nella pratica progettuale si impiegano **modelli di comportamento parziali**: alcuni adatti all'analisi di **stabilità** delle opere (ovvero all'individuazione di un adeguato coefficiente di sicurezza nei confronti della rottura) ed altri al **calcolo degli spostamenti** in condizioni di esercizio.



VERIFICHE GEOTECNICHE

Una volta garantita la stabilità dell'opera il **PROGETTISTA** deve controllare che le deformazioni della costruzione e delle aree circostanti causate dall'assestamento del terreno possano ritenersi **accettabili**, e non inducano invece nei materiali da costruzione delle **sollecitazioni superiori ai limiti di sicurezza**.

In molti casi tale accertamento (**calcolo CEDIMENTI**) è una verifica ancora più importante di quella di stabilità e necessita quindi **particolare attenzione**.

La valutazione dei cedimenti (totali e differenziali) è, ovviamente, strettamente legata al comportamento **DEFORMATIVO** dei terreni.

In tale comportamento, così come nella valutazione dei parametri che lo caratterizzano, risiedono le maggiori fonti di **incertezza** e le maggiori **difficoltà** in ingegneria geotecnica.

CEDIMENTI

- ✦ Attesa risposta deformativa del terreno all'applicazione del carico della fondazione
 - Cedimento "immediato"
 - Cedimento di "consolidazione"
 - Cedimento "secondario"
- ✦ Variazione dei livelli di falda
- ✦ Esecuzione scavi limitrofi
- ✦ Cambiamento carichi in fondazione
- ✦ Vibrazioni
- ✦ ecc.

Metodi per il calcolo dei CEDIMENTI

✦ Terreni a grana fine (" argille ")

teoria consolidazione monodimensionale ↔ prova compressibilità edometrica

$$S_T = S_i + S_c + (S_s)$$

(d) Cedimenti in condizioni non drenate e cedimenti di consolidazione

✦ Terreni a grana grossa (" sabbie ")

metodi "empirici" + teoria elasticità ↔ prove in sito

$$S_T \cong S_i$$

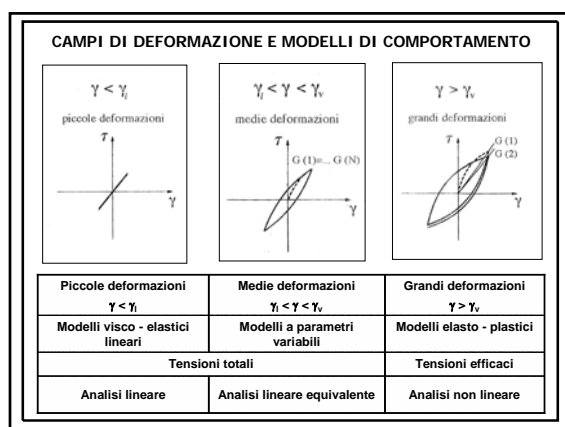
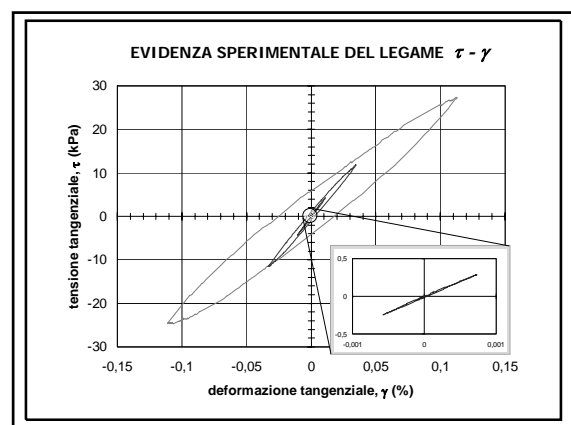
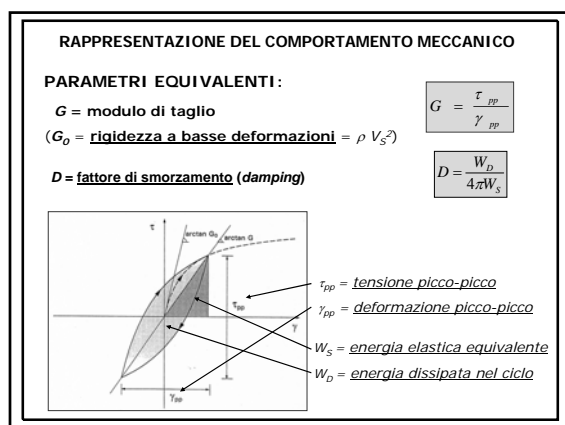
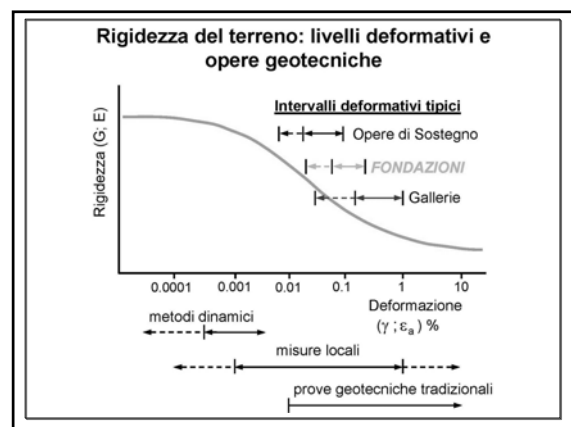
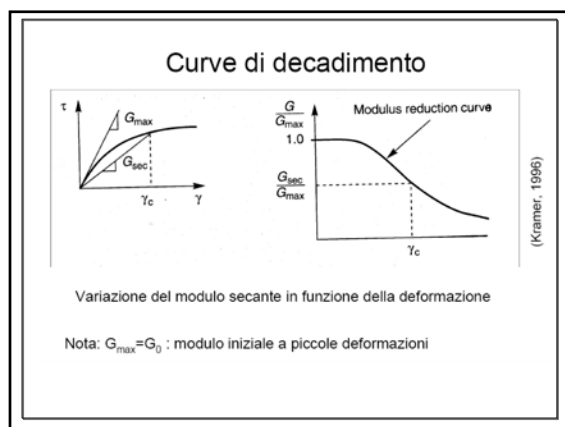
(b) Cedimenti in condizioni drenate

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

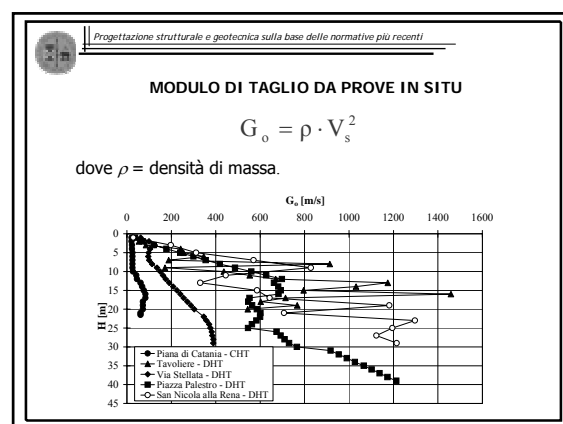
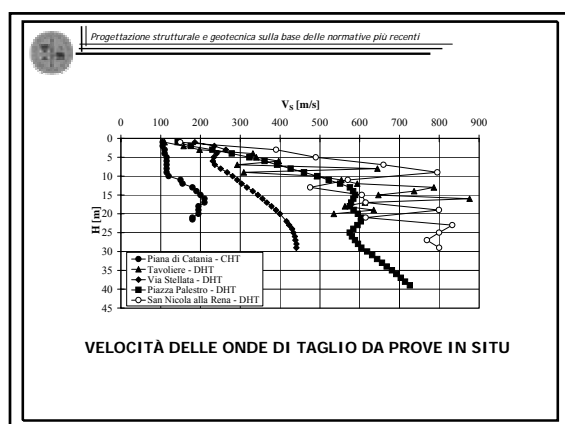
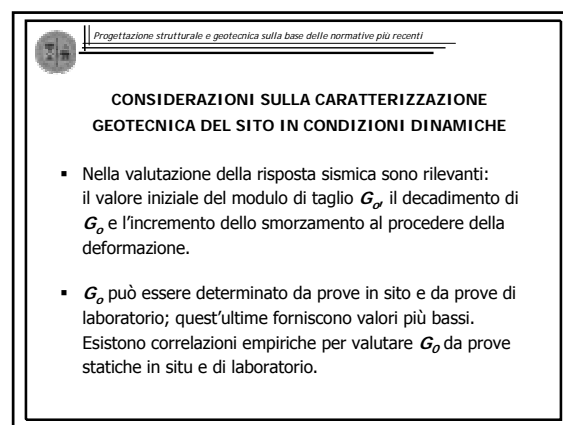
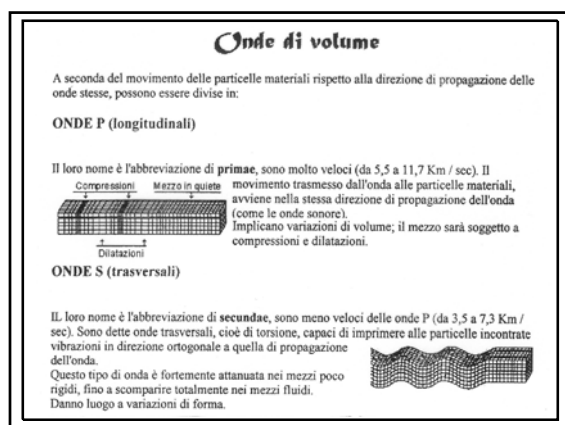
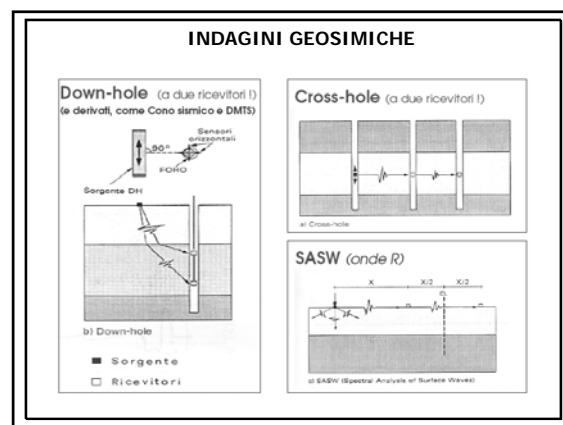
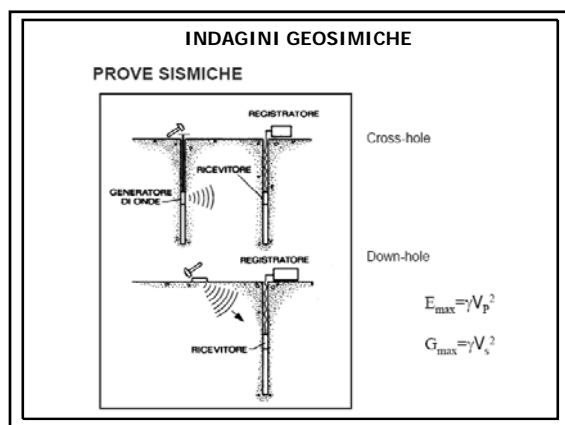
7.11.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA AI FINI SISMICI

Le indagini geotecniche devono essere predisposte dal progettista in presenza di un quadro geologico adeguatamente definito, che comprenda i principali caratteri tettonici e litologici, nonché l'eventuale preesistenza di fenomeni di instabilità del territorio. Le indagini devono comprendere l'accertamento degli elementi che, unitamente agli effetti topografici, influenzano la propagazione delle onde sismiche, quali le condizioni stratigrafiche e la presenza di un substrato rigido o di una formazione ad esso assimilabile.

- ☐ Nel caso di opere per le quali si preveda l'impiego di metodi d'analisi avanzata, è opportuna anche l'esecuzione di prove cicliche e dinamiche di laboratorio, quando sia tecnicamente possibile il prelievo di campioni indisturbati. In ogni caso, la caratterizzazione geotecnica dei terreni deve consentire almeno la classificazione del sottosuolo secondo i criteri esposti nel § 3.2.2.
- ☐ Nella caratterizzazione geotecnica è necessario valutare la dipendenza della rigidezza e dello smorzamento dal livello deformativo.
- ☐ Nelle analisi di stabilità in condizioni post-sismiche si deve tener conto della riduzione di resistenza al taglio indotta dal decadimento delle caratteristiche di resistenza per degradazione dei terreni e dall'eventuale accumulo di pressioni interstiziali che può verificarsi nei terreni saturi.
- ☐ Nei terreni a grana fina, le analisi possono essere condotte in termini di tensioni totali esprimendo la resistenza al taglio mediante la resistenza non drenata, valutata in condizioni di sollecitazione ciclica.



MISURA SPERIMENTALE DEI PARAMETRI MECCANICI									
Categorie di prova	Tipo di prov.	Stato tensionale	Informazione γ (%)	Esposizione τ (kg)	Rigidità	Smorzamento	Resistenza G	ν	ϕ
In situ	Penetrom.	SPT			$N \rightarrow V_s \rightarrow G_0$				ϕ
	CPT				$q_c \rightarrow V_s \rightarrow G_0$				ϕ
	Down-Hole				$V_p \rightarrow G_0$				
	Geofisiche	Cross-Hole	Litostatico	$< 10^{-3}$	$V_p \rightarrow G_0$				
		SASW		10-100	$V_s \rightarrow G_0$	possibile			
Laboratorio	Cicliche	Triassiale	Simmetria radiale	$> 10^{-3}$	0.01-1	$\tau_1 \rightarrow G \rightarrow G_0$	$W_D/W_S \rightarrow D$	$q/\sigma'_v \rightarrow N_c$	
		Ttaglio semplice	Simmetria radiale	$> 10^{-3}$	0.01-1	$\tau \rightarrow G$		$q/\sigma'_v \rightarrow N_c$	
		Ttaglio torsionale	Simmetria radiale	$10^{-3}-1$	0.01-1	$\tau \rightarrow G_0, G$			
	Dinamiche	Colonna risonante	Simmetria radiale	$10^{-3}-1$	> 10	$f \rightarrow G_0, G$	$A(f) \rightarrow D$		
		Trasduttori piezoelettrici	Simmetria radiale	$< 10^{-3}$	> 100	$V_s \rightarrow G_0$			



**DETEMINAZIONE DEL MODULO DI
TAGLIO DA PROVE IN SITU**

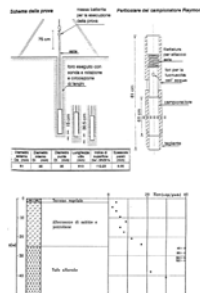
Correlazioni empiriche per determinare V_s da prove SPT

Yoshida e Motonori (1988):

$$V_s = \beta \cdot (N_{SPT})^{0.25} \cdot \sigma_{v0}^{0.14}$$

dove:

- V_s = velocità onde di taglio (m/s);
- N_{SPT} = numero di colpi da SPT;
- σ_{v0} = pressione verticale efficace;
- β = fattore geologico
(qualunque terreno = 55
sabbia fine = 49).



**DETEMINAZIONE DEL MODULO DI
TAGLIO DA PROVE IN SITU**

Correlazioni empiriche per determinare V_s da prove SPT

Ohta e Goto (1978):

$$V_s = 54.33 \cdot (N_{SPT})^{0.173} \cdot \alpha \cdot \beta \left(\frac{Z}{0.303} \right)^{0.193}$$

dove:

- V_s = velocità delle onde di taglio (m/s);
- N_{SPT} = numero di colpi da SPT;
- Z = profondità (m);
- α = fattore di età (Olocene = 1.000, Pleistocene = 1.303);
- β = fattore geologico (argille = 1.000, sabbie = 1.086).

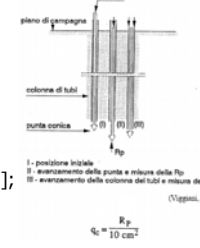
**Correlazioni empiriche per determinare G_o da
Prove Penetrometriche Statiche (CPT):**

Mayne e Rix (1993):

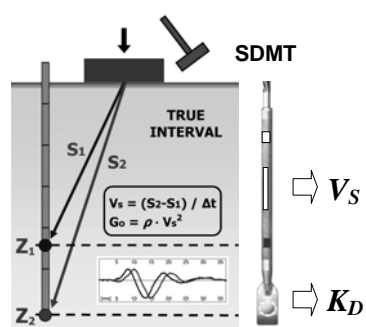
$$G_o = \frac{406 \cdot q_c^{0.696}}{e^{1.13}}$$

dove:

- q_c = resistenza alla punta [kPa];
- e = indice dei vuoti.





Misure eseguite con il Dilatometro sismico (SDMT)




$V_s = (S_2 - S_1) / \Delta t$
 $G_o = \rho \cdot V_s^2$



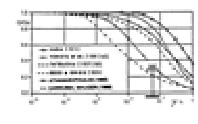
Prove SDMT eseguite a Catania nei siti test (luglio 2004)



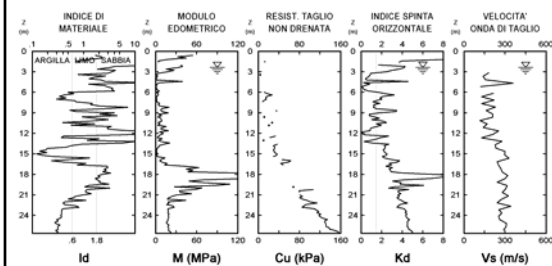
Villa Bellini, Catania



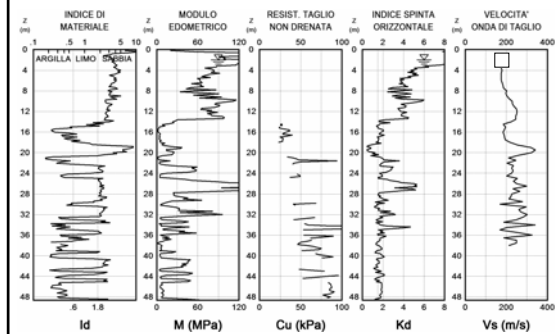
Modulo M6 ST Microelectronics, Catania

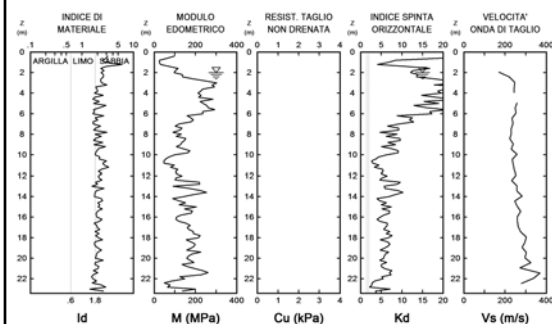
Prove SDMT eseguite a Cassino



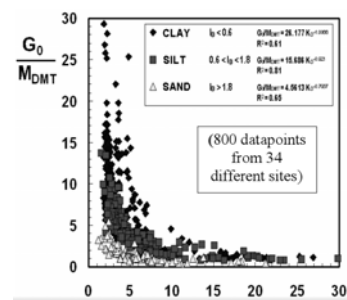
Prove SDMT eseguite a Venezia



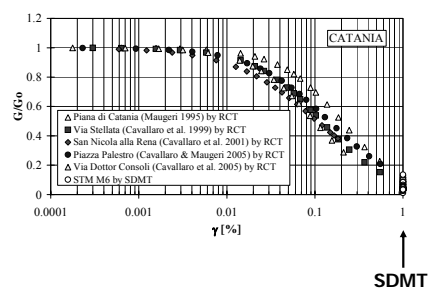
Risultati prove SDMT a Catania località San Giuseppe La Rena



Correlazioni per valutare G_o (da I_d , K_d , M_{DMT})



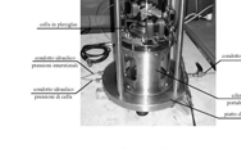
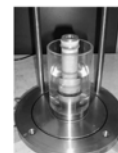
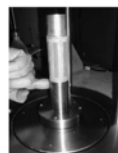
Prove SDMT eseguite a Catania nei siti test (luglio 2004)



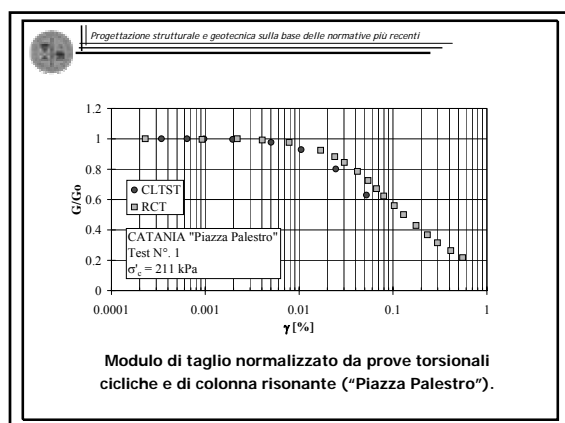
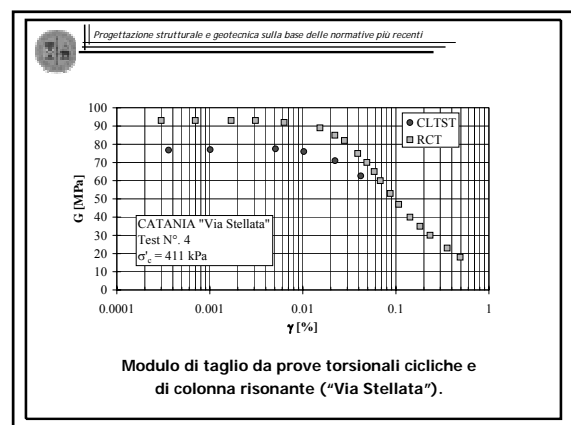
APPARECCHIO DI TAGLIO TORSIONALE CICLICO E DI COLONNA RISONANTE

Preparazione del provino per prova RC e TTC

Apparecchiatura per prova RC e TTC



Crespiellari, 2004



Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

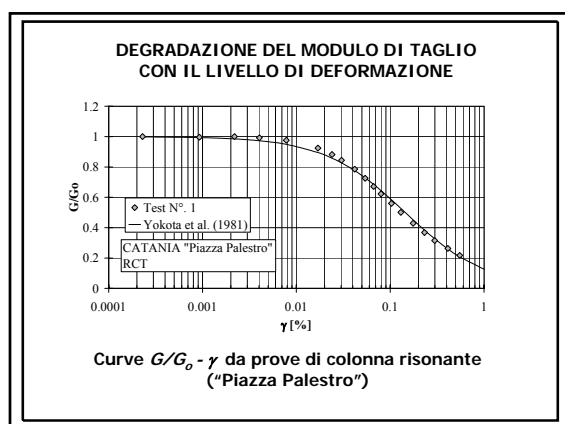
**DEGRADAZIONE DEL MODULO DI TAGLIO
CON IL LIVELLO DI DEFORMAZIONE**

EQUAZIONE DI YOKOTA *et al.* (1981)

$$\frac{G(\gamma)}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha \gamma (\%)^\beta}$$

dove:

- $G(\gamma)$ = modulo di taglio dipendente dalla deformazione;
- γ = deformazione di taglio;
- α, β = costanti del terreno.



Progettazione strutturale e geotecnica sulla base delle normative più recenti

ASPETTI GEOTECNICI

Parte I – Considerazioni generali

1. Comportamento meccanico dei terreni sotto azioni statiche e dinamiche
2. Principi di progettazione e metodologie di analisi
3. Moti sismici di riferimento

Parte II - Analisi geotecnica del sito

4. Pericolosità ed effetti del sito
5. Risposta sismica locale
6. Liquefazione
7. Stabilità di pendii e dei fronti di scavo

Parte III – Opere geotecniche

8. Fondazioni
9. Fondazioni superficiali
10. Fondazioni su pali
11. Opere di sostegno a gravità
12. Opere di sostegno flessibili
13. Opere in terra rinforzata
14. Costruzioni in sotterraneo e scavi a cielo aperto
15. Costruzioni in terra

IL RISCHIO SISMICO

$$R = V * E * P$$

- **V** = **Vulnerabilità**: attitudine dei beni presenti in un sito a subire un certo livello di danno per effetto di un certo livello di scuotimento.
- **E** = **Esposizione**: valore economico del bene e del suo uso.
- **P** = **Pericolosità sismica o hazard**: è la probabilità di eccedenza di un fissato valore del livello di scuotimento in un sito, in un prestabilito intervallo di tempo.

La **pericolosità** è legata solo al fenomeno naturale; il rischio dipende anche da variabili "umane": urbanizzazione, numero e valore degli edifici, presenza di industrie, etc. Non si può agire sull'**hazard**, ma si può mitigare il rischio.

La **Pericolosità Sismica** è tutto ciò associato con un **terremoto** che può influenzare l'attività delle persone. Ciò include, ad esempio, il **fragiliamento** superficiale, lo scuotimento del suolo, le **frane**, la deformazione del suolo, la **liquefazione**, gli **tsunami**.

VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO

VALUTAZIONE DELLA INTENSITÀ SISMICA

- Sismicità storica.
- D.M. 09.01.1996; Eurocodice EC8.
- GNDT: *Seismic Hazard Map of Italy*.
- Legge 31.12.1991 n.433.
- D.L. 31.03.1998 n. 112 (Decentramento alle Regioni ed agli Enti Locali).
- Ordinanza P.C.M. n.3274 del 20.03.2003 e *s.m.i.*
- Testo Unico per le Costruzioni del 30.03.2005 e *s.m.i.*
- Norme Tecniche per le Costruzioni del 14.01.2008.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

PERICOLOSITA' SISMICA

La **pericolosità sismica P** rappresenta una stima approssimata della sismicità di un'area e viene espressa mediante due indicatori:

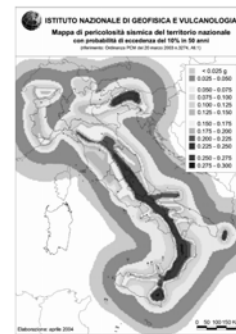
- **accelerazione orizzontale di picco (PGA)**
grandezza di interesse ingegneristico, che definisce le caratteristiche costruttive richieste agli edifici in zona sismica.
- **intensità macrosismica**
descrive il grado di danneggiamento causato dai terremoti.

AZIONE SISMICA

INGV: Mappe del **Rischio Sismico** in Italia

Approvata dalla
Commissione
Grandi Rischi nella
seduta del
06.04.2004.

Mapa di
Riferimento della
Ordinanza PCM del
20 Marzo 2003
n.3274 All. 1.



D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

AZIONE SISMICA



- Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) adottano un approccio prestazionale alla progettazione delle nuove strutture ed alla verifica di quelle esistenti.
- Nei riguardi dell'azione sismica l'obiettivo è il controllo del livello di danneggiamento delle strutture a fronte dei terremoti che possono verificarsi nel sito di costruzione.
- L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "**pericolosità sismica di base**", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A nelle NTC).
- La "**pericolosità sismica**" costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

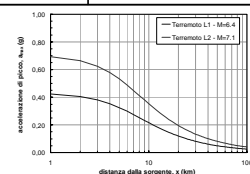
APPROCCIO PRESTAZIONALE : DEFINIZIONE DEI GRADI DI DANNO

Intensità di danno strutturale e funzionale da specificarsi in termini di soglie di ammissibilità di variabili tensionali, deformative o cinematiche.

Grado di danno	Condizioni sistema	Danno alla struttura	Perdita funzionalità
I Lieve	Agibile	Assente o trascurabile	Modesta o nulla
II Medio	Riparabile	Apprezzabile	Di breve durata
III Ingente	Non riparabile	Prossimo al collasso	Di lunga durata, o totale

Per il terremoto **L₁** (probabile):
• prestazione "buona"
• requisiti più stringenti
• **stato limite di danno (SLD)**

Per il terremoto **L₂** (severo):
• prestazione "sufficiente"
• requisiti meno vincolanti
• **stato limite ultimo (SLU)**



APPROCCIO PRESTAZIONALE : TERREMOTI DI PROGETTO

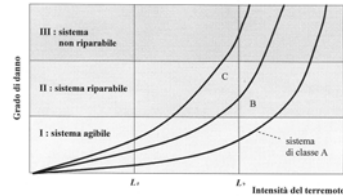
duplice verifica con riferimento a:

- terremoto "probabile", di livello **L1**, caratterizzato da un'intensità che ha una "probabilità di eccedenza" $P1$ in un arco temporale di riferimento T_s , correlato alla durata o alla vita utile del sistema in esame
 $T = 72$ anni
- terremoto "poco probabile", di livello **L2**, caratterizzato da una intensità che, nello stesso arco temporale T_s , ha una probabilità di eccedenza $P2$ più bassa
 $T = 475$ anni

INDIVIDUAZIONE DELLE CLASSI DI PRESTAZIONE

L'individuazione della classe di prestazione dipende dalla complessità e dall'importanza dell'opera in esame. Dovrebbe, in linea di principio, essere effettuata dal progettista caso per caso.

Classe di prestazione	Danno per terremoto di livello L_1	Danno per terremoto di livello L_2
A	I (Sistema agibile)	I (Sistema agibile)
B		II (Sistema riparabile)
C		III (Sistema non riparabile)



CLASSI DI PRESTAZIONE E METODOLOGIE DI ANALISI

Principio:

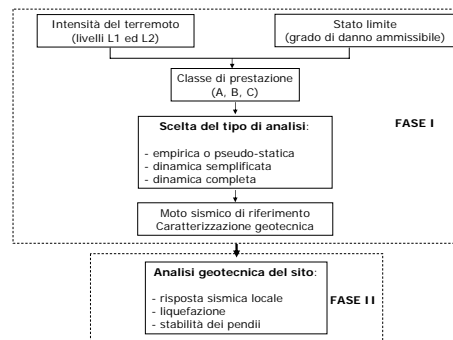
quanto più elevata è la classe di prestazione richiesta per un'opera, tanto più raffinato ed affidabile deve essere il metodo d'analisi.

Tipo di analisi	Classe di prestazione		
	C	B	A
Pseudo - statica e metodi empirici			
Analisi dinamica semplificata			
Analisi dinamica completa			
Progettazione finale (definitiva/esecutiva)			
Progettazione preliminare o zona di bassa pericolosità sismica			

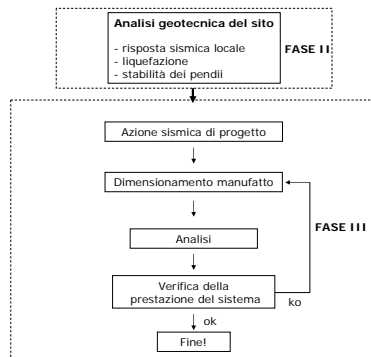
In proporzione all'aumento di **complessità dell'analisi**, devono crescere:

- i livelli di dettaglio nella caratterizzazione delle **azioni sismiche di riferimento**;
- l'ampiezza e la qualità delle **indagini sul sottosuolo**;
- l'accuratezza e il grado di dettaglio della **caratterizzazione geotecnica** e della **modellazione del legame costitutivo** dei terreni in sito e posti in opera;
- il grado di approfondimento nella **descrizione degli effetti indotti dalle azioni sismiche**.

PROCEDURA DI PROGETTO/VERIFICA GEOTECNICA



PROCEDURA DI PROGETTO/VERIFICA GEOTECNICA



D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

AZIONE SISMICA

2.4.3 PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (2.4.1)$$

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in Tab. 2.4.II.

Tab. 2.4.II - Valori del coefficiente d'uso C_U

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

Se $V_R \leq 35$ anni si pone comunque $V_R = 35$ anni.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

AZIONE SISMICA

2.4.2 CLASSI D'USO

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV; reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

AZIONE SISMICA

2.4 VITA NOMINALE, CLASSI D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO

2.4.1 VITA NOMINALE

La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere è quella riportata nella Tab. 2.4.1 e deve essere precisata nei documenti di progetto.

Tabella 2.4.1 – Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE	Vita Nominale V_N (in anni)
1 Opere provvisorie – Opere provvisoriamente – Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2 Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3 Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \Rightarrow **CONDIZIONI SISMICHE**

STATO LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

Gli stati limite di esercizio sono:

- **Stato Limite di Operatività (SLO):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno (SLD):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

Sicurezza e prestazioni \Rightarrow **CONDIZIONI SISMICHE**

STATO LIMITE ULTIMO (SLU)

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):** a seguito del terremoto 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.

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

AZIONE SISMICA

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R cui riferirsi per individuare l'azione sismica in ciascuno degli stati limite considerati sono:

Tabella 3.2.1 – Probabilità di superamento P_{VS} al variare dello stato limite considerato

Stati Limite	P_{VS} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO 81%
	SLD 63%
Stati limite ultimi	SLV 10%
	SLC 5%

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

AZIONE SISMICA

La pericolosità sismica in un generico sito è descritta a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido e orizzontale:

- **accelerazione orizzontale massima al sito a_g ;**
- **in corrispondenza dei punti di un reticolo di riferimento i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non più di 10 km);**
- **per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno T_R ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi;**
- **valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale F_o ;**
- **periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale T_c^* .**

D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

AZIONE SISMICA

La pericolosità sismica sul reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento può essere ricavata dai dati pubblicati sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, nei modi chiaramente precisati dalle NTC, per tenere conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e dalla morfologia della superficie.

Tali modifiche caratterizzano la **RISPOSTA SISMICA LOCALE**.