



# VERIFICHE STABILITÀ PENDIO

Schema riassuntivo delle verifiche secondo le NTC 2018 e la Circolare

## Caso **STATICO/POST SISMICO** (con degradazione Resistenza)

6.3 - Pendio Naturale = Nessun Approccio (A=1; M=1; R= discrezione del tecnico)

6.3.4 - Verifiche di sicurezza. Punti d'interesse

- Superfici di scorrimento cinematicamente possibili.
- Pressioni interstiziali: condizioni più sfavorevoli.

6.4.2 - Pendio naturale + Edificio

6.5.3 - Pendio naturale + Opera Sostegno

$$= A2 + M2 + R2 \quad (R2 = 1,1)$$

6.5.3 - Pendio naturale + Edificio + Opera Sostegno

6.8.2 - Materiali sciolti e Fronti di scavo

$$A2 = \text{Tab. 6.2.I}$$

$$M2 = \text{Tab. 6.2.II}$$

## Caso **DINAMICO**

7.11.1 - TUTTE le verifiche  $A(2)=1$   $M(2)=1$

7.11.3.5 - Pendio Naturale = Nessun Approccio (A=1; M=1; R= discrezione del tecnico + Kh)

7.11.3.5.2 Coefficienti sismici  $Kh = bs \times a_{max}/g$   $\beta_s = 0,2 \div 0,3$

7.11.4 – Fronti di scavo e Rilevati  $= A2 + M2 + R2 \quad (R2 = 1,2)$  con  $\beta_s = 0,38$  (SLV)

7.11.5 - Pendio naturale + Edificio  $= A2 + M2 + R2 \quad (R2 = 1,2 \text{ Madiai/ } 1,1 \text{ Aiello})$

7.11.6.2 - Pendio naturale + Opera Sostegno  $= A2 + M2 + R2 \quad (R2 = 1,2)$

7.11.6 - Pendio naturale + Edificio + Sostegno  $= A2 + M2 + R2 \quad (R2 = 1,2)$  con  $\beta_s = 0,38$  (SLV)  
Verifiche stabilità (come 7.11.4)

Verifiche locali (Tab. 7.11.III) con  $R2 = 1 \div 1,2$



## Alcune indicazioni sui Parametri geotecnici da utilizzare nelle verifiche.

Diversi riferimenti delle Norme (NTC2018) che della Circolare, indicano specifici riferimenti alla parametrizzazione fisica e geotecnica da utilizzare in specifici casi. Ecco alcuni esempi:

- Nella verifica a scorrimento di **muro di sostegno**, si utilizza un  $\phi'$  critico (volume costante) e una coesione nulla; invece per la capacità portante si utilizza un  $\phi'$  di picco e l'eventuale coesione efficace. (C6.2.2.4)
- Per le **fondazioni**, i **pendii** e la **resistenza laterale dei pali**, si utilizzano parametri caratteristici medi; mentre per **resistenza alla punta dei pali**, si utilizzano parametri caratteristici minimi (C6.2.2.4).
- Geometria, cinematicismo e pressioni interstiziali del corpo di frana (C6.3.1), vanno definiti in modo adeguato e motivato; in ogni modo le superfici devono essere **cinematicamente possibili** e le pressioni interstiziali **più sfavorevoli** (6.3.4) e comunque nelle verifiche vanno adottati **valori cautelativi** delle pressioni interstiziali (C6.3.4)
- Nelle **frane di primo distacco** (C6.3.4) si utilizzano parametri di resistenza di post-picco.
- Nella possibile **riattivazione di frane esistenti** (C6.3.4) si utilizzano i parametri residui e coesione nulla.

## Verifiche di stabilità dei pendii in condizioni SISMICHE e POST SISMICHE.

Dalle NTC, si riportano le indicazioni sulle modalità delle verifiche di stabilità.

- Pendii nella situazione statica (6.3.3): verifiche in condizioni attuali e future.
- Pendii nella situazione sismica (7.11.3.5 + circolare): verifiche prima, durante e dopo<sup>1</sup> il terremoto.

Per quanto riguarda le condizioni statiche, la situazione è abbastanza chiara (prima della realizzazione dell'opera e dopo la sua realizzazione), mentre per la questione sismica/post sismica, appare più complessa. Analizziamo la questione relativa alla costruzione di un OPERA su pendio. Non si utilizzano le indicazioni di prima, durante e dopo il terremoto, ma gli stati relativi all'OPERA.

### **PRIMA dell'OPERA.**

La Verifica del pendio senza OPERA si suddivide con il sisma e il post-sisma.

- 1) Verifica sul pendio naturale con il sisma, si applica la condizione di cui al 7.11.3.5.
- 2) Verifica sul pendio naturale nel post-sisma per terreni saturi e  $a_{max} > 0,15g^2$ , (punto 7.11.3.5.2) si applica la condizione 6.3 con la degradazione delle resistenze.  
Si opererà con  $a_{max} = 0$  e Degradazione ciclica parametri geotecnici

### **Con l'OPERA.**

- 1) Verifica del pendio con l'OPERA e con il sisma; si applicano le condizioni 7.11.5 o 7.11.6 a seconda che sia presente un edificio e/o un'opera di sostegno. In tutti i casi risulterà  $R2=1,2$ .

1 Con "dopo il terremoto" devono intendersi le condizioni POST Sismiche

2 Indicazione da Eurocodice 8, Parte 1 (2003)

2) Verifica del pendio con l'OPERA nel post-sisma per terreni saturi e  $a_{max} > 0,15g$  (punto 7.11.3.5.2); si applicano le condizioni 6.4.2 o 6.5.3 a seconda che siano presenti un edificio e/o un'opera di sostegno. Le condizioni risulteranno:

- $a_{max} = 0$ ;
- $A_2 = \text{Tab. 6.2.II}$
- Degradazione ciclica parametri geotecnici

## Conclusioni.

Si elencano le questioni importanti da tenere sempre in considerazione nelle verifiche di stabilità dei versanti.

- **Valore della pressione interstiziale**, sia nelle condizioni statiche che sismiche. In tutte le verifiche, devono essere introdotte le condizioni più sfavorevoli.
- **Geometria e cinematismo del corpo della frana**. Valutazione della forma e coerenza della stessa con le condizioni stratigrafiche. Studi sulle superfici di scorrimento indicano che nel caso sismico, generalmente, le superfici sono più superficiali rispetto al caso statico e consigliano di utilizzare superfici diverse nei due casi. Il punto 7.11.3.5.1 indica, in tal senso, la possibilità di non considerare nelle frane profonde il parametro di amplificazione topografica sismico (St).
- **Verifiche di stabilità dei pendii**. Tabella delle verifiche da effettuare per realizzare un'Opera.

| Condizione | ATTUALE / PRIMA<br>Pendio naturale ante Opera | DURANTE<br>Con Opera | FUTURO /FINALE<br>Con Opera |
|------------|---|----------------------|-----------------------------|
| Statica    | X   |                      | X                           |
| Sismica    | X   | X                    |                             |
| POST Sisma | X*  |                      | X*                          |

\* solo nelle condizioni di sito con  $a_{max} > 0,15$  e terreni saturi (punto 7.11.3.5.2).

- **Parametrizzazione geotecnica adeguata alla situazione** (natura dei terreni; frane di primo distacco; frane esistenti). Chiaramente l'origine dei parametri geotecnici dovrà essere adeguata (prove in sito e in laboratorio).

| Frana                    | Terreni incoerenti                          | Terreni coerenti (NC)                       | Terreni coerenti (OCR>1)                    |
|--------------------------|---|---|---|
| Attiva/<br>Riattivazione | t.efficaci<br>$c'=0$ ; $f_i=\text{critico}$ | t.efficaci<br>$c'=0$ ; $f_i=\text{residuo}$ | t.efficaci<br>$c'=0$ ; $f_i=\text{residuo}$ |
| Primo<br>Distacco        | t.efficaci<br>$c'=0$ ; $f_i=p.p.$           | t.efficaci<br>$c'^*$ e $f_i=p.p.$           | t.efficaci **<br>$c'$ e $f_i=p.p.$          |
|                          |   | t.totali **<br>$c_u \neq 0$ ; $f_i=0$       | t.totali<br>$c_u \neq 0$ ; $f_i=0$          |

p.p. = post picco;  $f_i$  critico = volume costante; \*= numerosi autori (es. Berardi) indicano  $c'=0$  per argille NC, in quanto dipendente da  $OCR > 1$ ; \*\*= condizioni ritenute più critiche (Piling Handbook 2001):

Documento redatto anche con il contributo dei professori Claudia Madiari, Leonardo Borselli ed Eros Aiello.



**NOTE AGGIUNTIVE.**

I tre principali fattori scatenanti di un evento franoso sono le precipitazioni (64%), i fenomeni erosivi (23%) e le attività antropiche (19%) dai dati di Mansour et al. 2010; il terremoto è indicato nell'ordine del 2%.

Anche ISPRA su un totale di 52720 frane nel territorio italiano, suddivide grossomodo come fattore principale le precipitazioni (>50%), l'erosione e le attività dell'uomo con un 20% ciascuno e il terremoto con circa un 1%.

Da queste statistiche si deduce come le piogge siano la principale causa delle frane, mentre il basso valore percentuale del fattore terremoto è, probabilmente, da ricondurre al rapporto esistente tra numero di piogge consistenti e numero di terremoti significativi, che in molte parti del territorio italiano, mostra come gli eventi legati alle precipitazioni meteoriche siano rappresentati da una elevata frequenza annuale.

I motivi per cui le NTC2018 rispetto alle NTC2008, non considerano più la riduzione dei parametri geotecnici nel caso sismico, viene così motivata:

Prof. *Madai*: la casistica ci dice che il caso del terremoto è significativamente raro;

Prof. *Aiello*: gruppo geotecnici estensori delle norme, ha valutato incompatibilità tra sisma+amplificazione+riduzione parametri.

**Spinta delle Terre.**

Determinazione di  $K_{attiva}$  ►  $\phi'$  di Picco

Determinazione di  $K_{passiva}$  ►  $\phi'$  Critico

**Denominazione Stato Parametro/Terreno**

| Parametro PICCO | POST PICCO       | CRITICO (Vol. costante) | RESIDUO |
|-----------------|------------------|-------------------------|---------|
| Sabbie          | Sabbie addensate | Sabbie                  |         |
| Argille         | Argille OCR>1    |                         | Argille |

**Resistenza non drenata (su) terreni fini**

Minore indice dei vuoti ( $e$ ) ► maggiore resistenza non drenata ( $su$ ). In terreni saturi la resistenza non drenata diventa maggiore al diminuire del contenuto d'acqua (e quindi dell'indice dei vuoti).

In generale la Resistenza non drenata è minore della Resistenza Drenata.

Terzaghi dimostra che per argille con OCR>4, la Resistenza non drenata può risultare maggiore della Resistenza drenata.

Sempre in merito alla resistenza non drenata dei terreni fini (argille e limi argillosi), si riportano a titolo di esempio i campi di valori delle **resistenze degradate**, dedotti da alcuni studi.

| Autore                | Indice Plasticità | Indicazioni   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Matsui (1990)         | 10%-40%           | R.U. degradata = 50-90% R.U. statica                |
| MSHA (2009)           |                   | R.U. degradata = 80% R.U. statica (argille soffici) |
|                       |                   | R.U. degradata = R.U. residua (argille dure)        |
| Ajmera, Tiwari (2019) |                   | R.U. degradata = 55-100% R.U. statica               |

R.U. = resistenza non drenata

Valori ragionevoli di **coesione efficace** secondo il volume di Lancellotta, possono indicarsi in 5-25 kPa, per  $s' < 5 \text{ kg/cmq}$  (Lambe/Whitman 1969; Ladd 1971), laddove non siano presenti fenomeni di cementazione. Dati indicati dal laboratorio Igetecma (Montelupo F.no) evidenziano massimi valori di coesione efficace equivalenti a 50kPa, con valori medi compresi tra 30-40 kPa.

L'**indagine geognostica** è propedeutica alla verifica che dovrà esser fatta, per cui risulterà basilare caratterizzare i terreni in coerenti o non coerenti.

Se abbiamo terreni coerenti, tassativamente prove CPT o dinamiche rivestite; in presenza di dinamiche non rivestite, i parametri di resistenza non drenata non si ritengono accettabili. Per i terreni incoerenti non occorre il rivestimento alla prova penetrometrica.

Indagini superiori del tipo CPTu, sondaggi a carotaggio continuo, ecc., si presentano più significative per la definizione dei parametri geotecnici; per questo motivo, al sondaggio a carotaggio continuo dovranno essere allegate ulteriori prove sia di natura speditiva (Vane Test, Pocket Penetrometer), sia di tipo standard (SPT) o di prelievo di campioni disturbati (Limiti di Atterberg) o indisturbati (Parametri di resistenza).

Le indagini di laboratorio su campioni i disturbati (C6.2.2.2 e C6.3.3), vanno finalizzate al problema da trattare (UU, CU, taglio, edometria).

In merito alle indagini penetrometriche dinamiche **DPSH**, le normali correlazioni permettono di definire sia parametri in condizioni drenate ( $\phi'$ ) sia non drenate ( $c_u$ ) mediante il confronto con dati SPT. Abbiamo quindi una doppia correlazione: numero colpi DPSH ► SPT ► parametro geotecnico.

Va comunque detto che le correlazioni esistenti tra SPT ►  $c_u$ , a differenza di quelle su angolo di attrito, raggiungono un basso coefficiente di determinazione ( $R^2$ ), generalmente non superiore a 0,2, a significare che non esiste un rapporto diretto, ma vi sono notevoli fattori che interagiscono e per questo le rendono poco o per nulla affidabili.

Le correlazioni normalmente utilizzate indicano  $c_u$  (kPa) = 3,5÷12,5 NSPT.

Una ulteriore motivazione per cui, nelle prove non rivestite, non si ritengono accettabili i parametri non drenati, deriva dal fatto che le forze di coesione aumentano la resistenza alla penetrazione su tutto lo spessore delle aste inserite nel foro, per cui più si approfondisce la profondità e maggiori resistenze si incontrano. Quindi non abbiamo la sola resistenza dei 20/30 cm che risultano interessati dai colpi del penetrometro, bensì di spessori ben superiori.

In condizioni miste (terreni con componente prevalente di natura incoerente, ma con una piccola percentuale di natura fine), si può provare a ipotizzare che il totale dei colpi alla penetrazione del tratto significativo (20/30 cm) corrisponda alla somma dei due apporti (incoerente+coerente); in tal modo la correlazione dei parametri geotecnici dovrà tenere in conto di questa ripartizione e in ogni modo non sarà possibile correlare l'intero numero dei colpi sia per la frazione incoerente che coerente, portando di fatto una sovradimensionamento dei due parametri geotecnici.

Una delle possibili soluzioni per la determinazione del parametro non drenato con il dato SPT, potrebbe operare in questo modo:

1. Utilizzo di una quota parte del numero di colpi totale, da destinare alla sola coesione non drenata;
2. Determinazione del corrispondente valore di SPT;
3. Utilizzo della correlazione più conservativa;
4. La restante parte del numero dei colpi, potrà essere utilizzata per la correlazione con l'angolo di attrito.

Breve schema riassuntivo legato alla significatività delle principali tipologie di prova utilizzate.

| Tipo di Prova                      | Dove si può operare  | INFORMAZIONI  | NOTE   |
|------------------------------------|--|---|--|
| <b>DPL/M</b> 10/30kg               | Su tutti i terreni. Importante la conoscenza a priori della natura coerente o incoerenti dei terreni attraversati. | Resistenza dei terreni in generale / Discontinuità con la profondità. Nei casi noti di depositi di prevalente natura incoerente, stima del valore di $\phi'$ (picco)  | DATI NON Significativi per la definizione di parametri non drenati. Prof. Max indagine DPL= 8m |
| <b>DPSH</b> senza rivestimento     | Su tutti i terreni. Importante la conoscenza a priori della natura coerente o incoerenti dei terreni attraversati. | Nei casi noti di depositi di prevalente natura incoerente, valutazione del valore di $\phi'$ (picco) e andamento della resistenza con la profondità. Con inserimento di tubo, possibilità della misurazione della pressione neutra. | DATI NON Significativi per la definizione di parametri non drenati.                            |
| <b>DPSH</b> con rivestimento       | Su tutti i terreni   | Resistenza al taglio drenata e non drenata (picco). Con inserimento di tubo, possibilità della misurazione della pressione neutra.  |  |
| <b>CPT</b>                         | Su terreni coerenti e scarsamente incoerenti.  | Resistenza al taglio drenata e non drenata (picco). Stratigrafia. Con inserimento di tubo, possibilità della misurazione della pressione neutra. Ulteriori informazioni da qc: $G_0$ ; $E'$   |  |
| <b>CPTu/CPTe</b>                   | Su terreni coerenti e scarsamente incoerenti.  | Resistenza al taglio drenata e non drenata (picco). Stratigrafia. Misura della pressione interstiziale. Ulteriori informazioni da qc: $G_0$ ; $E'$  |  |
| Scissometrica ( <b>Vane Test</b> ) | Terreni coerenti   | Resistenza al taglio non drenata  | Stima della resistenza al taglio residua   |
| <b>Pocket</b> penetrometer         | Terreni coerenti   | Resistenza al taglio non drenata  |  |



### PRESSIONI INTERSTIZIALI O VOLUME SATURO?

|   |              |  |                |                                     |  |
|---|--------------|--|----------------|-------------------------------------|--|
| Angolo attrito ( $\phi$ )                       | 28           | Inserimento dati nelle sole celle gialle |                |                                     |  |
| Coesione (kPa)                                  | 0            |  |                | STABILITÀ PENDIO CONDIZIONE STATICA |  |
| pendenza superf. Scorrimento ( $\alpha^\circ$ ) | 30           | Resistenza (coes+attr)                   | 276,284 kN/m   | acqua in quiete                     |  |
| spessore strato H (m)                           | 6            |  | 28172,713 kg/m | Fattore sicurezza                   |  |
| altezza acqua h (m)                             | 0            |  |                | <b>0,921</b>                        |  |
| peso volume secco (kN/mc)                       | 20           | Mobilitante (T)                          | 300,000 kN/m   |                                     |  |
| peso volume saturo (kN/mc)                      | 20           |  | 30591,000 kg/m |                                     |  |
| Lunghezza concio L (m)                          | 5            |  |                |                                     |  |
| Eventuale sovraccarico (kN/mq)                  | 0            | Differenza [R(coes+attr) - T]            | -23,716 kN/m   |                                     |  |
|   |              |  | -2418,287 kg/m |                                     |  |
| <b>NON MODIFICARE</b>                           |              |  |                |                                     |  |
| Resistenza coesione (coes*L)                    | 0,000 kN/m   |  |                |                                     |  |
| Peso Terreno Striscia                           | 600,000 kN/m |  |                |                                     |  |
| Componente $\perp$ Peso Striscia (N)            | 519,615 kN/m |  |                |                                     |  |
| Pressione Acqua (U)                             | 0,000 kN/m   |  |                |                                     |  |
| Peso Efficace (N-U)                             | 519,615      |  |                |                                     |  |
| $tg \phi$                                       | 0,532        |  |                |                                     |  |
| Resistenza attrito (N-U)*(tg $\phi$ )           | 276,284 kN/m |  |                |                                     |  |
| Forza Resistente (coes+attr)                    | 276,284 kN/m |  |                |                                     |  |
| Forza Mobilitante ( $\gamma*L*\sin\alpha$ )     | 300,000      |  |                |                                     |  |
| MAX pendenza superf. scorr.                     | 59°          |  |                |                                     |  |
| pendenza superficie scorrimento                 | VA BENE      |  |                |                                     |  |

|   |              |  |                |                                     |  |
|---|--------------|--|----------------|-------------------------------------|--|
| Angolo attrito ( $\phi$ )                       | 28           | Inserimento dati nelle sole celle gialle |                |                                     |  |
| Coesione (kPa)                                  | 0            |  |                | STABILITÀ PENDIO CONDIZIONE STATICA |  |
| pendenza superf. Scorrimento ( $\alpha^\circ$ ) | 30           | Resistenza (coes+attr)                   | 241,178 kN/m   | acqua in quiete                     |  |
| spessore strato H (m)                           | 6            |  | 24592,934 kg/m | Fattore sicurezza                   |  |
| altezza acqua h (m)                             | 0,5          |  |                | <b>0,885</b>                        |  |
| peso volume secco (kN/mc)                       | 18           | Mobilitante (T)                          | 272,500 kN/m   |                                     |  |
| peso volume saturo (kN/mc)                      | 20           |  | 27786,825 kg/m |                                     |  |
| Lunghezza concio L (m)                          | 5            |  |                |                                     |  |
| Eventuale sovraccarico (kN/mq)                  | 0            | Differenza [R(coes+attr) - T]            | -31,322 kN/m   |                                     |  |
|   |              |  | -3193,891 kg/m |                                     |  |
| <b>NON MODIFICARE</b>                           |              |  |                |                                     |  |
| Resistenza coesione (coes*L)                    | 0,000 kN/m   |  |                |                                     |  |
| Peso Terreno Striscia                           | 545,000 kN/m |  |                |                                     |  |
| Componente $\perp$ Peso Striscia (N)            | 471,984 kN/m |  |                |                                     |  |
| Pressione Acqua (U)                             | 18,394 kN/m  |  |                |                                     |  |
| Peso Efficace (N-U)                             | 453,590      |  |                |                                     |  |
| $tg \phi$                                       | 0,532        |  |                |                                     |  |
| Resistenza attrito (N-U)*(tg $\phi$ )           | 241,178 kN/m |  |                |                                     |  |
| Forza Resistente (coes+attr)                    | 241,178 kN/m |  |                |                                     |  |
| Forza Mobilitante ( $\gamma*L*\sin\alpha$ )     | 272,500      |  |                |                                     |  |
| MAX pendenza superf. scorr.                     | 59°          |  |                |                                     |  |
| pendenza superficie scorrimento                 | VA BENE      |  |                |                                     |  |





| Altezza acqua<br>metri       | Peso volume<br>KN/mc | RESISTENZA   |     |     | MOBILIZZANTE |     |     | F sic |      |      |
|------------------------------|----------------------|--|-----|-----|--------------|-----|-----|-------|------|------|
|                              |                      | 10°  | 30° | 50° | 10°          | 30° | 50° | 10°   | 30°  | 50°  |
| 0                            | 20                   | 314  | 276 | 205 | 104          | 300 | 459 | 3,01  | 0,92 | 0,44 |
| 0                            | 18                   | 282  | 248 | 184 | 93           | 270 | 413 | 3,01  | 0,92 | 0,44 |
| 0,5                          | 18/20                | 272  | 241 | 180 | 94           | 272 | 417 | 2,88  | 0,88 | 0,43 |
| 1                            | 18/20                | 262  | 233 | 177 | 95           | 275 | 421 | 2,75  | 0,85 | 0,42 |
| 2                            | 18/20                | 242  | 218 | 170 | 97           | 280 | 429 | 2,5   | 0,78 | 0,4  |
| 4                            | 18/20                | 202  | 188 | 155 | 100          | 290 | 444 | 2,01  | 0,65 | 0,35 |
| 6                            | 18/20                | 162  | 158 | 140 | 104          | 300 | 460 | 1,56  | 0,53 | 0,31 |
| <b>Peso Volume<br/>Acqua</b> |                      | Nell'aumento di gamma, Resistenza guadagna 11%, come per la Mobilizzante 11% (Differenza valore Peso Volume 11%)<br>Per ogni metro di acqua più alto, la Resistenza diminuisce di 8%, mentre Mobilizzante aumenta 2% |     |     |              |     |     |       |      |      |

Considerando un **peso di volume saturo** e per questo un aumento del peso di volume del terreno, si contribuisce sia ad aumentare la resistenza del terreno (forza stabilizzante) sia quella mobilizzante;

Un **livello dell'acqua nei terreni**, contribuisce ancora ad aumentare la forza mobilizzante, ma diminuisce la resistenza del terreno (N-U).

Per questo motivo nel primo caso (considerando un peso di volume saturo) il fattore di sicurezza non si modifica, dato che si aumentano in modo proporzionale le due forze; nel secondo caso (quello reale) la resistenza del terreno diminuisce e per questo il fattore di sicurezza cala.

L'introduzione di un peso di volume saturo al posto di una pressione interstiziale nulla, oltre che privo di significato rende il calcolo imprudente.

## Vari aspetti della Relazione geologica possono essere:

- **Non descritti o**
- **Descritti in modo non corretto** (sbrigativo, sbagliato...)

## A questo, può essere dato il significato di:

- **Un contenuto che manca**
- **Un contenuto che significa altro**