



REGIONE MARCHE
Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza
e per la Protezione Civile



Studi di approfondimento di Livello 3 sulle aree di attenzione per
instabilità di versante (O.C.D.P.C. n. 780 del 20/05/2021)

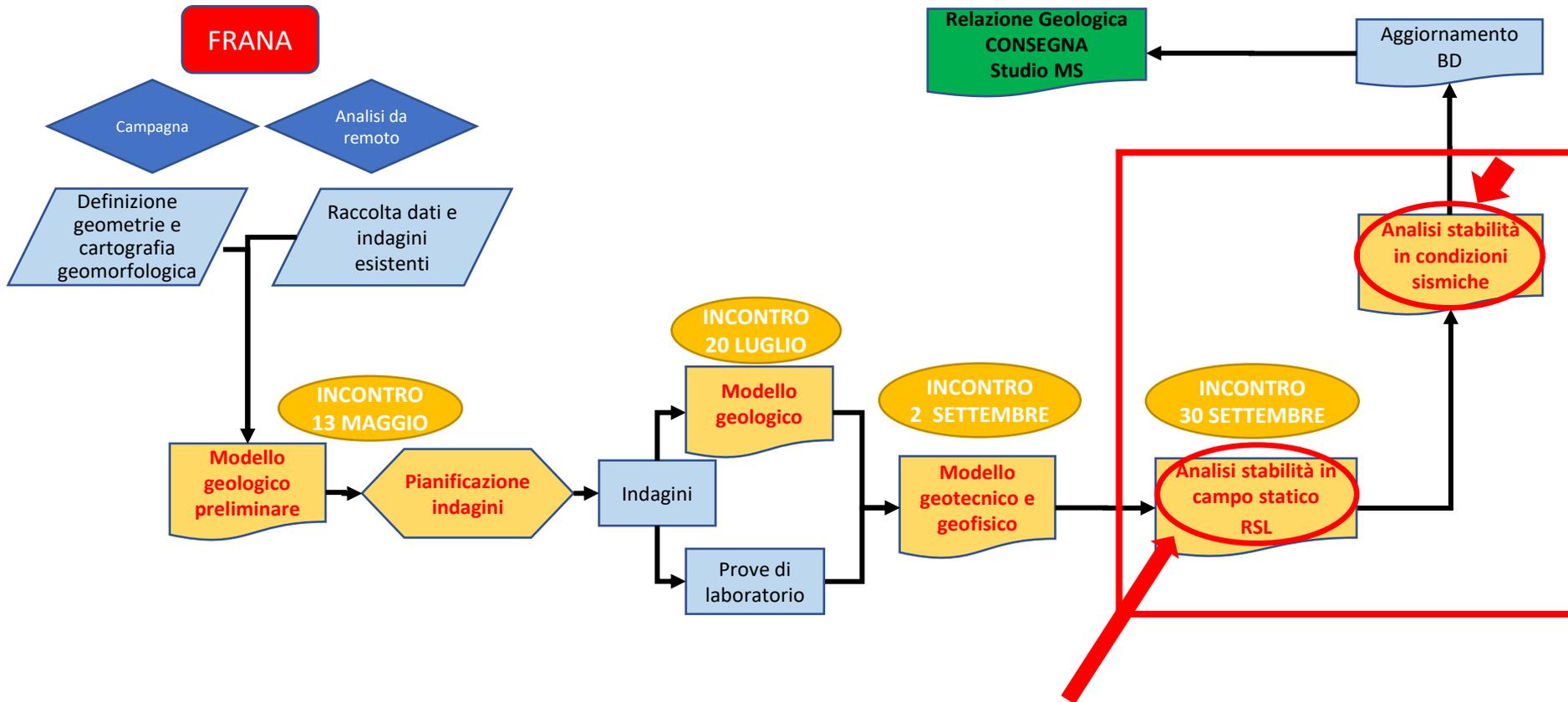
***Comportamento dei pendii in condizioni sismiche
(amplificazione locale e stabilità)***

Giornata di coordinamento con i professionisti incaricati (online) – Lunedì 11 Aprile 2021



Prof. Ing. Claudia Madiati
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Università di Firenze





☞ in questa fase oltre all'analisi di stabilità in campo statico è necessaria l'analisi pseudostatica per la determinazione di K_c (coefficiente sismico orizzontale corrispondente alla condizione limite $FS=1$ con i valori caratteristici dei parametri di resistenza)

ANALISI DI STABILITÀ DEI PENDII IN CONDIZIONI SISMICHE

In condizioni sismiche, alla complessità dei fattori che influenzano la stabilità in condizioni statiche, si aggiunge quella degli effetti legati alla natura dinamica e ciclica dell'azione sismica

A. CARATTERISTICHE DEL PENDIO

- Condizioni geologiche e geomorfologiche
- Geometria e stratigrafia
- Regime delle pressioni interstiziali
- Proprietà meccaniche dei terreni in condizioni statiche
- **Proprietà meccaniche dei terreni in condizioni dinamiche e cicliche**

FATTORI INFLUENTI IN
CONDIZIONI STATICHE

B. MOTO SISMICO DI RIFERIMENTO

- Input sismico di riferimento (accelerogramma)

C. RISPOSTA SISMICA LOCALE

- Analisi 1D
- Analisi 2D (effetti topografici)

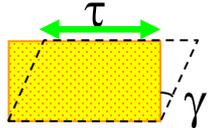
ANALISI DI STABILITÀ

- **Metodi pseudostatici**
- **Metodi degli spostamenti**
- (Metodi di analisi dinamica)

A. COMPORTAMENTO DEI TERRENI IN CONDIZIONI DINAMICHE E CICLICHE

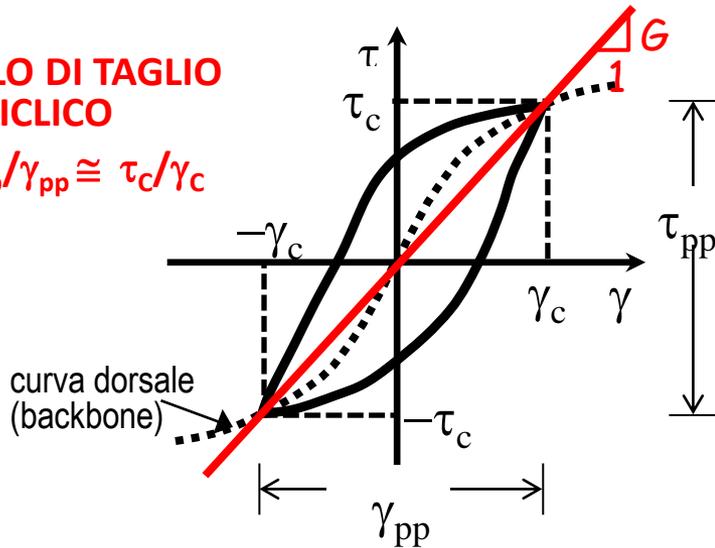
In condizioni dinamiche e cicliche il comportamento dei terreni:

- è definito in termini di legame **sforzi-deformazioni tangenziali**, sintetizzato mediante i **parametri modulo di taglio G** e **rapporto di smorzamento D**



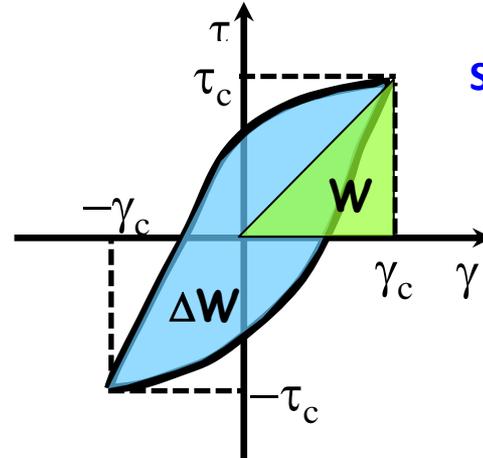
MODULO DI TAGLIO CICLICO

$$G = \tau_{pp} / \gamma_{pp} \cong \tau_c / \gamma_c$$



RAPPORTO DI SMORZAMENTO

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$



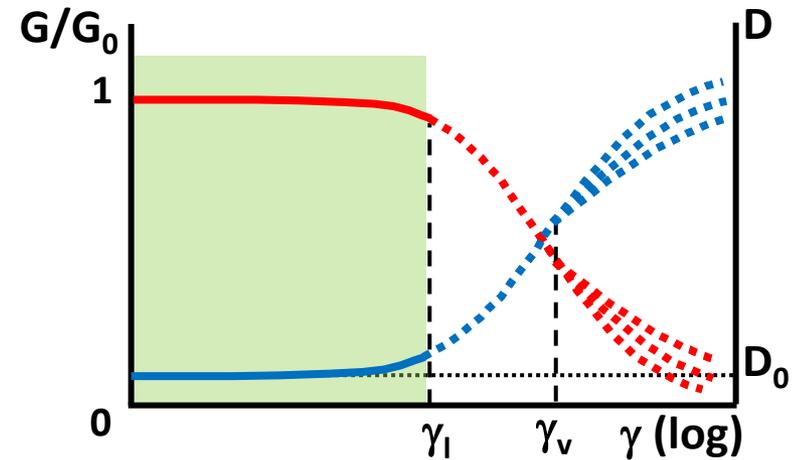
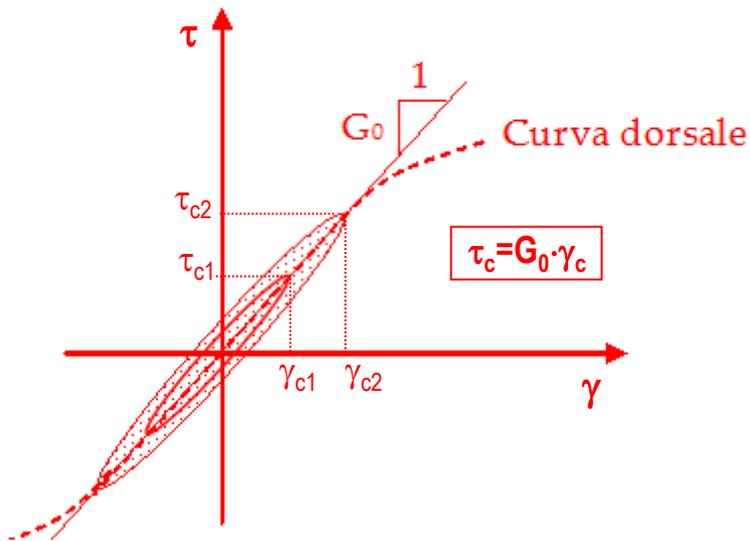
- è fortemente dipendente dall'entità della deformazione

Deformazioni	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1
γ [%]	piccole	medie	elevate		

soglia elastica → ← soglia volumetrica

A. COMPORTAMENTO DEI TERRENI IN CONDIZIONI DINAMICHE E CICLICHE

A piccole deformazioni il comportamento è approssimativamente visco-elastico lineare: **modulo di taglio** e **rapporto di smorzamento** sono indipendenti sia dalla deformazione γ_c sia dal numero di cicli N e pari ai valori iniziali



**A PICCOLE DEFORMAZIONI
(dominio elastico lineare)**

Modulo di taglio
 $G = G_0 = G_{\max}$

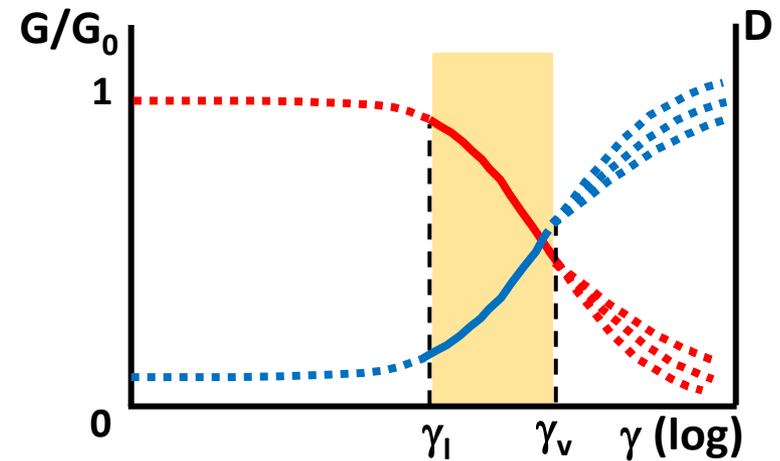
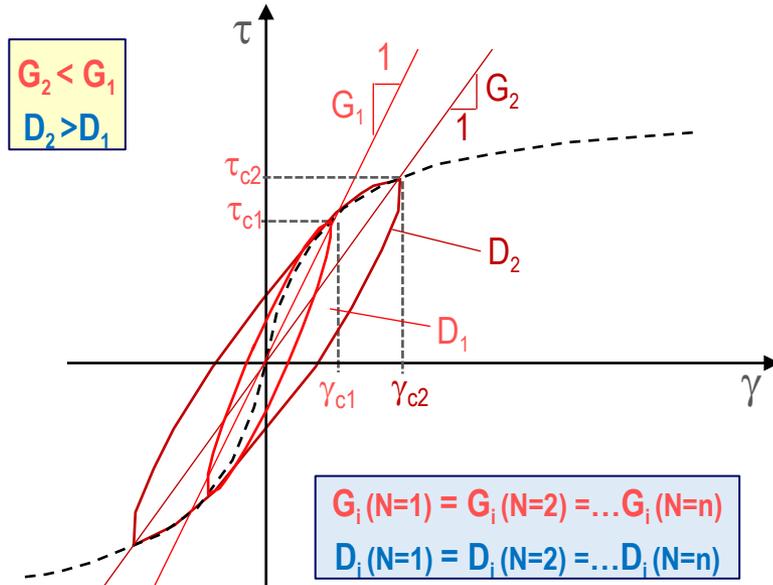
Rapporto di smorzamento*
 $D = D_0$

*talvolta si assume $D_0=0$

A. COMPORTAMENTO DEI TERRENI IN CONDIZIONI DINAMICHE E CICLICHE

A medie deformazioni il comportamento è non lineare e dissipativo:

modulo di taglio e rapporto di smorzamento variano con la deformazione γ_c , ma sono indipendenti dal numero di cicli N



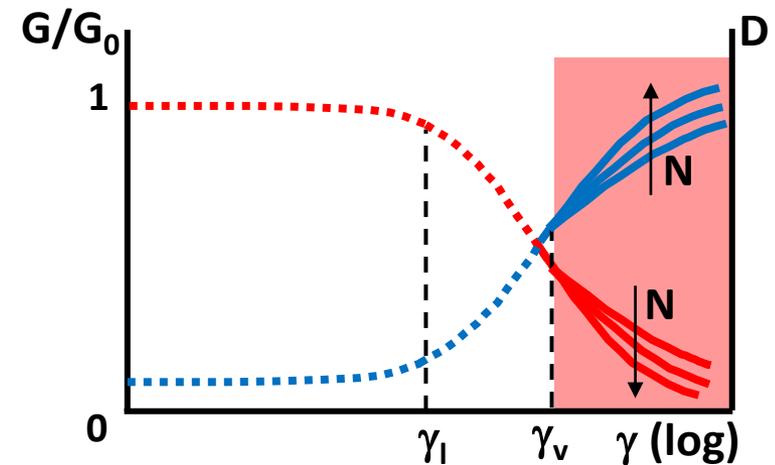
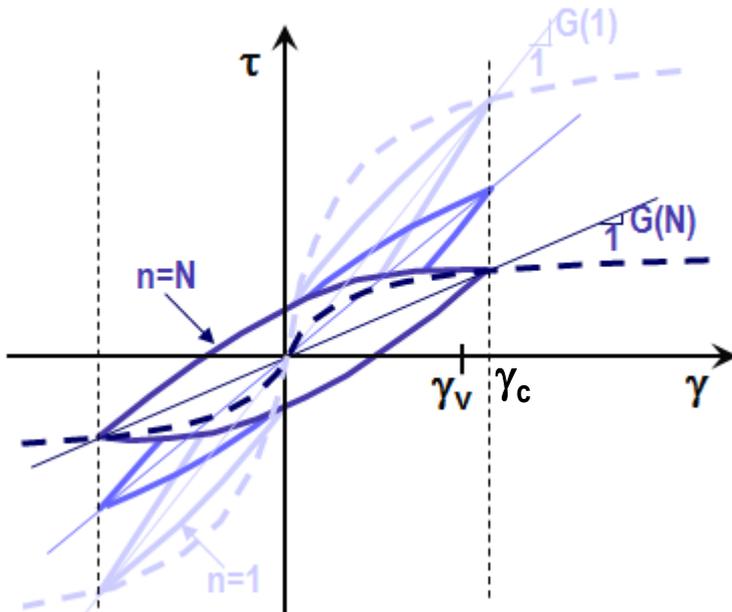
**A MEDIE DEFORMAZIONI
(dominio isteretico stabile)**

**Modulo di taglio
 $G = G(\gamma)$**

**Rapporto di smorzamento
 $D = D(\gamma)$**

A. COMPORTAMENTO DEI TERRENI IN CONDIZIONI DINAMICHE E CICLICHE

A deformazioni elevate il comportamento è non lineare, dissipativo e dipendente dal numero di cicli di carico: **modulo di taglio** e **rapporto di smorzamento** variano sia con la deformazione γ_c sia con il numero di cicli N



**A DEFORMAZIONI ELEVATE
(dominio isteretico instabile)**

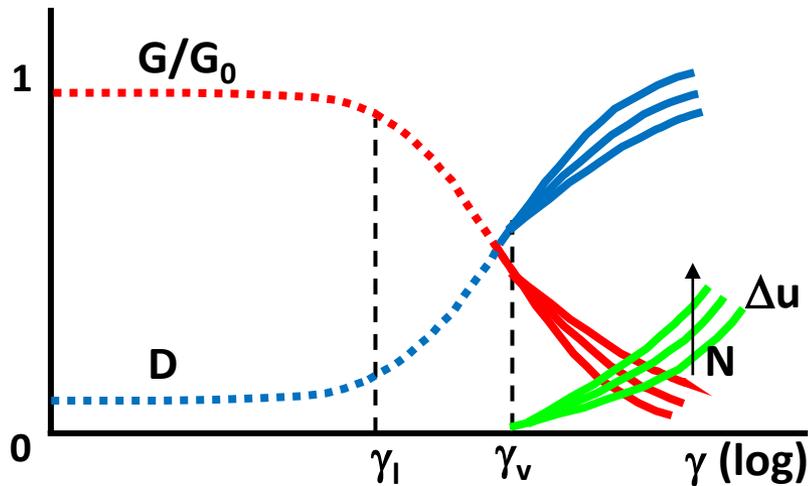
**Modulo di taglio
 $G = G(\gamma, N)$**

**Rapporto di smorzamento
 $D = D(\gamma, N)$**

A. COMPORTAMENTO DEI TERRENI IN CONDIZIONI DINAMICHE E CICLICHE

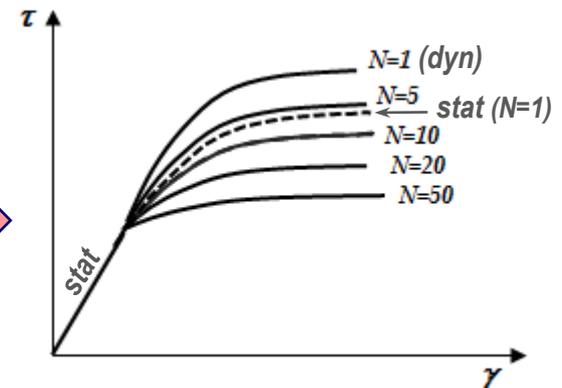
Inoltre a elevati livelli deformativi ($\gamma > \gamma_v$) in terreni saturi si osserva un progressivo incremento delle pressioni interstiziali con il numero di cicli

Per descrivere il comportamento ciclico dei terreni saturi a elevati livelli deformativi è necessario conoscere anche la legge di variazione delle sovrappressioni interstiziali con γ_c e con N

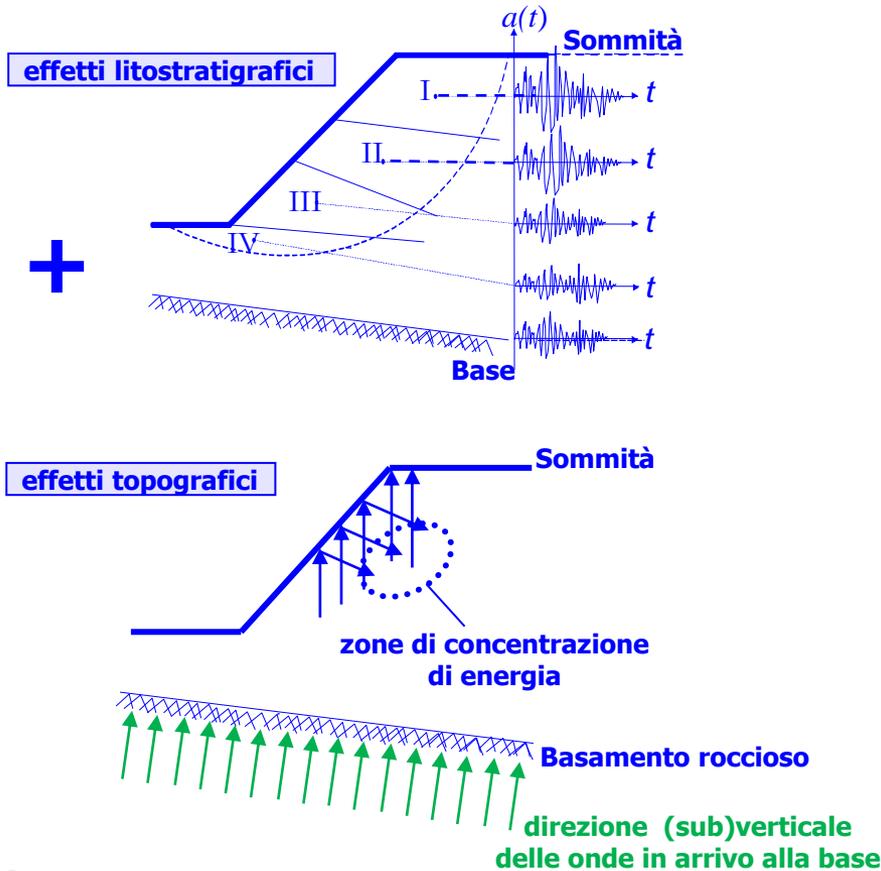


Sovrapressioni interstiziali
 $\Delta u = \Delta u(\gamma, N)$

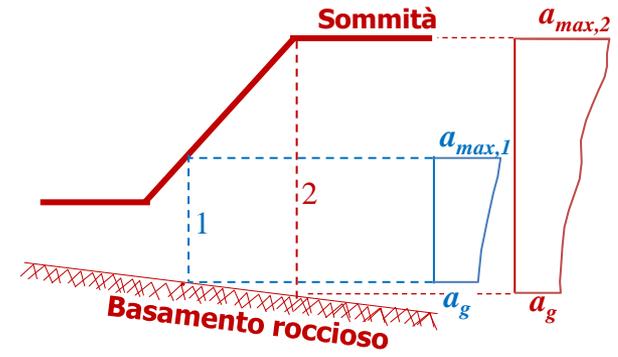
Alla degradazione della rigidezza corrisponde una degradazione della resistenza $\tau_{cyc} = \tau_{cyc}(\gamma, N)$



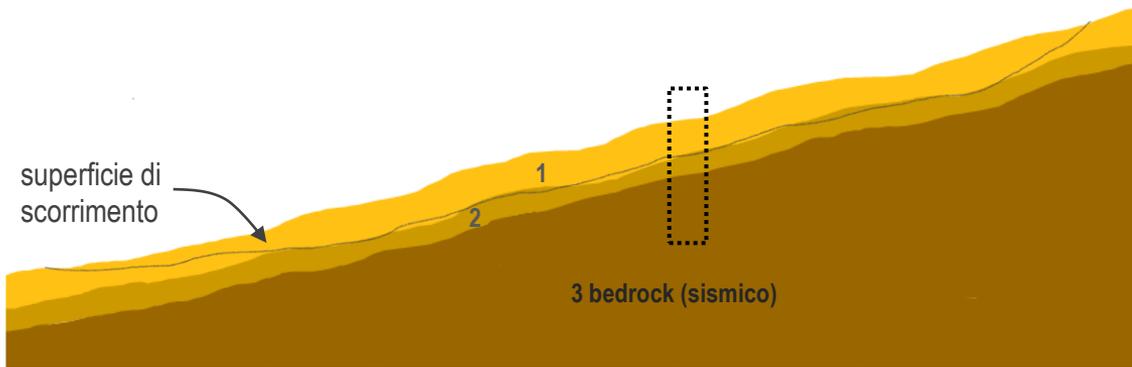
EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE ALL'INTERNO DI UN PENDIO



ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ALL'INTERNO DEL PENDIO

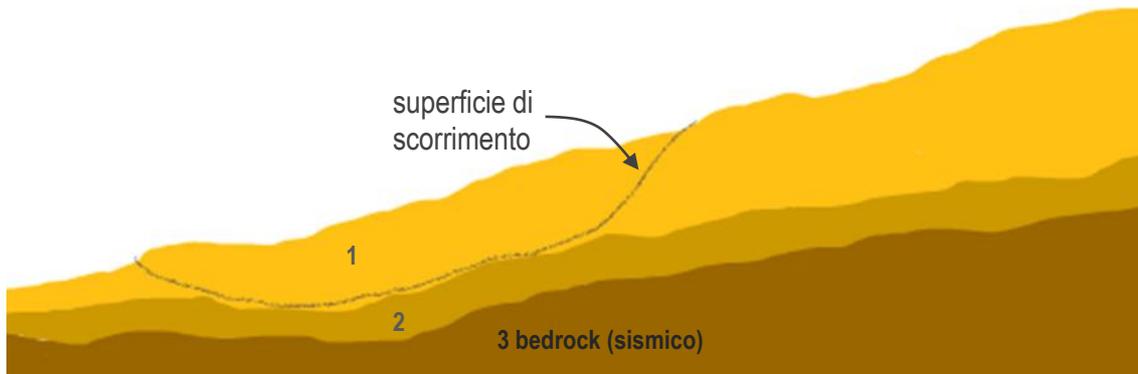


SCHEMI SEMPLIFICATI PER PENDII NATURALI



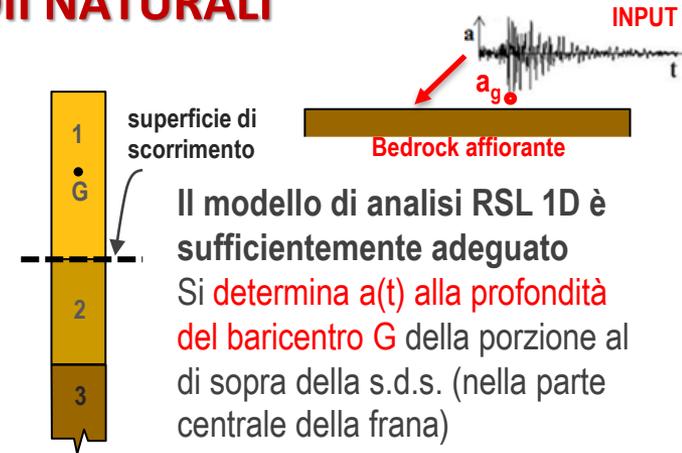
1. deposito/coltre; 2. 'bedrock alterato' $V_{S1} < V_{S2} \leq V_{Sbed} (> 800\text{m/s})$
Cinematismo traslazionale con spessore \ll lunghezza

➡ PENDIO INDEFINITO ➡ andamento delle accelerazioni indipendente dalla verticale scelta

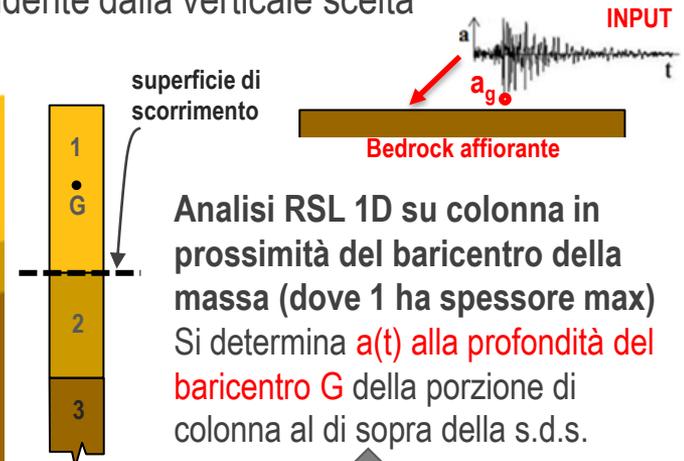


1. deposito; 2. 'bedrock alterato' $V_{S1} < V_{S2} \leq V_{Sbed} (> 800\text{m/s})$

Cinematismo roto-traslazionale. Geometria non assimilabile al pendio indefinito: andamento delle accelerazioni dipendente dalla verticale



Il modello di analisi RSL 1D è sufficientemente adeguato
Si determina $a(t)$ alla profondità del baricentro G della porzione al di sopra della s.d.s. (nella parte centrale della frana)



Analisi RSL 1D su colonna in prossimità del baricentro della massa (dove 1 ha spessore max)
Si determina $a(t)$ alla profondità del baricentro G della porzione di colonna al di sopra della s.d.s.

B. INPUT SISMICO DI RIFERIMENTO PER ANALISI DI RSL

CRITERI GENERALI PER LA DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO:

- Per le analisi di RSL finalizzate alla MS, deve essere definito un set di **N accelerogrammi*** rappresentativi della pericolosità di base del sito con **periodo di ritorno TR=475 anni**
- Il set di accelerogrammi può essere estratto da **banche dati on-line** (nazionali, europee, mondiali) in modo che lo spettro medio sia compatibile** con lo spettro di sito su sottosuolo di classe A. La selezione può essere effettuata utilizzando appositi software (**REXEL v 3.5; REXELweb; WebGIS di EUCENTRE**)
- E' opportuno che i segnali selezionati siano relativi ad eventi compatibili con il contesto sismotettonico e caratterizzati da una coppia Magnitudo-Distanza prossima a quella ottenuta da un'analisi di disaggregazione al sito ($M \pm 0.3$; $R \pm 20$ km). L'eventuale fattore di scala non dovrebbe essere esterno all'intervallo 0.5-2

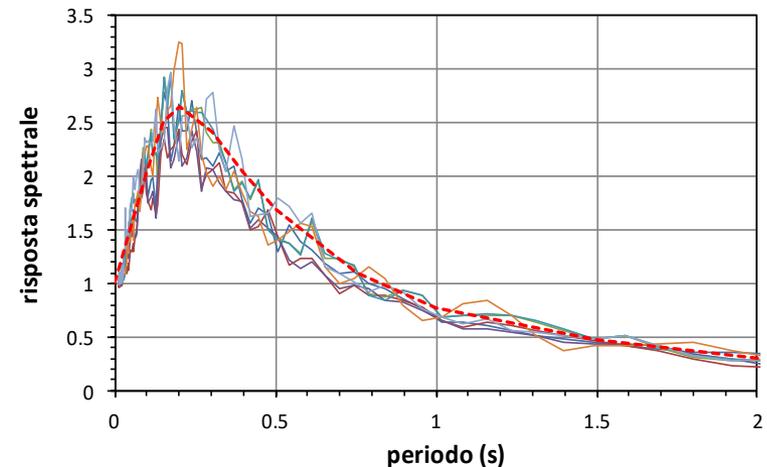
* in base agli ICMS: $N \geq 4$; in base alle NTC18: $N \geq 7$

**negli ICMS non ci sono indicazioni sulla spettrocompatibilità; nelle NTC18 è indicato 10% in difetto e 30% in eccesso

B. INPUT SISMICO DI RIFERIMENTO PER ANALISI DI RSL

IN PARTICOLARE:

- Alcune Regioni italiane, all'interno dei Comuni di pertinenza territoriale, forniscono direttamente il set di accelerogrammi da utilizzare nella modellazione
- **NEL CASO SPECIFICO DOVRANNO ESSERE IMPIEGATI I 2 SET DI ACCELEROGRAMMI DEFINITI SPECIFICAMENTE PER IL TERRITORIO REGIONALE E UTILIZZATI PER LA REDAZIONE DEGLI ABACHI PER LA MS DI LIVELLO 2:**
 - il primo set costituito da 8 accelerogrammi naturali, selezionati in base al criterio di similitudine sismotettonica;
 - il secondo set costituito da 7 accelerogrammi artificiali compatibili con lo spettro involuppo degli spettri a pericolosità uniforme dei Comuni marchigiani con periodo di ritorno 475 anni



C. RISPOSTA SISMICA LOCALE

Modelli 1D

- Si basano sulle seguenti ipotesi:
 - successione di strati omogenei a comportamento visco-elastico
 - substrato orizzontale deformabile
 - strati e substrato infinitamente estesi in direzione orizzontale
 - direzione verticale di propagazione delle onde di taglio
- Si distinguono due tipi fondamentali di modelli:
 1. **Modelli a strati continui** (analisi nel dominio delle frequenze) (es. **SHAKE**, **EERA**, **STRATA***)
 2. **Modelli a elementi discreti** (analisi nel dominio del tempo)

* il codice **STRATA** è scaricabile gratuitamente all'indirizzo:
<https://github.com/arkottke/strata>

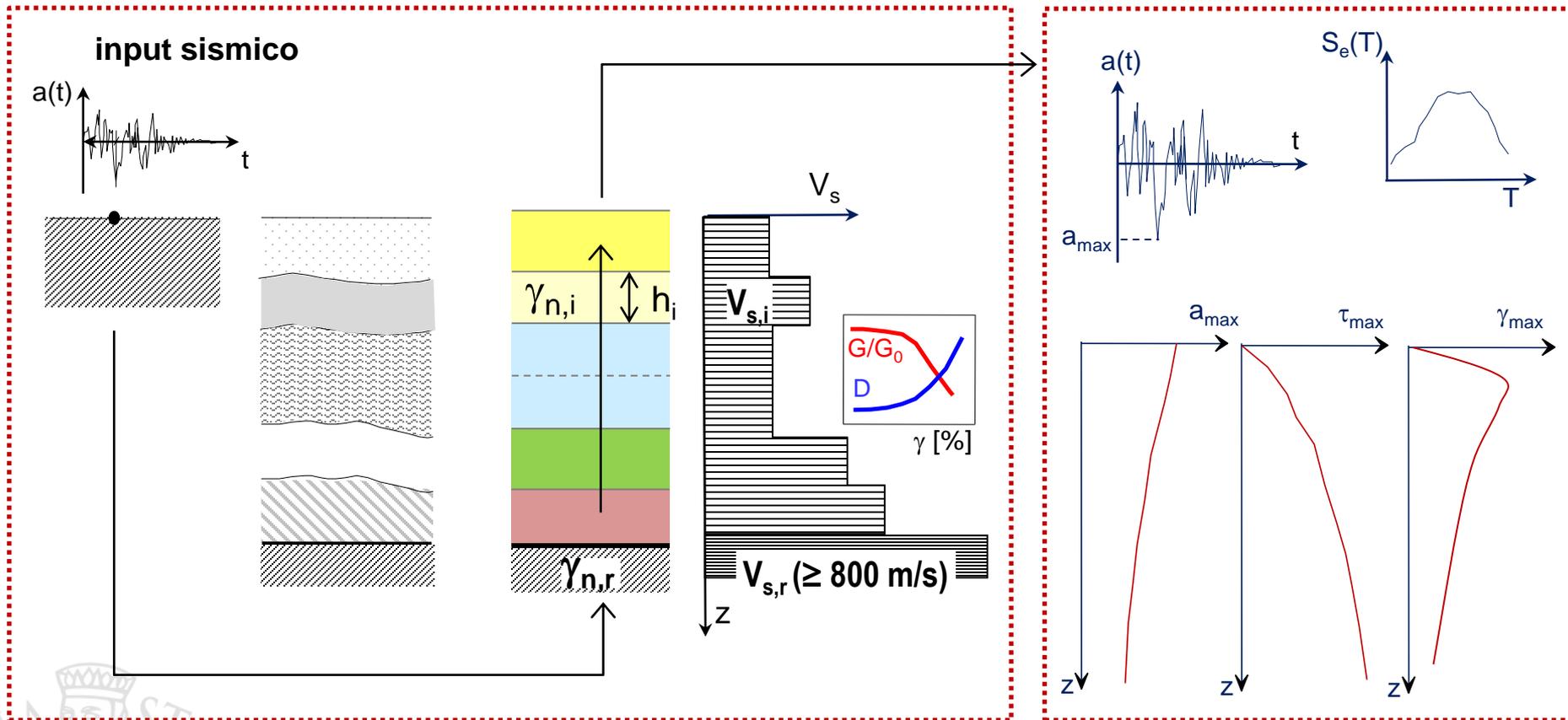


C. RISPOSTA SISMICA LOCALE

Modelli 1D a strati continui (dominio delle frequenze) (es. STRATA*)

DATI DI INPUT

OUTPUT



h_i , $\gamma_{n,i}$, $V_{s,i}$: altezza, peso di volume e velocità delle onde S dello strato i -esimo

$\gamma_{n,r}$, $V_{s,r}$: peso di volume e velocità delle onde S nel substrato

STRATA – Inserimento dati

INSERIMENTO DATI GENERALI:
 titolo del progetto, unità di misura,
 tolleranza, frequenza di cut-off, etc.

Tipo di analisi e di input sismico

criterio di ottimizzazione dello spessore degli strati in funzione della lunghezza d'onda

$$h_{max} = \frac{\lambda_{min}}{K} = \frac{V_s}{K \cdot f_{max}} = \frac{V_s}{(5 \div 8) \cdot f_{max}}$$

STRATA – Inserimento dati

Icona per l'inserimento delle *curve di decadimento e di smorzamento*

Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G max Model	Damping Model	Notes
1 Mat2	19.89	Mat2-MGO2a2	Mat2-MGO2a2	
2 Mat4	23.00	Mat4-AMS	Mat4-AMS	
3 Mat5	25.00	Mat5-VICalt	Mat5-VICalt	
4 Mat1	19.36	Mat1-SIV	Mat1-SIV	
5 Mat3	19.77	Mat3-MGO2s2	Mat3-MGO2s2	

INSERIMENTO DATI RELATIVI AL MODELLO GEOTECNICO:
tipi di terreno e proprietà

caratteristiche dei vari litotipi:
peso di volume e riferimenti alle curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$

dati relativi al *bedrock*: peso di volume γ e rapporto di smorzamento D_0 (il valore non viene utilizzato)

riepilogo dei valori delle curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$

informazioni sulla *profondità della falda* (STRATA opera in tensioni totali; questa informazione è utilizzata solo per ricavare il profilo della tensione efficace)

Strain (%)	G/Gmax
1 7.00e-05	1.000
2 1.84e-04	1.000
3 1.25e-03	0.999
4 2.10e-03	0.996
5 7.10e-03	0.960
6 1.40e-02	0.876
7 2.35e-02	0.764
8 5.02e-02	0.561
9 8.60e-02	0.426
10 1.80e-01	0.279
11 6.00e-01	0.132
12 1.00e+00	0.095
13 2.00e+00	0.060
14 5.00e+00	0.033

Bedrock Layer
Unit weight: 25.00 kN/m³ Damping: 1.00 %

Water Table Depth
Depth: 0.00 m

STRATA – Inserimento dati

Soil Types

Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model	Notes
1 Mat2	19.89	Mat2-MGO2a2	Mat2-MGO2a2	
2 Mat4	23.00	Mat4-AMS	Mat4-AMS	
3 Mat5	25.00	Mat5-VICalt	Mat5-VICalt	
4 Mat1	19.36	Mat1-SIV	Mat1-SIV	
5 Mat3	19.77	Mat3-MGO2s2	Mat3-MGO2s2	

Nonlinear Property Manager - Strata

Shear Modulus Reduction Models

- Mat3-MGO2s2 (Selected)
- Mat1-SIV
- S10C2-C3
- AMS
- Vucetic e Dobry utente
- VIC alt
- MGO1a1 (altri campioni)
- SIV (Rollins 2)
- FAL3 alterato
- Sun&al
- Custom

Damping Models

- EPRI (93), 250-500 ft
- EPRI (93), 120-250 ft
- EPRI (93), 50-120 ft
- EPRI (93), 20-50 ft
- EPRI (93), 0-20 ft
- EPRI (93), PI=70
- EPRI (93), PI=50
- EPRI (93), PI=30
- EPRI (93), PI=10
- Darendeli & Stokoe (2001)
- Custom

Nonlinear Curve Data

	Strain (%)	G/Gmax
1	7.00e-05	1.000
2	1.84e-04	0.999
3	1.25e-03	0.983
4	2.10e-03	0.964
5	7.10e-03	0.839
6	1.40e-02	0.708
7	2.35e-02	0.592
8	5.02e-02	0.428
9	8.60e-02	0.330
10	1.80e-01	0.224
11	6.00e-01	0.114
12	1.00e+00	0.085
13	2.00e+00	0.057
14	5.00e+00	0.033

Gray background indicates immutable model.

È possibile utilizzare delle curve di letteratura già presenti, oppure inserirne di proprie (importandole ad es. da Excel)

INSERIMENTO DATI RELATIVI AL MODELLO GEOTECNICO:
 curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$

STRATA – Inserimento dati

General Settings | Soil Types | **Soil Profile** | Motion(s) | Output Specification | Compute | Results

Site Profile

+ Add **Insert** **- Remove**

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	1.64	Mat1	194.00
2	1.64	1.64	Mat1	194.00
3	3.28	1.64	Mat1	194.00
4	4.91	1.75	Mat2	194.00
5	6.66	1.75	Mat2	194.00
6	8.41	1.75	Mat2	194.00
7	10.16	1.75	Mat2	194.00
8	11.91	2.04	Mat2	333.00
9	13.95	2.04	Mat2	333.00
10	15.99	2.04	Mat2	333.00
11	18.03	2.04	Mat2	333.00
12	20.07	2.04	Mat2	333.00
13	22.11	2.04	Mat2	333.00
14	24.15	2.04	Mat2	333.00
15	26.19	2.04	Mat2	333.00
16	28.23	2.04	Mat2	333.00
17	30.27	2.04	Mat2	333.00
18	32.30	2.04	Mat2	333.00
19	34.34	2.04	Mat2	333.00
20	36.38	2.04	Mat2	333.00
21	38.42	2.04	Mat2	333.00
22	40.46	2.04	Mat2	333.00

dati relativi allo spessore dello strato, al tipo di terreno e al valore V_s da utilizzare nella modellazione

INSERIMENTO DATI RELATIVI AL MODELLO GEOTECNICO:
informazioni relative ai litostrati

General Settings | Soil Types | **Soil Profile** | Motion(s) | Output Specification | Compute | Results

Site Profile

+ Add **Insert** **- Remove**

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	5.00	Mat1	194.00
2	5.00	7.00	Mat2	194.00
3	12.00	33.00	Mat2	333.00
4	45.00	25.00		
5	70.00	63.00	Mat4	600.00
6	133.00	10.00	Mat5	1105.00
7	143.00	Half-Space	Bedrock	1570.00

Se è abilitata l'opzione di discretizzazione automatica in sottostrati, si può indicare lo spessore totale dello strato (la suddivisione è fatta in automatico)

STRATA – Inserimento dati

Motion Input Location
Specify the location to input the motion(s): Bedrock

Input Motions

	Name	Description	Type	PGA (g)	PGV (cm/s)	Scale Factor
1	Accelerogrammi Vicchio\I1-vicchio.acc	I1-vicchio	Outcrop	0.20	10.06	1.00
2	Accelerogrammi Vicchio\I2-vicchio.acc	I2-vicchio	Outcrop	0.20	9.52	1.00
3	Accelerogrammi Vicchio\I3-vicchio.acc	I3-vicchio	Outcrop	0.20	14.20	1.00
4	Accelerogrammi Vicchio\I4-vicchio.acc	I4-vicchio	Outcrop	0.20	24.18	1.00
5	Accelerogrammi Vicchio\I5-vicchio.acc	I5-vicchio	Outcrop	0.20	16.37	1.00
6	Accelerogrammi Vicchio\I6-vicchio.acc	I6-vicchio	Outcrop	0.20	16.20	1.00
7	Accelerogrammi Vicchio\I7-vicchio.acc	I7-vicchio	Outcrop	0.20	11.66	1.00

INSERIMENTO DATI RELATIVI ALL'INPUT SISMICO:

l'accelerogramma deve essere inserito come file di testo contenente solo i valori di $a(t)$ disposti per colonna
(att.ne all'unità di misura!)

Il file di testo può contenere delle righe iniziali di commento



Input Plots

File... C:/Users/Proprietario/Desktop/Accelerogrammi Vicchio/I1-vicchio.acc

Description: I1-vicchio

Point count: 3997 Time step: 0.0100 s Scale factor: 1.00

Format: Rows Data column: 2 Units: Gravity PGA: 0.198 g

Start line: 2 Stop line: 0 Current Line: 1

```

Delta t 0.01 ndpt 3997
-0.00143792
-0.003923955
-0.005574618
-0.005287666
-0.005198471
-0.006159939
-0.006144546
-0.003497961
-0.001432416
-0.003684913
-0.007198369
-0.006059021
-0.000435474
0.004327625
0.005446585
0.004511111
    
```

OK Cancel Apply Help

STRATA – Inserimento dati

INSERIMENTO DATI RELATIVI ALL'INPUT SISMICO

The screenshot shows the STRATA software interface. The 'Motion Input Location' is set to 'Bedrock'. The 'Input Motions' table lists seven accelerograms from Vicchio. The 'Plots' window is open, showing the 'Accel. Time Series' plot of acceleration (g) versus time (s).

	Name	Description	Type	PGA (g)	PGV (cm/s)	Scale Factor
1	Accelerogrammi Vicchio\I1-vicchio.acc	I1-vicchio	Outcrop	0.20	10.06	1.00
2	Accelerogrammi Vicchio\I2-vicchio.acc	I2-vicchio	Outcrop	0.20	9.52	1.00
3	Accelerogrammi Vicchio\I3-vicchio.acc	I3-vicchio	Outcrop	0.20	14.20	1.00
4	Accelerogrammi Vicchio\I4-vicchio.acc	I4-vicchio	Outcrop	0.20	24.18	1.00
5	Accelerogrammi Vicchio\I5-vicchio.acc	I5-vicchio	Outcrop	0.20	16.37	1.00
6	Accelerogrammi Vicchio\I6-vicchio.acc	I6-vicchio	Outcrop	0.20	16.20	1.00
7	Accelerogrammi Vicchio\I7-vicchio.acc	I7-vicchio	Outcrop	0.20	11.66	1.00

The 'Plots' window shows a graph of Acceleration (g) on the y-axis (ranging from -0.2 to 0.2) versus Time (s) on the x-axis (ranging from 0 to 40). The plot displays a blue time series of acceleration data. The 'Plots' tab is highlighted with a green circle in the original image.

Cliccando su “Plots” è possibile ottenere la rappresentazione dell’accelerogramma, controllando così la correttezza di ciò che si è caricato. Dallo stesso menù è possibile visualizzare anche spettro di Fourier e spettro di risposta (in pseudo-accelerazione)



STRATA – Inserimento dati

RICHIESTA DATI DI OUTPUT:

- **Profiles:** andamento con la profondità di alcuni parametri
- **Time Series:** storie temporali di alcuni parametri
- **Response and Fourier Spectra:** spettro di Fourier e spettri di risposta in pseudo-accelerazione
- **Ratios:** funzione di trasferimento

A

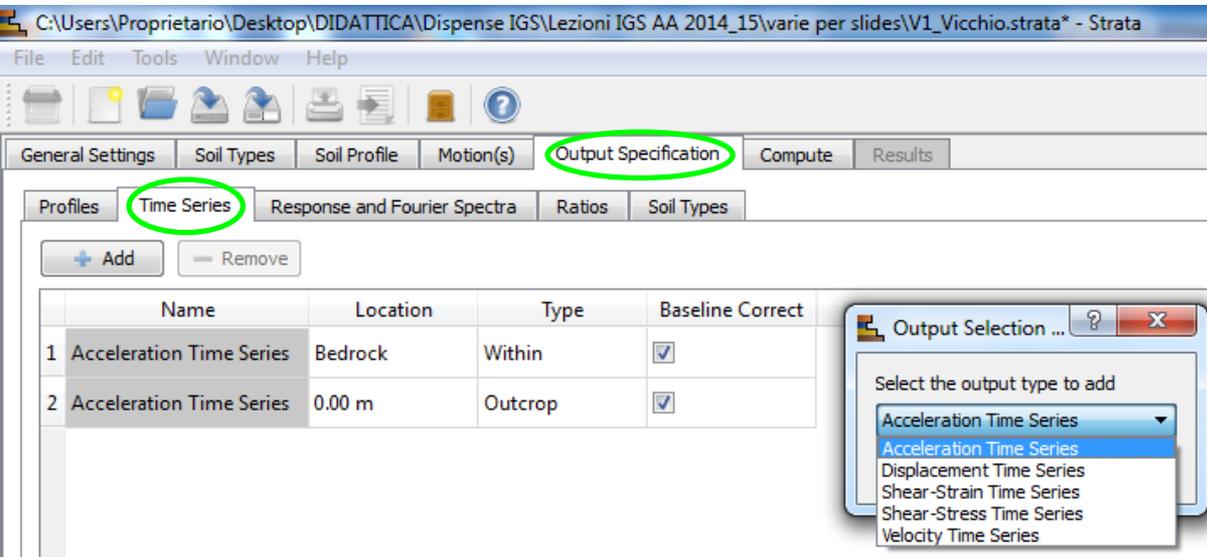
Specifiche relative alla rappresentazione dello spettro di risposta

B

Specifiche relative alla rappresentazione dello spettro di Fourier



STRATA – Inserimento dati



File Edit Tools Window Help

General Settings Soil Types Soil Profile Motion(s) **Output Specification** Compute Results

Profiles **Time Series** Response and Fourier Spectra Ratios Soil Types

+ Add - Remove

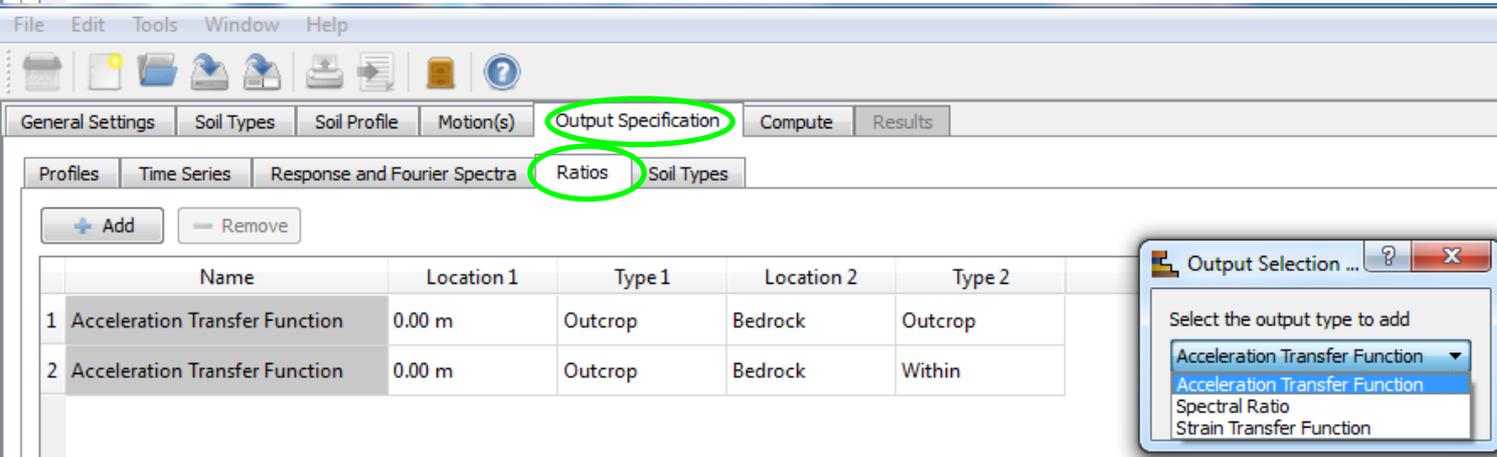
	Name	Location	Type	Baseline Correct
1	Acceleration Time Series	Bedrock	Within	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Acceleration Time Series	0.00 m	Outcrop	<input checked="" type="checkbox"/>

Output Selection ...

Select the output type to add

- Acceleration Time Series
- Acceleration Time Series
- Displacement Time Series
- Shear-Strain Time Series
- Shear-Stress Time Series
- Velocity Time Series

RICHIESTA DATI
DI OUTPUT



File Edit Tools Window Help

General Settings Soil Types Soil Profile Motion(s) **Output Specification** Compute Results

Profiles Time Series Response and Fourier Spectra **Ratios** Soil Types

+ Add - Remove

	Name	Location 1	Type 1	Location 2	Type 2
1	Acceleration Transfer Function	0.00 m	Outcrop	Bedrock	Outcrop
2	Acceleration Transfer Function	0.00 m	Outcrop	Bedrock	Within

Output Selection ...

Select the output type to add

- Acceleration Transfer Function
- Acceleration Transfer Function
- Spectral Ratio
- Strain Transfer Function

Dopo aver selezionato tutti gli output di interesse, si seleziona la finestra **“Compute”** e si clicca sull’omonimo tasto per avviare la modellazione

STRATA - Analisi dei risultati

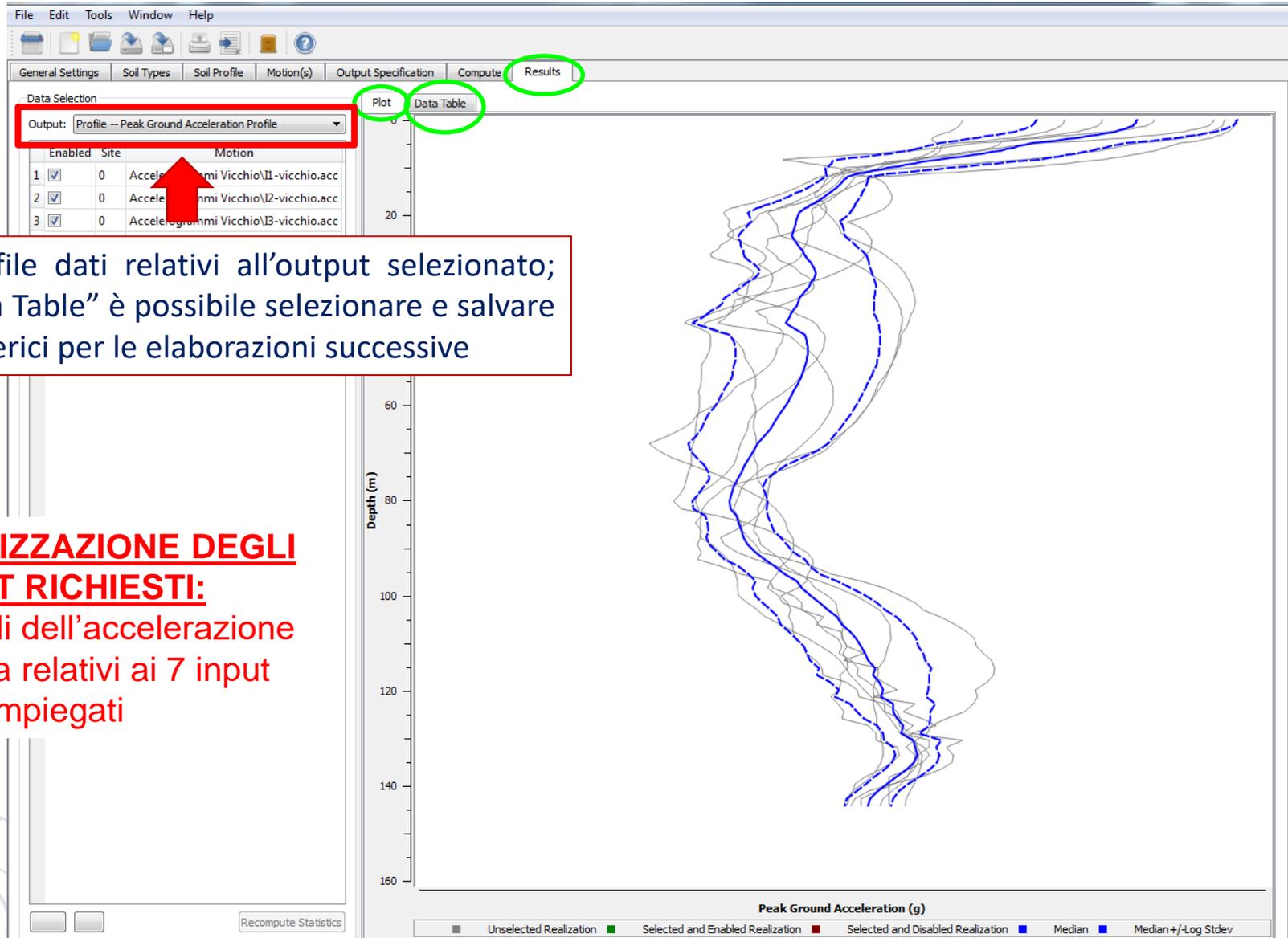


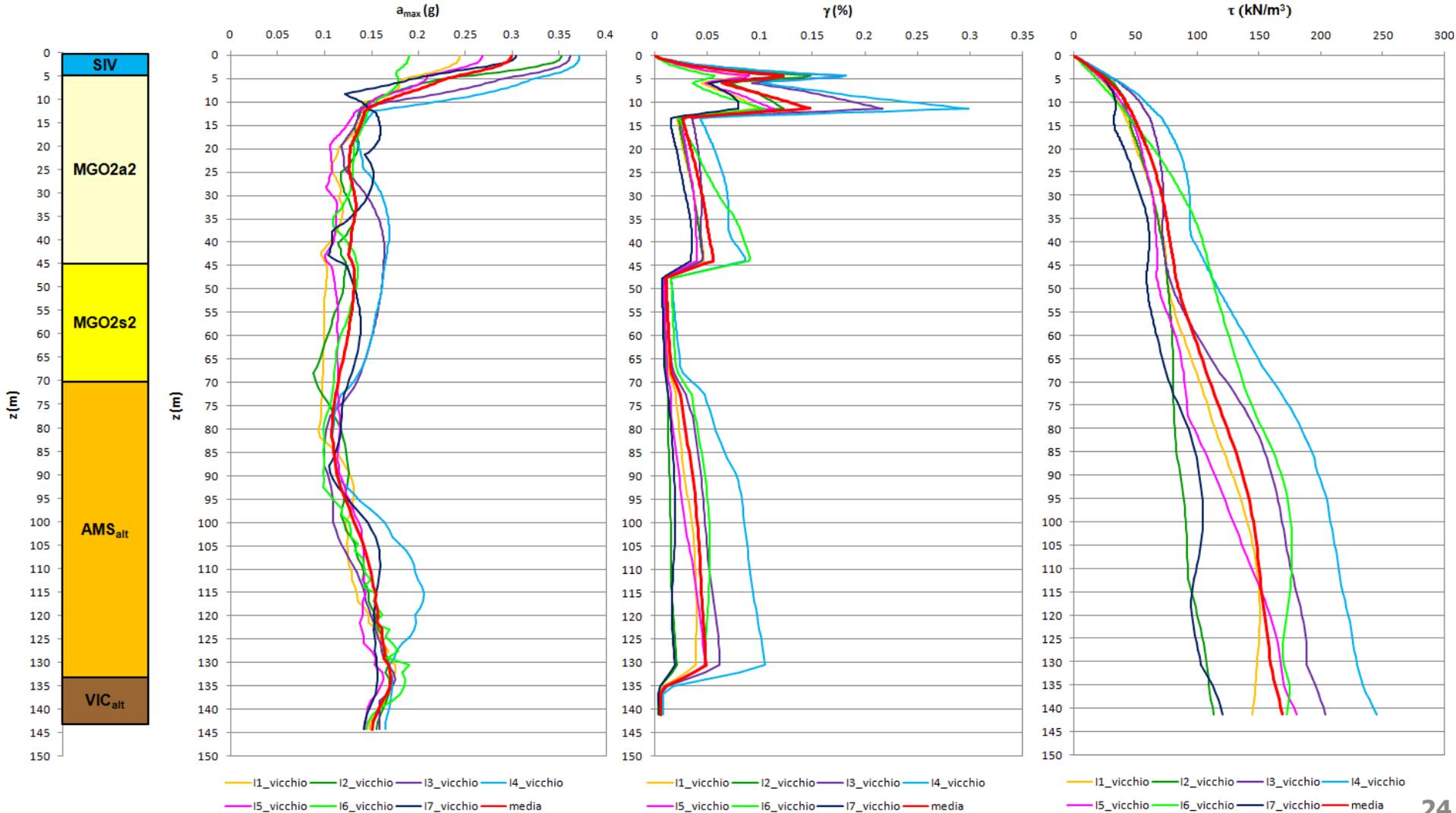
grafico e file dati relativi all'output selezionato; dalla "Data Table" è possibile selezionare e salvare i dati numerici per le elaborazioni successive

VISUALIZZAZIONE DEGLI OUTPUT RICHIESTI:

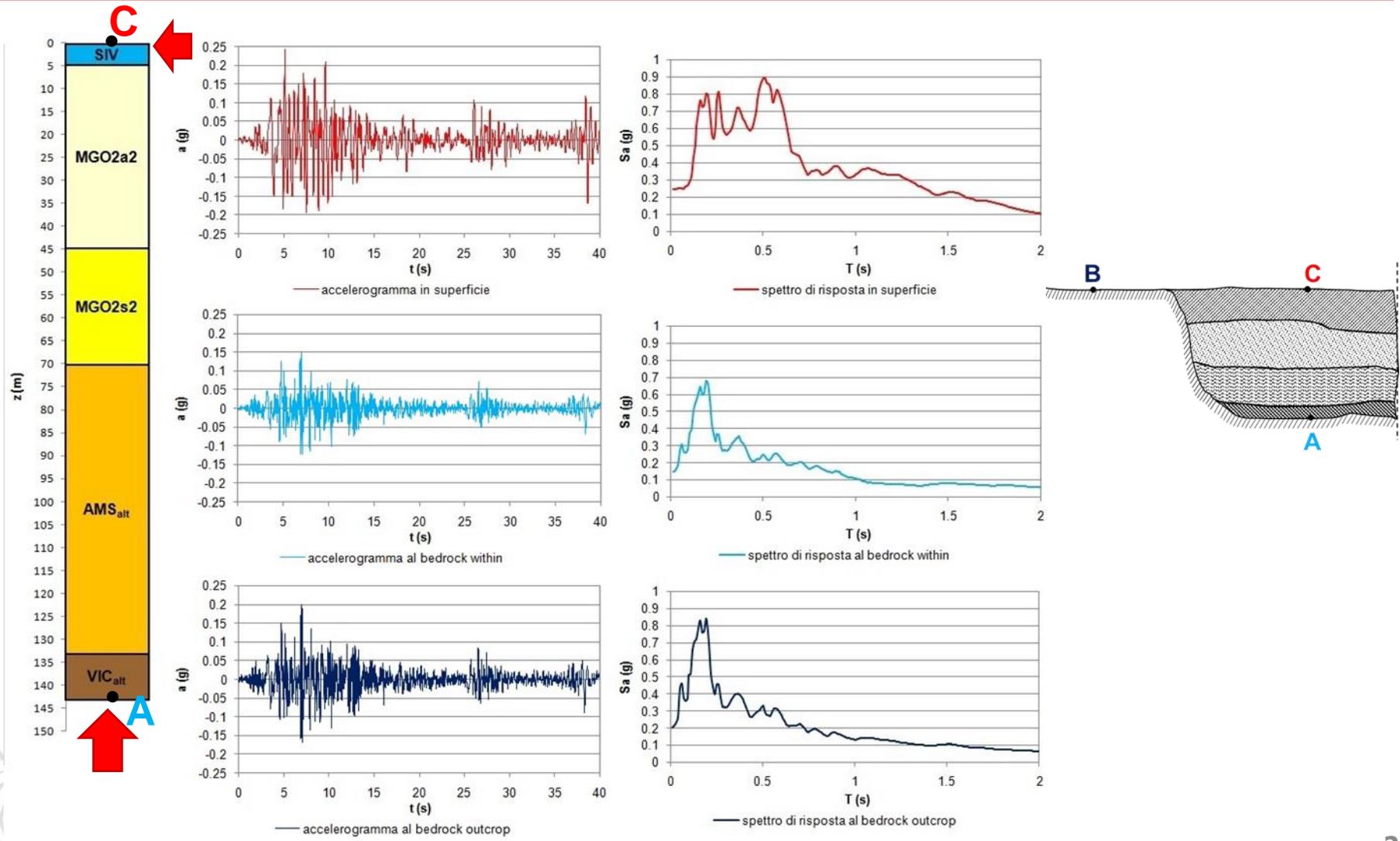
es. profili dell'accelerazione massima relativi ai 7 input sismici impiegati



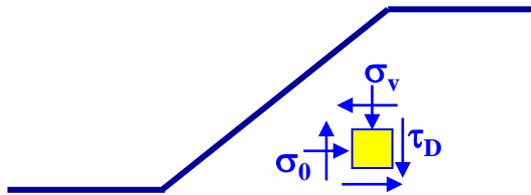
Esempio di profili di a_{max} , γ e τ con la profondità z per la colonna rappresentata



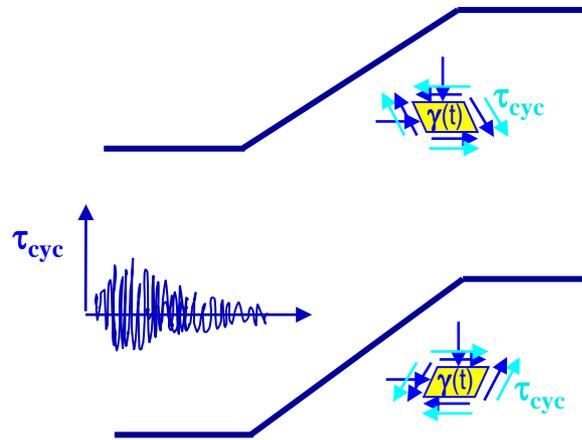
Confronto tra accelerogrammi, spettri di risposta e spettri di Fourier in superficie, su bedrock affiorante (outcrop) e sepolto (within), ottenuti per uno dei segnali



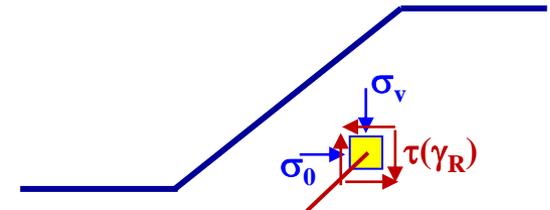
C. ANALISI DI STABILITÀ



a) prima del terremoto:
condizioni statiche



b) durante il terremoto:
calcolo degli spostamenti accumulati



c) dopo il terremoto:
condizioni statiche con
eventuali incrementi di u
e riduzioni di c' e φ'

In base alle NTC18 le analisi devono essere eseguite tenendo conto di:

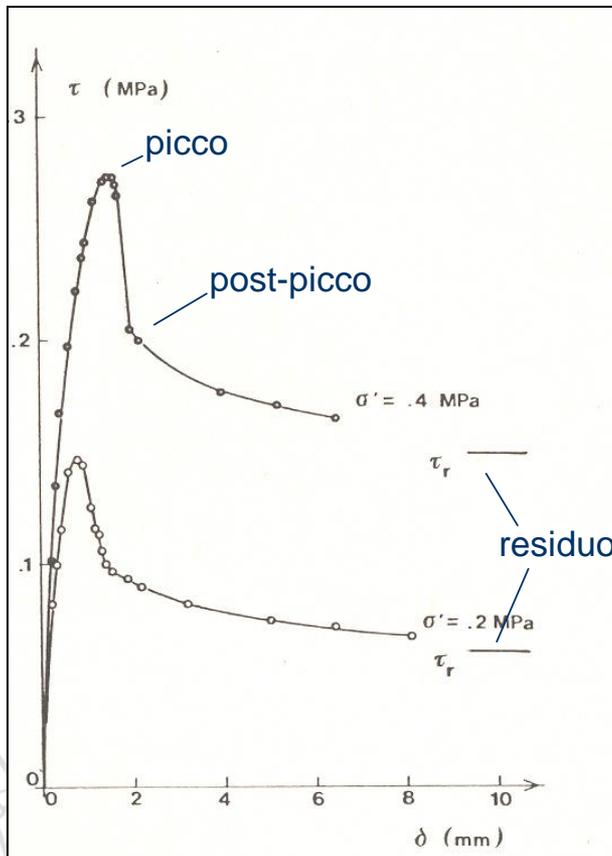
- comportamenti di tipo fragile con riduzione della resistenza al taglio al crescere della deformazione (argille OC e terreni granulari addensati)
- possibili incrementi di pressione interstiziale e degradazione ciclica della resistenza al taglio (nei terreni saturi e per $a_{max} > 0.15g$)



C. ANALISI DI STABILITÀ

Scelta dei parametri di resistenza

Per terreni a **comportamento fragile** occorre distinguere tra condizioni di:



- **picco** ($c' \geq 0, \varphi' = \varphi'_p$)
- **post-picco** ($c' \approx 0, \varphi' = \varphi'_{pp}$)
- **residue** ($c' \approx 0, \varphi' = \varphi'_r$)

In genere si assume:

- **frane di primo distacco** → rottura progressiva → **Resistenza post-picco + Δu**
- **frane attive o quiescenti** → superficie pre-esistente → **Resistenza residua e $\Delta u=0$**

C. ANALISI DI STABILITÀ

APPROCCIO	AZIONE SISMICA
METODI PSEUDOSTATICI	COSTANTE (a_{max} da analisi di RSL 1D o metodo NTC18)
METODI DEGLI SPOSTAMENTI*	FUNZIONE DEL TEMPO (accelerogramma)
METODI DI ANALISI DINAMICA	

*per la stima mediante correlazioni si utilizzano parametri 'sintetici' del moto, ad es:

- accelerazione massima, a_{max}
- velocità massima, v_{max}
- intensità di Arias, $I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a^2(t) dt$
- durata, T_D
- potenziale sismico distruttivo, $P_D = \frac{I_A}{v_0^2}$ (v_0 = intensità degli incroci con l'asse dei tempi)

C. ANALISI DI STABILITÀ

La natura dinamica e ciclica della sollecitazione sismica produce, rispetto al caso statico i seguenti effetti:

1. Incremento delle azioni destabilizzanti (durante lo scuotimento)

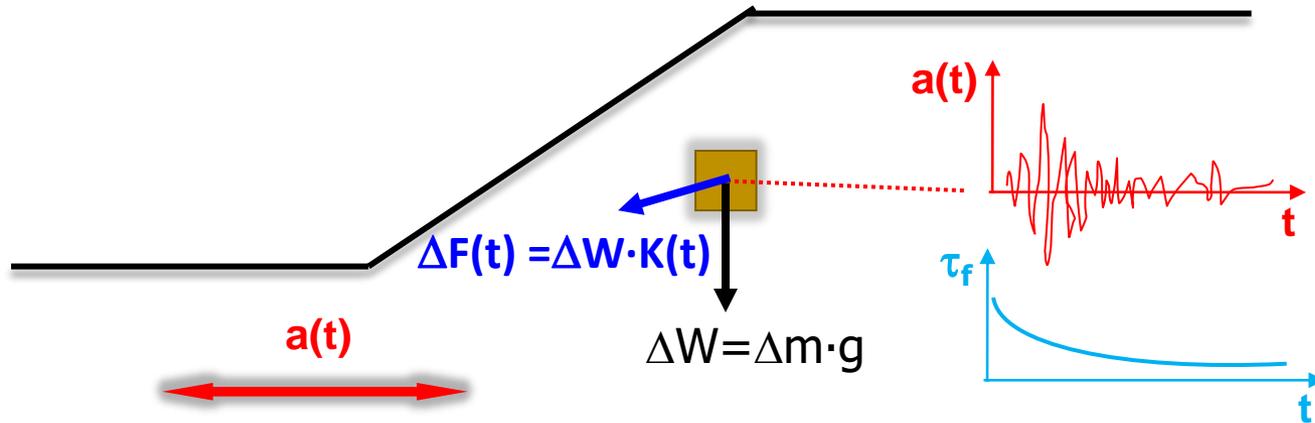
La natura **dinamica** dell'azione sismica induce all'interno del pendio forze inerziali variabili sia nel tempo sia nello spazio a causa di:

- eterogeneità e anisotropia dei terreni
- effetti di amplificazione litostratigrafica
- effetti di amplificazione topografica

2. Riduzione delle azioni resistenti (che permangono al termine dello scuotimento)

Per deformazioni elevate ($\gamma > \gamma_v$), la natura **ciclica** dell'azione sismica induce nel terreno una riduzione della resistenza a causa di:

- fenomeni di fatica con degradazione dei legami di natura coesiva
- accumulo delle pressioni interstiziali



Incremento azioni destabilizzanti

$$\Delta F(t) = \Delta m \cdot a(t) = \Delta W \cdot a(t)/g = \Delta W \cdot K(t)$$

K(t) = coefficiente sismico

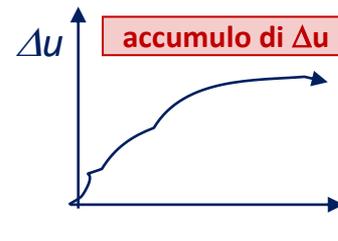
$$\Delta F_h(t) = \Delta W \cdot K_h(t) \quad \Delta F_v(t) = \Delta W \cdot K_v(t)$$

K_h(t) = coefficiente sismico orizzontale

K_v(t) = coefficiente sismico verticale

g = accelerazione di gravità

Riduzione azioni resistenti



$$\tau_{f,dyn} = c' + [\sigma_n - (u + \Delta u)] \cdot \tan \varphi' < \tau_{f,st}$$

$$\tau_{f,dyn} = c_{u,dyn}$$

complessivamente si avrà un peggioramento delle condizioni di stabilità:

momentaneo ⇒ deformazioni e spostamenti durante il sisma

permanente ⇒ accumulo di deformazioni e spostamenti, movimento franosi

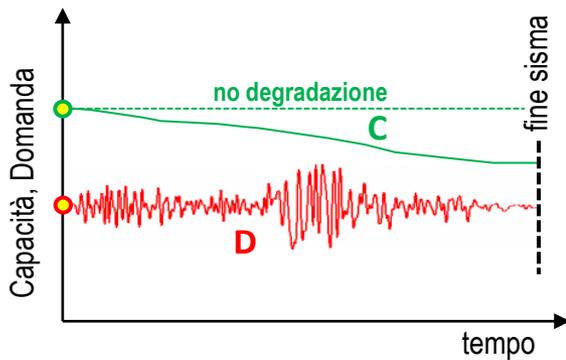
COMPORAMENTO DEI PENDII IN CONDIZIONI SISMICHE

In relazione a:

- 'margine di sicurezza' (es. $FS = \text{capacità} / \text{domanda}$) in condizioni statiche
- comportamento dei terreni
- caratteristiche dell'azione sismica

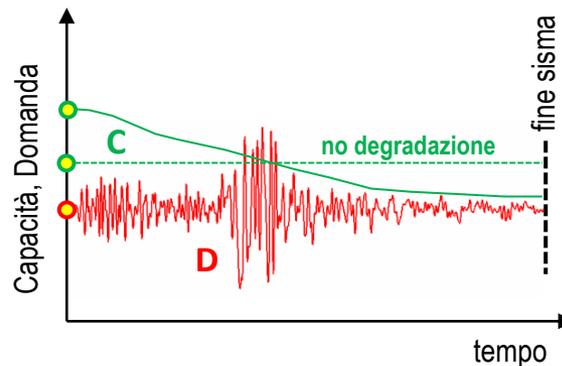
durante e dopo l'evento sismico, si possono verificare differenti situazioni:

- capacità iniziale (condizioni statiche)
- domanda iniziale (condizioni statiche)



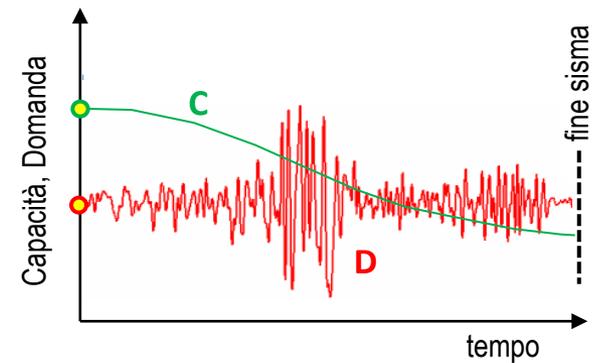
pendio stabile

($C > D$ per tutta la durata dell'evento sismico)



accumulo di deformazioni

($C < D$ in alcuni intervalli di tempo; $C > D$ al termine dell'evento sismico)



movimento franoso

($C < D$ in alcuni intervalli di tempo e al termine dell'evento sismico)



RIDUZIONE DELLA CAPACITÀ - STIMA ΔU IN TERRENI GRANULARI

Seed e Booker (1977)

$$\Delta u_N^* = \frac{\Delta u_N}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \text{sen}^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/2a} \right]$$

σ'_0 = pressione efficace media iniziale

$a = 0.96 \cdot D_r^{0.83}$ (D_r = densità relativa)

N_L = n. di cicli che portano il terreno a liquefazione
(da **letteratura** o da **prove di laboratorio**)

τ_{hv} \cong $\tau_{eq} = 0.65 \tau_{max}$ con τ_{max} ricavabile da:

1) analisi di risposta sismica locale

2) formule approssimate, ad es:

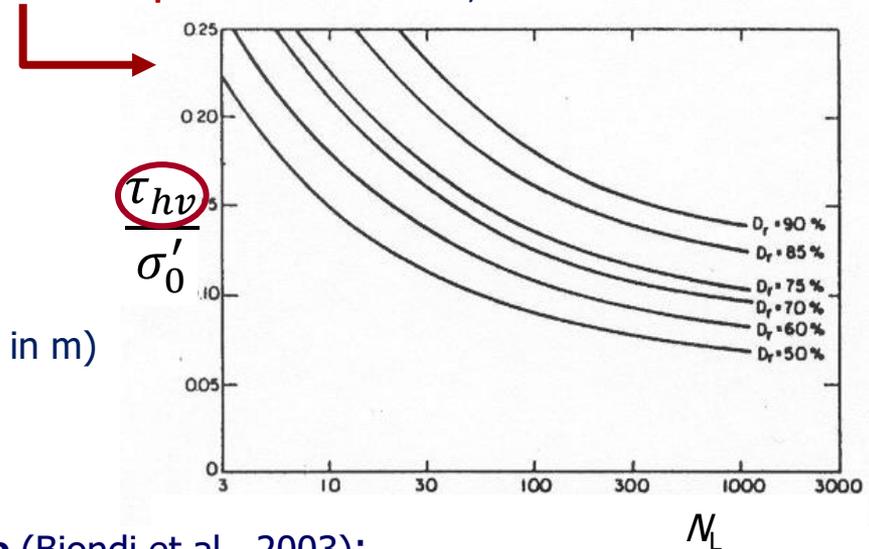
$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d \quad \text{con } r_d = 1 - 0.015 z \quad (z \text{ in m})$$

N = numero di cicli **equivalente** al sisma

da letteratura: es. $N=f(M)$ (Seed e Idriss, 1982) **oppure** (Biondi et al., 2003):

$$\log N = -2.3679 - 2.3460 \cdot \log a_{max} + 0.9194 \cdot \log v_0 + 1.1911 \cdot \log I_a$$

$$\log N = -1.9231 - 2.5467 \cdot \log a_{max} + 0.8657 \cdot \log v_0 - 0.2278 \cdot \log T_D + 1.2613 \cdot \log I_a$$



RIDUZIONE DELLA CAPACITÀ - STIMA Δu IN TERRENI COESIVI

Matsui et al. (1980)

$$\frac{\Delta u}{p'_0} = \beta \cdot \left[\log \frac{\gamma_{c,max}}{\gamma_v} \right]$$

p'_0 = pressione efficace media iniziale

$\beta \cong 0.45$ (coefficiente sperimentale)

γ_v = deformazione di **soglia volumetrica** (da prove di laboratorio cicliche o correlazioni di letteratura, ad es. in funzione di I_p)

$\gamma_{c,max}$ = deformazione di taglio max indotta dal sisma

con $\gamma_{c,max}$ ricavabile da:

- 1) analisi di risposta sismica locale
- 2) formule approssimate, ad es:

$$\gamma_{c,max} = \frac{\tau_{max}}{G}$$

dove $\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d$ con $r_d = 1 - 0.015 z$ (z in m)

NB: valore corrispondente al livello deformativo $\gamma_{c,max}$ raggiunto
(si possono utilizzare curve $G(\gamma)/G_0$ sperimentali o di letteratura noto G_0 in sito)

RIDUZIONE DELLA CAPACITÀ – DEGRADAZIONE DI c_u IN TERRENI COESIVI

Nei terreni coesivi la resistenza non drenata (analisi in t.t.) in condizioni cicliche è esprimibile mediante la relazione:

$$\tau_f = c_{u,c} = c_{u,st} \cdot \delta$$

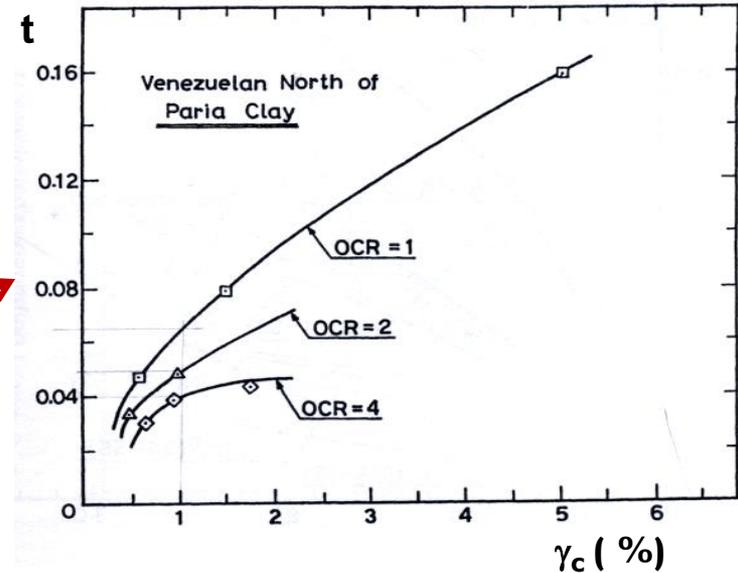
dove:

- $c_{u,st}$ = coesione non drenata in condizioni statiche
- $\delta = N^{-t}$
- N = numero di cicli equivalente al sisma
- t = parametro di degradazione (funzione di I_p e OCR) che può essere stimato da grafici o correlazioni, ad es:

oppure $t = s \cdot (\gamma_c - \gamma_v)^r$ dove v. slide prec.

$$\gamma_c = 0.65 \gamma_{c,max} = 0.65 \tau_{max}/G$$

γ_v può essere ricavato da prove di laboratorio o da correlazioni in funzione di I_p ; s ed r possono essere ricavati da da tabelle, p. es.



	OCR = 1		OCR = 2		OCR = 4
	$I_p = 15$	$I_p = 30$	$I_p = 50$	$I_p = 50$	$I_p = 50$
s	0.195	0.095	0.075	0.054	0.042
r	0.600	0.600	0.495	0.480	0.423

RIDUZIONE DELLA CAPACITÀ – ESEMPIO

DATI GEOMETRICI E GEOTECNICI:

- Terreno omogeneo **NC**
- Profondità media della superficie di scorrimento **z=6m**
- Peso di volume $\gamma=19\text{kN/m}^3$
- Indice di plasticità **Ip=15%**
- Def. soglia volumetrica $\gamma_v=0.04\%$
- V_s (da DH)=**210 m/s**

$\rightarrow G_0 = \gamma/g \cdot V_s^2 = 85439 \text{ kPa}$

Dalla tab. DIA precedente:

$s = 0.195; r=0.6$

DEFORMAZIONE DI TAGLIO INDOTTA:

$\gamma_{max} = \tau_{max}/G \cong 0.2\% \rightarrow \gamma_c (=0.65\gamma_{max}) \cong 0.13\%$

$t = s \cdot (\gamma_c - \gamma_v)^r =$

$0.195 \cdot (0.13 - 0.04)^{0.6} = 0.046$

Indice di degradazione da applicare alla cu statica:

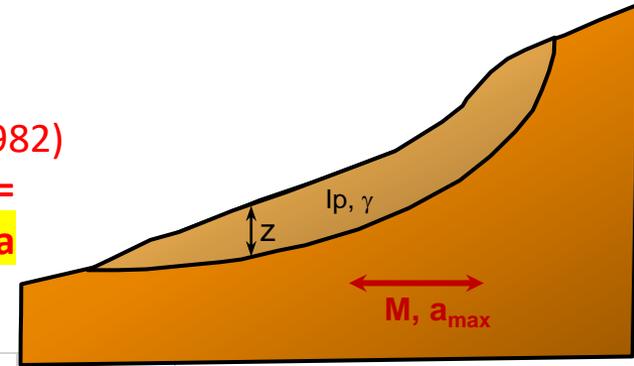
$\delta = N^{-t} = 8^{-0.046} = 0.91$

DATI SISMICI :

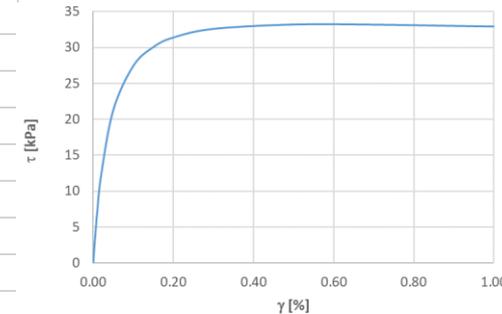
- Magnitudo **M=6.5**
- $a_{max} = 0.3g$

$N_{eq} \cong 8$ cicli (Seed e Idriss, 1982)

$\tau_{max} \cong (a_{max}/g) \cdot \sigma_v \cdot r_d =$
 $0.3 \cdot (19 \cdot 6) \cdot (1 - 0.015 \cdot 6) = 31 \text{ kPa}$



dati sperimentali			
G/G ₀	G [kPa]	γ [%]	τ = G·γ [kPa]
0.998717	85329.32	0.00010	0.08533
0.997305	85208.75	0.00020	0.17042
0.992835	84826.81	0.00050	0.42413
0.985053	84161.90	0.00100	0.84162
0.969081	82797.29	0.00200	1.65595
0.921473	78729.72	0.00500	3.93649
0.848044	72455.99	0.01000	7.24560
0.726343	62058.02	0.02000	12.41160
0.498425	42584.94	0.05000	21.29247
0.320932	27420.11	0.10000	27.42011
0.234292	20017.69	0.15000	30.02654
0.183519	15679.69	0.20000	31.35939
0.127036	10853.83	0.30000	32.56148
0.077620	6631.78	0.50000	33.15891
0.055415	4734.60	0.70000	33.14217
0.038482	3287.86	1.00000	32.87861

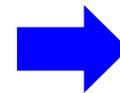
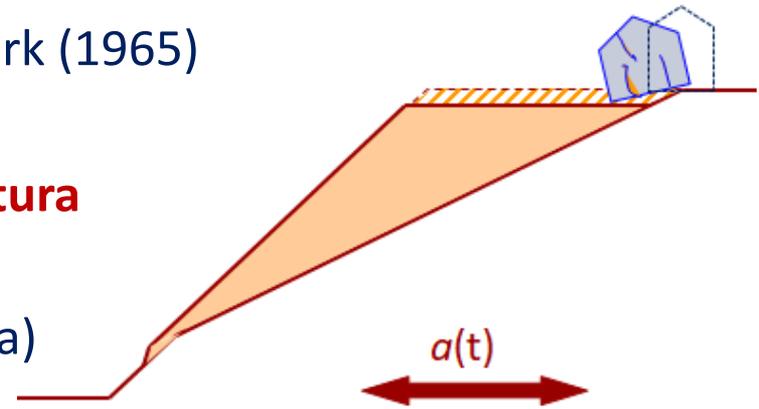


per $\tau = 31 \text{ kPa}$
 $\gamma \cong 0.2\%$

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

Derivano dal modello di blocco rigido di Newmark (1965)

- si basano sul **principio** che una condizione istantanea **$FS < 1$** può non determinare la rottura
- l'azione sismica è definita da una funzione temporale (generalmente un accelerogramma)
- gli **effetti** dell'azione sismica sono valutati in termini di **spostamenti accumulati**
- la **sicurezza** è stimata confrontando lo **spostamento** cumulato con una soglia critica

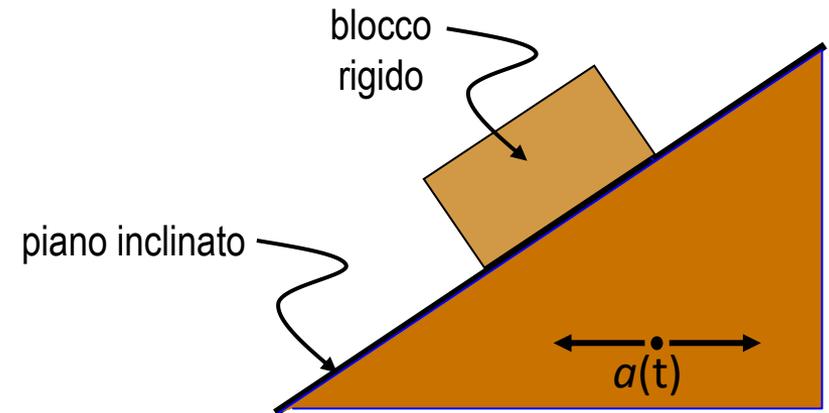
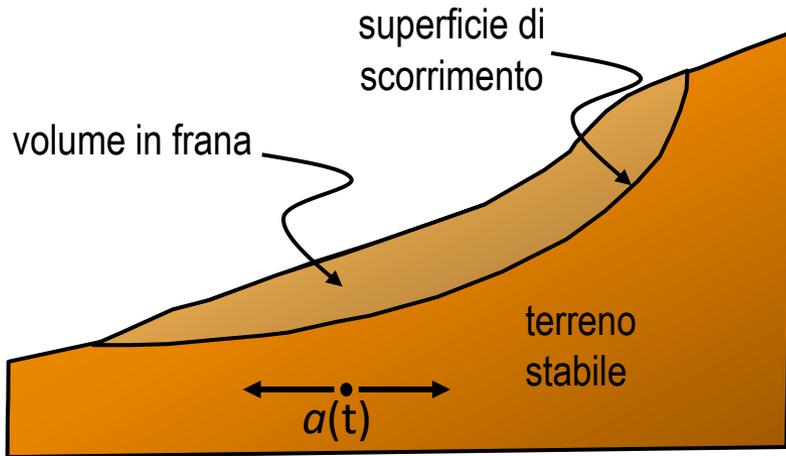


collasso generalizzato
(stato limite ultimo)
perdita di funzionalità
(stato limite di servizio)

Tali metodi consentono di:

- superare il limite intrinseco dell'approccio pseudostatico che utilizza sollecitazioni statiche e costanti nel tempo
- tener conto del fatto che la risposta del pendio dipende da diverse caratteristiche dell'accelerogramma

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI



- la massa di terreno potenzialmente in frana (con cinematismo traslativo o rotazionale) è assimilata ad un blocco rigido che scorre sul terreno stabile
- il blocco potenzialmente in frana si sposta lungo la superficie di scorrimento ogni qual volta l'accelerazione $a(t)$ supera un valore **di accelerazione critica**, $a_c = k_c g$, **caratteristico delle condizioni di equilibrio limite** ($F_s = 1$ ovvero **domanda = capacità**)
- lo spostamento continua fino a quando l'accelerazione, cambiando di segno, è tale da annullare la velocità relativa tra la massa in frana e il terreno stabile

lo spostamento finale dipende da:

- durata, ampiezza e contenuto in frequenza del **sisma** [$a(t)$]
- caratteristiche geotecniche e geometriche del **pendio** [a_c]

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

Ipotesi del metodo originario (Newmark, 1965):

- ✓ schema bidimensionale
- ✓ non sono ammessi spostamenti della massa verso monte
- ✓ unico accelerogramma di progetto applicato a tutto il corpo di frana (accelerazione sismica **$a(t) = \text{costante nello spazio all'interno della massa in movimento}$**)*
- ✓ uguale resistenza al taglio del terreno in condizioni statiche e dinamiche (c_u oppure c' , φ' e u costanti \Rightarrow accelerazione critica **$a_c = K_c \cdot g$ costante nel tempo**)*

* le ultime 2 ipotesi possono essere rimosse

Fasi di analisi:

1. scelta dell'**accelerogramma/i di progetto**
2. ricerca della superficie di scorrimento alla quale corrispondono condizioni di equilibrio limite ($F_s=1$) e determinazione del relativo **coefficiente sismico critico K_c**
3. calcolo degli spostamenti mediante **doppia integrazione dell'equazione di moto** relativo nel dominio del tempo
4. giudizio sugli spostamenti calcolati

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

Coefficiente sismico critico: pendio indefinito

TENSIONI EFFICACI $c' \neq 0$; $\phi' \neq 0$; $u \neq 0$; $\gamma = \gamma_{sat}$

$$F_S = \frac{c'}{\gamma D \cos^2 \alpha [K_h + (1 \pm K_v) \tan \alpha]} + \frac{\left(1 - \frac{\gamma_w D_w}{\gamma D} - \frac{\Delta u}{\gamma D \cos^2 \alpha}\right) - K_h \tan \alpha \pm K_v}{K_h + (1 \pm K_v) \tan \alpha} \cdot \tan \phi'$$

se $K_v = 0$, $K_c = K_h$ ($F_S = 1$) vale:

$$K_c = \frac{c'}{\gamma D \cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \tan \phi')} + \frac{\left(1 - \frac{\gamma_w D_w}{\gamma D} - \frac{\Delta u}{\gamma D \cos^2 \alpha}\right) \tan \phi'}{1 + \tan \alpha \tan \phi'} - \frac{\tan \alpha}{1 + \tan \alpha \tan \phi'}$$

TENSIONI TOTALI $c = c_u$; $\phi = 0$; $\gamma = \gamma_{sat}$

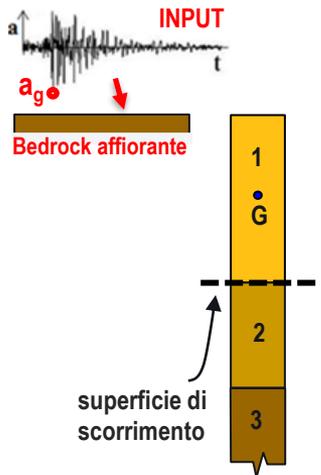
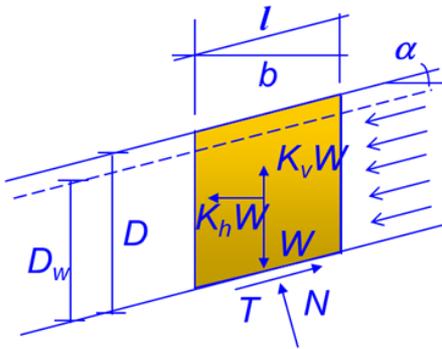
$$F_S = \frac{c_u}{\gamma D \cos^2 \alpha [K_h + (1 \pm K_v) \tan \alpha]}$$

se $K_v = 0$,
 $K_c = K_h$ ($F_S = 1$) vale:

$$K_c = \frac{c_u}{\gamma D \cos^2 \alpha} - \tan \alpha$$

Nel caso di pendio indefinito per mettere in conto la degradazione ciclica è sufficiente stimare γ_v , oltre a $\delta_{cu}(t)$ e/o $\Delta u(t)$ alla profondità della s.d.s., e calcolare $K_c(t)$

$\delta_{cu}(t)$ e/o $\Delta u(t)$ si ricavano noti $\gamma(t)$ e $\tau(t)$ alla profondità della s.d.s.

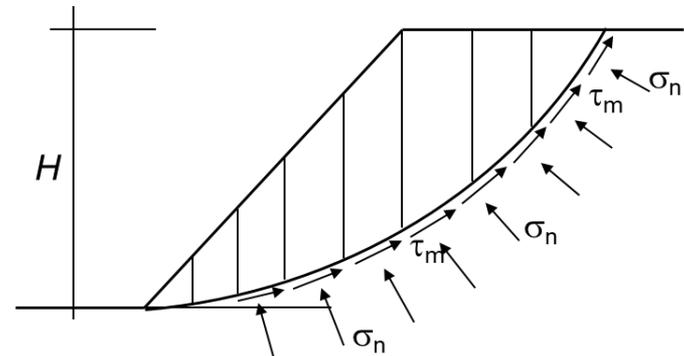
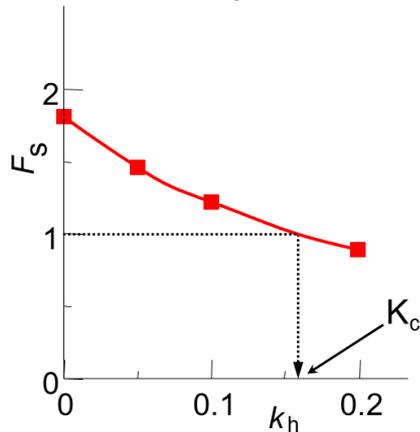


METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

Coefficiente sismico critico: caso generale (metodi delle strisce)

Procedimento:

- 1) si assume K_h di tentativo e si ricerca $F_{S,min}$ (con s.d.s. associata)
- 2) si traccia la curva $F_S - K_h$ eseguendo il calcolo per diversi valori di K_h
- 3) si determina $K_c = K_h$ corrispondente a $F_S = 1$



Nel caso generale in cui lo schema di pendio indefinito non è applicabile, diventa molto oneroso tenere conto della degradazione ciclica in funzione del tempo (il procedimento descritto sopra dovrebbe essere teoricamente applicato per ogni Δt). D'altra parte anche l'utilizzo di analisi di RSL 1D sulla colonna 'equivalente' è piuttosto discutibile...

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

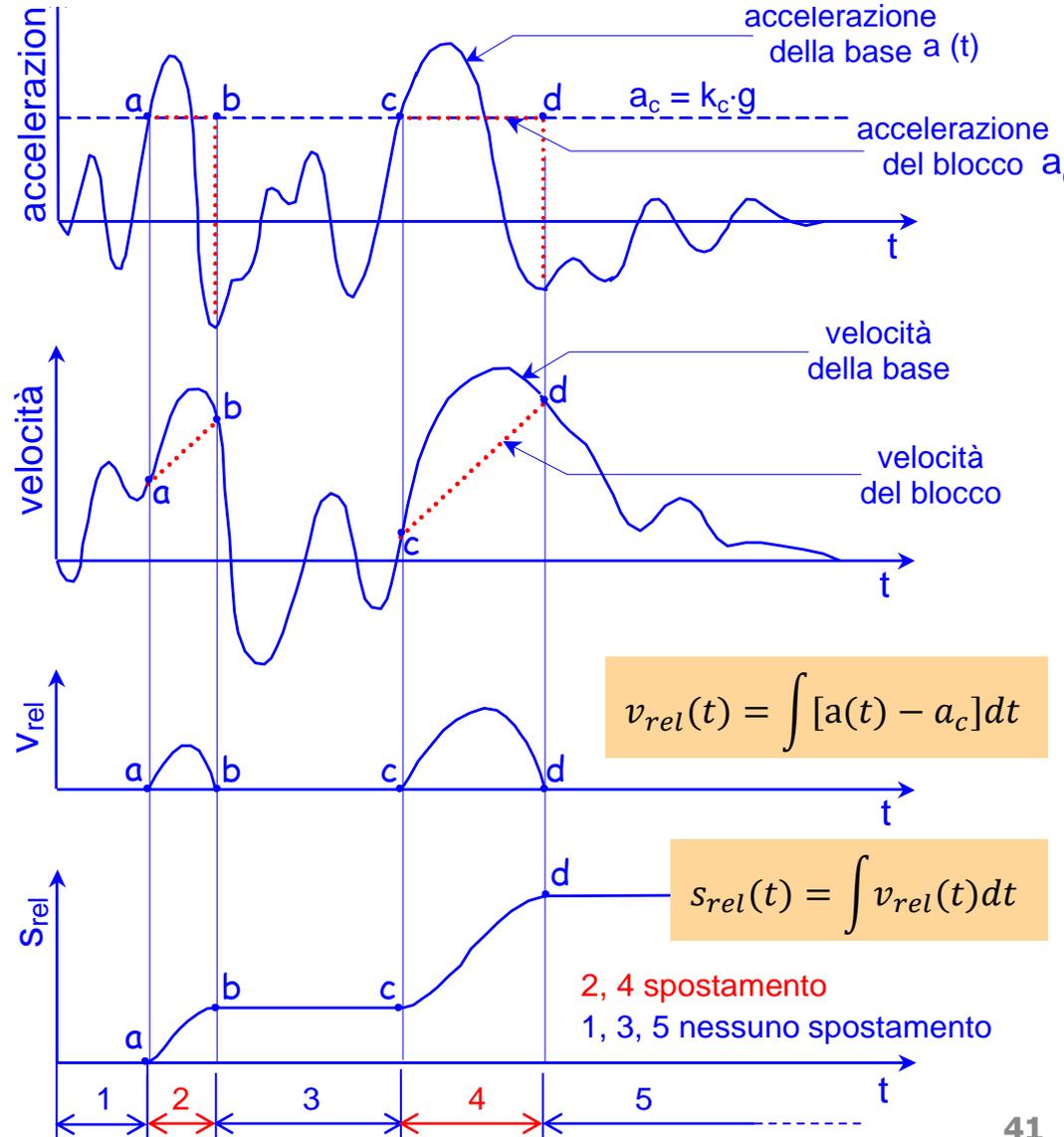
BLOCCO DI NEWMARK SU PIANO ORIZZONTALE

spostamento permanente (spostamento finale cumulato)

$s_{rel} = s_o =$ sommatoria degli spostamenti parziali calcolati nei singoli intervalli di tempo in cui $v_{rel} \neq 0$

Lo spostamento finale cumulato di un blocco rigido su un piano orizzontale vibrante dipende da:

- contenuto in frequenza e ampiezza dell'accelerogramma
- coefficiente sismico critico, k_c



METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

Si può dimostrare che lo spostamento finale cumulato della massa in frana nella direzione della superficie di scorrimento è dato da

$$S = S_0 \cdot A$$

S_0 = spostamento di un blocco rigido su un piano orizzontale vibrante

dipendente da:

- contenuto in frequenza e ampiezza dell'accelerogramma
- coefficiente sismico critico, k_c , funzione delle caratteristiche geometriche e geotecniche del pendio

A = fattore di forma

dipendente da:

- geometria del pendio
- caratteristiche di resistenza del terreno
- forma della superficie di scorrimento

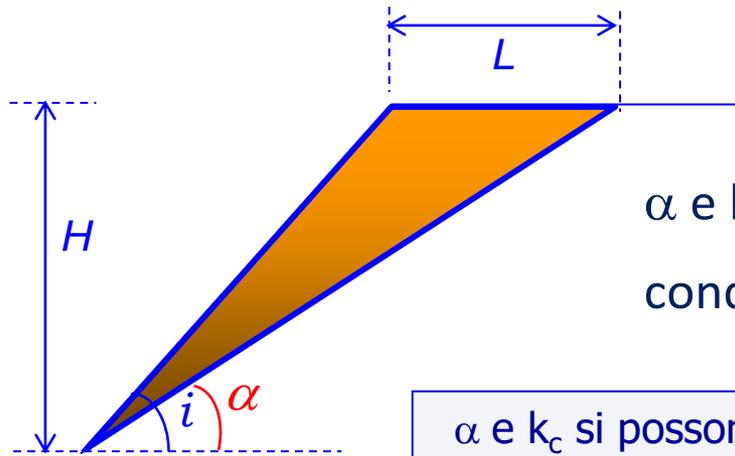
Nota:

S_0 può essere stimato per via numerica o tramite correlazioni empiriche con uno o più parametri rappresentativi del moto sismico (a_{max} , I_A , P_D , T_0)

A è determinabile per forme semplici della s.d.s. (varia orientativamente tra **1.1 e 1.3**)

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

ES: fattore di forma A per cuneo piano



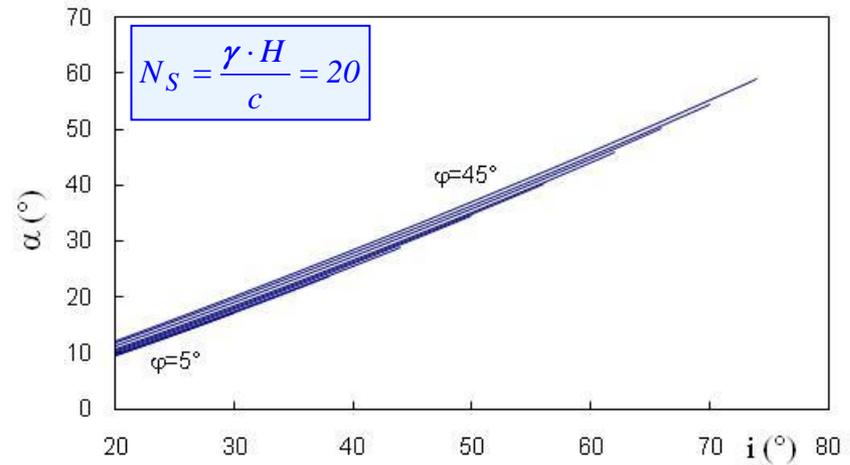
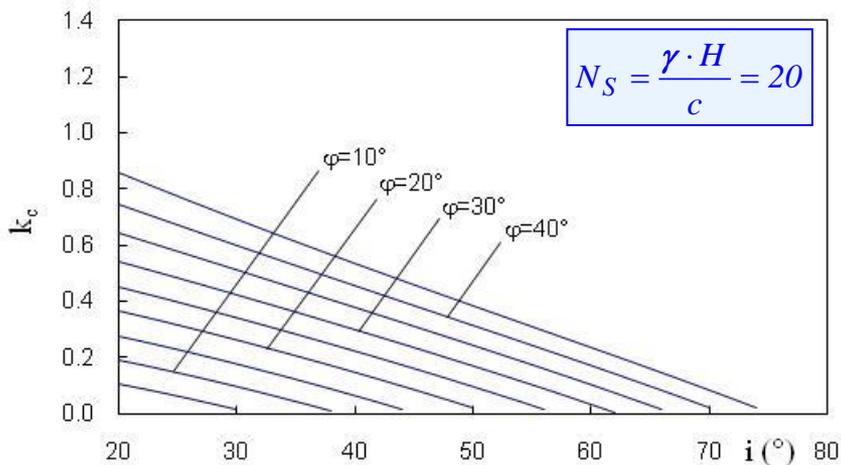
$$A = \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\cos \varphi}$$

α non è noto a priori

α e k_c possono essere ricavati imponendo la

condizione di minimo: $\left(\frac{dk_h}{d\alpha} = 0\right)$

α e k_c si possono trovare anche in grafici e/o tabelle di letteratura (es. Madiai & Vannucchi, 1997)



METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI – CORRELAZIONI EMPIRICHE

Parametri	Relazione	Autori	Note
a_{max}	$\log S_0 = 0.90 + \log \left[\left(1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.53} \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-1.09} \right]$	<i>Ambraseys & Menu (1988)</i> (11 ev., 50 reg., M = 6.6-7.2)	S_0 (cm)
	$\log S_0 = -0.217 + \log \left[\left(1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.26} \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-0.857} \right]$	<i>Madiai (2009)</i> (46 ev. it., 196 reg., M=4.0-6.3)	S_0 (cm)
a_{max}, v_{max}	$S_{0,max} = \frac{v_{max}^2}{2a_c} \left(\frac{a_{max}}{a_c} \right)$	<i>Newmark (1965)</i>	
	$S_0 = 37 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}} \right) \cdot e^{-9.4 \cdot \frac{a_c}{a_{max}}}$	<i>Whitman & Liao (1984)</i> (37 accel., 169 reg., M = 6.3-6.7)	
	$S_0 = 3.89 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}} \right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.57} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-0.69}$	<i>Madiai (2009)</i> (46 ev. it., 196 reg., M=4.0-6.3)	
I_a	$\log S_0 = -3.230 - 3.481 \cdot \log \frac{a_c}{g} + 2.401 \cdot \log I_a$	<i>Jibson (2007)</i> (13 ev., 555 reg.)	$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_{T_D} a^2(t) dt$
a_{max}, I_a	$S_0 = 0.156 \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.60} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-0.60}$	<i>Madiai (2009)</i> (46 ev. it., 196 reg., M=4.0-6.3)	T_D : durata (s); I_a (m/s); S_0 (cm)
P_D	$S_0 = 0.011 \cdot (P_D)^{0.977} \cdot \left(\frac{a_c}{g} \right)^{-1.338}$	<i>Crespellani et al. (1998)</i> (155 ev., 310 acc.)	$P_D = \frac{I_a}{v_0^2}$ potenziale sismico distruttivo
a_{max}, P_D	$S_0 = 1.90 \cdot P_D \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.72} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-0.60}$	<i>Madiai (2009)</i> (46 ev. it., 196 reg., M=4.0-6.3)	v_0 : n. incroci con asse tempi/s P_D ($10^{-4} \cdot g \cdot s^3$); S_0 (cm)
T	$\log \left(\frac{4S_0}{a_{max} T^2} \right) = 0.85 - 3.91 \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)$	<i>Cai e Bathurst (1996)</i> (4 ev. + 5 esplosioni nucleari)	T : periodo medio=durata/n. di semi-incroci con asse dei tempi (s)
a_{max}, T	$S_0 = 0.978 \cdot \frac{a_{max} \cdot T^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.554} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-0.704}$	<i>Madiai (2009)</i> (46 ev. it., 196 reg., M=4.0-6.3)	a_{max} (cm/s ²)

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

Spostamenti ammissibili

Lo spostamento ammissibile dipende da:

- tipo di pendio (naturale o artificiale) e caratteristiche del terreno
- interazione con manufatti esistenti
- livello di protezione assegnato e conseguenze di un'eventuale frana

Le linee guida per l'analisi e la mitigazione del rischio di frana in California (ASCE, 2002) indicano uno spostamento ammissibile di:

- **5 cm** per superfici di scorrimento che coinvolgono manufatti rigidi
- **15 cm** per cinematismi di collasso che si sviluppano in terreni con **curve sforzi-deformazioni di tipo incrudente** e non interagiscono con manufatti esistenti

Nel caso di terreni con **curve sforzi-deformazioni di tipo rammollente** 15 cm è ragionevole se K_c è calcolato utilizzando le caratteristiche di resistenza di post-picco o residua, mentre è opportuno assumere $S_{amm} = 5$ cm se K_c è calcolato con i parametri di picco della resistenza al taglio

METODI DINAMICI DEGLI SPOSTAMENTI

Spostamenti ammissibili

Relazione fra spostamenti osservati e danno strutturale (Legg & Slosson, 1984)

livello di danno	spostamento (cm)
irrilevante	< 0.5
modesto	0.5÷5
forte	5÷50
severo	50÷500
catastrofico	> 500

**Spostamenti ammissibili di pendii naturali stabiliti dallo State of Alaska
Geotechnical Evaluation Criteria Committee (Idriss, 1985)**

livello di danno	spostamento (cm)
irrilevante	< 3
modesto	15
forte	30
severo	90
catastrofico	300