



---

## COMUNE DI SARTEANO

### PROGETTO DI ESCAVAZIONE E RIPRISTINO DELLA CAVA DENOMINATA "SFERRACAVALLI"

\*\*\*\*\*

---

#### *ANALISI DI STABILITÀ*

---

---

Proprietà: Gosti s.r.l.

località Stradone, Moiano - (PG)

---

Siena, 13 giugno 2011

GEOSOL s.r.l.  
Dott. geologo Mauro Cartocci

GEOSOL s.r.l.

Viale Europa 31  
53100 Siena  
Tel. 0577.44470  
Fax 0577.222011  
e-mail: [studio@geosol.it](mailto:studio@geosol.it)

Partita IVA IT 00707530523  
CCIAA Siena n. 85428  
Isc. Trib. Siena n.6345 Vol.8133

numero archivio:  
**4536a**

## 1. PREMESSA

In base a quanto previsto dalla normativa vigente, è stata eseguita la valutazione della stabilità dei fronti di coltivazione sia allo stato attuale, sia allo stato finale; per tale verifica è stata considerata la sezione A ritenuta la più critica.

## 2. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

Il materiale oggetto di coltivazione proviene dalla Formazione del Calcarea a Rhaetavicula contorta appartenente al Complesso delle formazioni di Facies Toscana.

Esso è costituito da calcarea e calcarea marnoso, di colore grigio scuro o nero intercalati a livelli di marne ed è caratterizzato da una serie di fratture ad andamento subverticale orientate secondo tre direzioni principali:

*N 45° verticale — EW verticale — N 135° verticale*

Le diaclasi si presentano frequentemente a giunti chiusi con alterazione scarsa o nulla e in queste non sono stati inoltre osservati fenomeni di milonizzazione.

L'elevata spaziatura esistente tra le fratture e, generalmente, lo stato geomeccanico fa sì che l'ammasso roccioso possa considerarsi nella sua compagine uniforme e dotato di elevate caratteristiche meccaniche.

In base alle considerazioni sopra esposte, ai dati bibliografici esistenti e alle molteplici esperienze avute su materiali appartenenti alla medesima unità litostratigrafica affioranti in aree limitrofe, ai materiali di escavazione possono essere affidati i seguenti parametri geotecnici minimi:

- *peso di volume  $\gamma = 2.50 \text{ t/m}^3$*
- *angolo di attrito  $\phi' = 38^\circ$*
- *coesione  $C = 1.00 \text{ Kg/cm}^2$*

## 3. CONSIDERAZIONI GENERALI IN CONDIZIONI SISMICHE

Il Comune di Sarteano, in base al D.G.R.T. n°431 del 19 giugno 2006 "Riclassificazione sismica del territorio regionale: Attuazione al D.M. del 14 settembre 2005 e O.P.C.M. n°3519 del 28 aprile 2006 pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale in data 11 maggio 2006", è stato declassato dalla **Zona 2**, prevista Ordinanza P.C.M. 20 marzo 2003 n.3274 del 20 marzo 2003, alla **Zona 3S** (media sismicità).

Si tratta di una nuova zona, non prevista dalla precedente normativa, in cui comprendere tutti i comuni che cambiano zona al variare delle sottozone (classi mobili). In particolare si tratta di 106 comuni che potrebbero passare, in base alla proposta di riclassificazione in corso di studio da parte del Gruppo di Lavoro, in Zona 3 (a bassa sismicità) ma anche restare nella Zona 2 (a media sismicità). Si fa comunque presente che nella Zona 3S non viene diminuito il livello di protezione precedente e le costruzioni devono essere progettate e realizzate con le azioni sismiche della Zona 2.

In particolare le nuove norme tecniche indicano, in base al parametro  $a_g$ =accelerazione orizzontale ed all'accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico  $a_g/g$ , quattro zone di cui le prime tre vengono suddivise in quattro intervalli caratterizzati da differenze di accelerazione pari a 0.025g, mentre la quarta, visti i bassi valori di accelerazione, non prevede ulteriori suddivisioni:

Zona	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni ( $a_g$ )	Accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico ( $a_g/g$ )
1	$0.25 < a_g < 0.35$	0.35g
2	$0.15 < a_g < 0.25$	0.25g
3	$0.05 < a_g < 0.15$	0.15g
4	$a_g < 0.05$	0.05g

### 3.1 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO

Le Norme Tecniche (D.M. 14/01/2008 “Norme Tecniche per le costruzioni”), in relazione alla possibile amplificazione sismica per effetti litologici, indicano delle categorie di sottosuolo di riferimento per la definizione dell’azione sismica di progetto.

Il parametro basilare per questa caratterizzazione è indicato nella velocità delle onde di taglio mediate sui primi 30 m di terreno ( $V_{s30}$ );  $V_{s30}$  è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,n} (h_i/V_i)}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio dello strato  $i$ -esimo per un totale di  $n$  strati presenti nei 30 m superiori.

I profili stratigrafici, definiti in relazione alle loro caratteristiche di spessore e di rigidità che determinano l’amplificazione del moto sismico superficiale rispetto a quello indotto alla loro base, sono così indicati:

**CATEGORIA A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/sec, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 metri.

**CATEGORIA B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti**, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 360 m/sec e 800 m/sec (ovvero  $N_{spt,30} > 50$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u,30} > 250$  kPa nei terreni a grana fine).

**CATEGORIA C: Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti**, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 m/sec e 360 m/sec (ovvero  $15 < N_{spt,30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < c_{u,30} < 250$  kPa nei terreni a grana fine).

**CATEGORIA D: Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti**, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30} < 180$  m/sec (ovvero  $N_{spt,30} < 15$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u,30} < 70$  kPa nei terreni a grana fine).

**CATEGORIA E: Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m**, posti sul substrato di riferimento (con  $V_{s30} > 800$  m/sec).

#### CATEGORIE AGGIUNTIVE DI SOTTOSUOLO

**CATEGORIA S1:** Depositati di terreni caratterizzati da valori di  $V_{s30} < 100$  m/sec (ovvero  $10 < c_{u,30} < 20$  KPa), che includono uno strato di almeno 8 metri di terreni a grana fine di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 metri di torba o di argille altamente organiche.

**CATEGORIA S2:** Depositati di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

La resistenza penetrometrica dinamica equivalente  $N_{spt,30}$  è definita dalla seguente espressione:

$$N_{spt,30} = [ \sum_{i=1,M} (h_i) ] / [ \sum_{i=1,M} (h_i/N_{spt,i}) ]$$

La resistenza non drenata equivalente  $c_{u,30}$  è definita dalla seguente espressione:

$$C_{u,30} = [ \sum_{i=1,K} (h_i) ] / [ \sum_{i=1,K} (h_i/C_{u,i}) ]$$

### 3.2 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE ED AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA

Le condizioni topografiche definiscono il coefficiente di amplificazione topografica  $St$ ; per situazioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale, mentre per configurazioni superficiali semplici si potrà adottare la seguente classificazione:

CATEGORIA	CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ ( $i \leq 26.7\%$ )
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$ ( $i > 26.7\%$ )
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ ( $26.7\% \leq i \leq 57.7\%$ )
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $i > 30^\circ$ ( $i > 57.7\%$ )

Le categorie topografiche sopra esposte si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Per tenere conto delle condizioni topografiche ed in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico  $St$  riportato nella seguente tabella in funzione dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento:

CATEGORIA	UBICAZIONE DELL'OPERA O DELL'INTERVENTO	ST
T1	-----	1.0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1.2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.4

La variazione spaziale del coefficiente di amplificazione topografica è definita da un decremento lineare con l'altezza del pendio o del rilievo, dalla sommità o cresta fino alla base, dove  $St$  assume valore unitario.

### 3.3 STIMA DELLA CATEGORIA TOPOGRAFICA E DEL COEFFICIENTE DI AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA

Essendo l'area interessata dalla cava è caratterizzata da un profilo morfologico con pendenze massime maggiori del 26%, in base alla suddetta tabella, appartiene alla categoria topografica T2 (Pendii con inclinazione media  $i > 15^\circ$  ( $i > 26.7\%$ )).

Pertanto, si affida al terreno in studio, il seguente coefficiente topografico  $St$  di amplificazione sismica:

$$ST = 1.2$$

### 3.4 STIMA DELLA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

Per la stima della categoria di sottosuolo, considerando che siamo in presenza di materiale roccioso scarsamente fratturato e dotato di spessori maggiori di 30 m, si possono ritenere i terreni appartenenti alla seguente categoria di suolo di fondazione:

**CATEGORIA A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/sec, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 metri.

Di conseguenza, in base alle analisi sopra esposte, è possibile riassumere per i terreni in studio le categorie individuate:

- Zona sismica: 2;
- Categoria di sottosuolo: Categoria A;
- Categoria topografica: T2;
- Coefficiente di amplificazione topografica:  $ST = 1.2$

### 3.5 STIMA DELL'ACCELERAZIONE MASSIMA E DEL COEFFICIENTE SISMICO ORIZZONTALE KH

Per ottenere il valore del coefficiente sismico orizzontale  $kh$ , si deve prima valutare l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito  $a_{max}$ :

$$a_{max} = Ss ST a_g$$

- in cui:
- $a_g$  = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido;
  - $Ss$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica, la cui espressione è riportata nella Tab. 3.2.V del D.M. 14.01.2008;
  - $ST$  = coefficiente di amplificazione topografica.

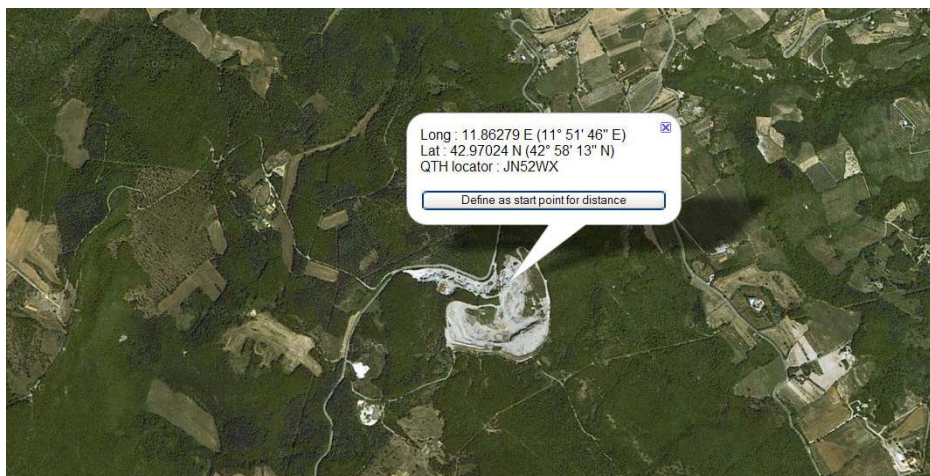
Da qui si ottiene:

$$Kh = \beta_s a_{max}/g$$

in cui  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa del sito riportato nella seguente tabella:

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$a_g(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

Pertanto, per il terreno in oggetto in relazione alla localizzazione geografica, si hanno i seguenti parametri sismici:



#### Parametri sismici

**Tipo di elaborazione: Opere di sostegno**

**Sito in esame.**

latitudine: 42,971211  
 longitudine: 11,863746  
 Classe: 2  
 Vita nominale: 50

**Siti di riferimento**

Sito 1	ID: 23619	Lat: 42,9733	Lon: 11,8500	Distanza: 1145,327
Sito 2	ID: 23620	Lat: 42,9742	Lon: 11,9183	Distanza: 4450,154
Sito 3	ID: 23842	Lat: 42,9242	Lon: 11,9196	Distanza: 6926,807
Sito 4	ID: 23841	Lat: 42,9233	Lon: 11,8513	Distanza: 5426,831

**Parametri sismici**

Categoria sottosuolo:	A
Categoria topografica:	T2
Periodo di riferimento:	50anni
Coefficiente cu:	1

**Operatività (SLO):**

Probabilità di superamento:	81	%
Tr:	30	[anni]
ag:	0,051	g
Fo:	2,527	
Tc*:	0,253	[s]

**Danno (SLD):**

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	50	[anni]
ag:	0,063	g
Fo:	2,553	
Tc*:	0,264	[s]

**Salvaguardia della vita (SLV):**

Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	475	[anni]
ag:	0,148	g
Fo:	2,476	
Tc*:	0,285	[s]

**Prevenzione dal collasso (SLC):**

Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	975	[anni]
ag:	0,185	g
Fo:	2,505	
Tc*:	0,289	[s]

**Coefficienti Sismici**

SLO:	SLD:	SLV:	SLC:
Ss: 1,000	Ss: 1,000	Ss: 1,000	Ss: 1,000
Cc: 1,000	Cc: 1,000	Cc: 1,000	Cc: 1,000
St: 1,200	St: 1,200	St: 1,200	St: 1,200
Kh: 0,012	Kh: 0,015	Kh: 0,048	Kh: 0,060
Kv: 0,006	Kv: 0,008	Kv: 0,024	Kv: 0,030
Amax: 0,606	Amax: 0,739	Amax: 1,739	Amax: 2,175
Beta: 0,200	Beta: 0,200	Beta: 0,270	Beta: 0,270

**4. ANALISI DI STABILITA'**

Sono state effettuate le analisi di stabilità, sia allo stato attuale sia allo stato finale, considerando la sezione A, ritenuta la più rappresentativa dell'area di cava.

Le verifiche di stabilità sono state effettuate utilizzando un programma di calcolo automatico, denominato "SLOPE 2010", adottando il metodo di Bishop .

Le verifiche hanno tenuto conto delle seguenti ipotesi:

- 1) per semplificazione il problema è considerato bidimensionale;
- 2) si esaminano le condizioni d'equilibrio limite confrontando la forza "franante", costituita dal peso della massa di terreno delimitato da una potenziale superficie di scorrimento, con la forza "resistente" costituita dalla resistenza al taglio dovuta alle caratteristiche geotecniche del terreno lungo la superficie di scorrimento;



- 3) si ipotizzano superfici di scorrimento regolari il cui andamento risulta essere dato da un cerchio formato da una linea spezzata formata da segmenti;
- 4) il terreno considerato viene suddiviso in conci con superficie di base piana;
- 5) si tiene conto delle azioni sismiche corrispondenti alla Classificazione sismica della Regione Toscana secondo l'Ordinanza PCM n. 3519 del 28/04/2006. Le NTC 2008 calcolano i coefficienti  $K_0$  e  $K_v$  in dipendenza di vari fattori:

$$K_0 = \beta_s \times (a_{max}/g)$$

$$K_v = \pm 0,5 \times K_0$$

Con:

- $\beta_s$  coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
- $a_{max}$  accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- $g$  accelerazione di gravità.

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa sul sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{max} = S_S S_T a_g$$

Tali componenti orizzontale e verticale dell'azione sismica da adottare nelle verifiche di stabilità sono state indicate nei precedenti paragrafi.

La scelta dei parametri affidati al terreno è stata fatta utilizzando dei valori ragionevolmente prossimi ai valori medi, come indicato nei casi in cui si voglia rappresentare elevati volumi di terreno, dalle istruzioni sulle NTC 2008 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Il modello proposto ha infatti lo scopo di riassumere l'assetto litostratigrafico e geotecnico nel suo insieme; per i terreni in oggetto, si assume inoltre che i valori medi ( $f_m$ ) corrispondano ai valori caratteristici ( $f_k$ ).

Ai fini del calcolo della stabilità del versante, ai valori caratteristici ( $f_k$ ) si applicano i coefficienti di sicurezza parziali ( $\gamma_M$ ) in funzione dello stato limite considerato secondo l'approccio di calcolo scelto (APPROCCIO1-COMBINAZIONE2: A2+M2+R2), così come definito dalle NTC 2008, e si ottengono i valori di progetto ( $f_d$ ) secondo le formule qui di seguito riportate:

- valore della tangente dell'angolo d'attrito di progetto:  $\tan(\Phi'd) = [\tan(\Phi'k)] / 1,25$ ;
- valore del peso di volume di progetto:  $\gamma_d = \gamma_k / 1$ ;
- valore della coesione efficace di progetto:  $c'd = c'k / 1,25$ ;
- valore della coesione non drenata di progetto:  $c_{ud} = c_{uk} / 1,40$ ;
- valore della resistenza a compressione uniassiale  $q_{ud} = q_{uk} / 1,60$ .

Pertanto, riassumendo, nell'area in studio sono presenti i seguenti litotipi a cui vengono affidati i seguenti parametri geotecnici medi, corrispondenti ai parametri caratteristici ( $f_m = f_k$ ):

- **peso di volume  $\gamma = 2.50 \text{ t/m}^3$**
- **angolo di attrito  $\phi' = 31^\circ$**
- **coesione  $C = 0.80 \text{ Kg/cm}^2$**

I calcoli eseguiti nella sezione verificata, confrontate con il coefficiente di sicurezza suggerito dalle vigenti NTC 2008, indicano che il versante allo stato attuale, come anche riscontrato dai rilievi effettuati in campagna, si trova in frana in quanto i valori dei coefficienti di sicurezza minimi ottenuti sono minori a ( $R_2$ )  $\gamma_R = 1.10$  (NTC 2008):

VERIFICA DI STABILITÀ ALLO STATO ATTUALE		
Sezione analizzata	$F_s$ minimo ottenuto	$\gamma_R = 1.10$ (NTC 2008)
<b>A</b>	<b>1.59</b>	

## STATO ATTUALE

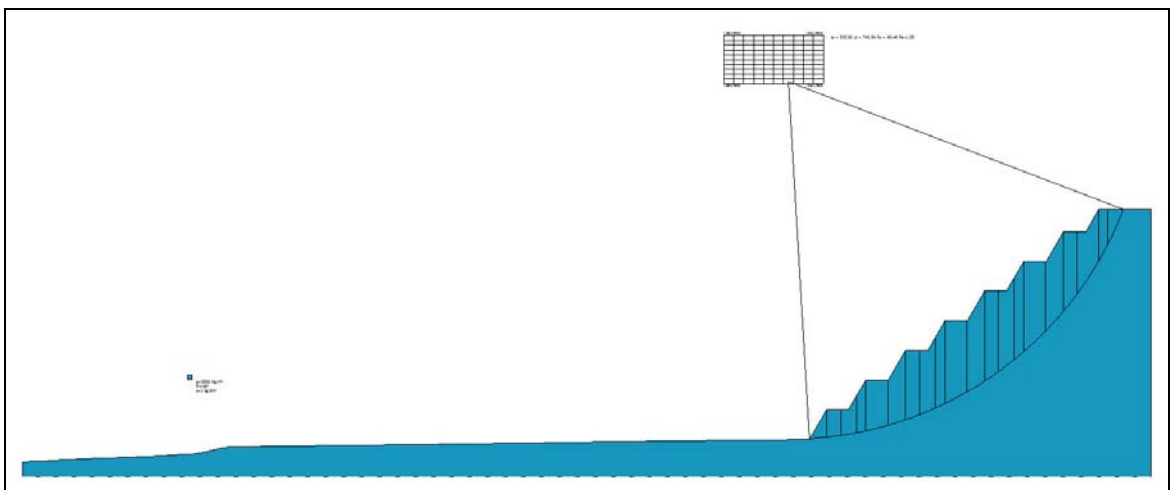


Successivamente si è proceduto all'analisi della stabilità del pendio alla fine dei lavori di escavazione.

I calcoli eseguiti in corrispondenza della sezione allo stato di lavori ultimati con gli interventi definitivi, confrontate con il coefficiente di sicurezza suggerito dalle vigenti NTC 2008, evidenziano un netto miglioramento della stabilità del pendio, come si può notare dalla tabella qui di seguito, i valori dei coefficienti di sicurezza minimi ottenuti sono sempre maggiori di 1.10 (NTC 2008):

VERIFICA DI STABILITÀ ALLO STATO DI PROGETTO		
Sezione analizzata	$F_s$ minimo ottenuto	$\gamma_R = 1.10$ (NTC 2008)
<b>A-</b>	<b>1.36</b>	

## STATO FINALE



Siena, 13 giugno 2011

GEOSOL s.r.l.  
Dott. Geol. Mauro Cartocci



---

## RELAZIONE DI CALCOLO

### Definizione

Per pendio s'intende una porzione di versante naturale il cui profilo originario è stato modificato da interventi artificiali rilevanti rispetto alla stabilità. Per frana s'intende una situazione di instabilità che interessa versanti naturali e coinvolgono volumi considerevoli di terreno.

### Introduzione all'analisi di stabilità

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase, che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio notevolmente complicata. Inoltre è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, in quanto i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni, sono anisotropi ed inoltre il loro comportamento dipende non solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale. A causa delle suddette difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

(a) Si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesione ( $c$ ) e angolo di resistenza al taglio ( $j$ ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

(b) In alcuni casi vengono soddisfatte solo in parte le equazioni di equilibrio.

### Metodo equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio ( $t$ ) e confrontate con la resistenza disponibile ( $t_f$ ), valutata secondo il criterio di rottura di *Coulomb*, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza  $F = t_f / t$ .

Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (*Culman*), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (*Fellenius, Bishop, Janbu ecc.*).

Di seguito vengono discussi i metodi dell'equilibrio limite dei conci.

### Metodo dei conci

La massa interessata dallo scivolamento viene suddivisa in un numero conveniente di conci. Se il numero dei conci è pari a  $n$ , il problema presenta le seguenti incognite:

$n$  valori delle forze normali  $N_i$  agenti sulla base di ciascun concio;

$n$  valori delle forze di taglio alla base del concio  $T_i$

$(n-1)$  forze normali  $E_i$  agenti sull'interfaccia dei conci;

$(n-1)$  forze tangenziali  $X_i$  agenti sull'interfaccia dei conci;

$n$  valori della coordinata  $a$  che individua il punto di applicazione delle  $E_i$ ;

$(n-1)$  valori della coordinata che individua il punto di applicazione delle  $X_i$ ;

una incognita costituita dal fattore di sicurezza  $F$ .

**Complessivamente le incognite sono  $(6n-2)$ .**

---

mentre le equazioni a disposizione sono:

Equazioni di equilibrio dei momenti  $n$   
Equazioni di equilibrio alla traslazione verticale  $n$   
Equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale  $n$   
Equazioni relative al criterio di rottura  $n$   
Totale numero di equazioni  $4n$

Il problema è staticamente indeterminato ed il grado di indeterminazione è pari a

$$i = (6n-2)-(4n) = 2n-2.$$

Il grado di indeterminazione si riduce ulteriormente a  $(n-2)$  in quando si fa l'assunzione che  $N_j$  sia applicato nel punto medio della striscia, ciò equivale ad ipotizzare che le tensioni normali totali siano uniformemente distribuite.

I diversi metodi che si basano sulla teoria dell'equilibrio limite si differenziano per il modo in cui vengono eliminate le  $(n-2)$  indeterminazioni.

### **Metodo di BISHOP (1955)**

Con tale metodo non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui blocchi e fu il primo a descrivere i problemi legati ai metodi convenzionali.

Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$SF_V = 0$ ,  $SM_0 = 0$ , Criterio di rottura.

$$F = \frac{\sum \{ c_i \times b_i + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i \} \times \frac{\sec \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$

I valori di  $F$  e di  $DX$  per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre  $DX = 0$  ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di **Bishop ordinario**, gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

## **VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA**

Nelle verifiche agli Stati Limite Ultimi la stabilità dei pendii nei confronti dell'azione sismica viene eseguita con il metodo pseudo-statico. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica, nelle verifiche agli stati limite ultimi, vengono considerate le seguenti forze statiche equivalenti:

$$F_H = K_o \cdot W$$

$$F_V = K_v \cdot W$$

Essendo:

$F_H$  e  $F_V$  rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro del concio;

$W$ : peso concio

$K_o$ : Coefficiente sismico orizzontale

$K_v$ : Coefficiente sismico verticale.

---

### Calcolo coefficienti sismici

Le **NTC 2008** calcolano i coefficienti  $K_O$  e  $K_V$  in dipendenza di vari fattori:

$$K_O = \beta_s \times (a_{max}/g)$$

$$K_V = \pm 0,5 \times K_O$$

Con

$\beta_s$  coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$a_{max}$  accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

$g$  accelerazione di gravità.

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa sul sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{max} = S_S S_T a_g$$

$S_S$  (effetto di amplificazione stratigrafica):  $0.90 \leq S_S \leq 1.80$ ; è funzione di  $F_0$  (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E).

$S_T$  (effetto di amplificazione topografica).

Il valore di  $S_T$  varia con il variare delle quattro categorie topografiche introdotte:

$$T1(S_T = 1.0) \quad T2(S_T = 1.20) \quad T3(S_T = 1.20) \quad T4(S_T = 1.40).$$

Questi valori sono calcolati come funzione del punto in cui si trova il sito oggetto di analisi. Il parametro di entrata per il calcolo è il tempo di ritorno dell'evento sismico che è valutato come segue:

$$T_R = -V_R / \ln(1 - PVR)$$

Con  $V_R$  vita di riferimento della costruzione e  $PVR$  probabilità di superamento, nella vita di riferimento, associata allo stato limite considerato. La vita di riferimento dipende dalla vita nominale della costruzione e dalla classe d'uso della costruzione (in linea con quanto previsto al punto 2.4.3 delle NTC). In ogni caso  $V_R$  dovrà essere maggiore o uguale a 35 anni.

Con l'**OPCM 3274** e successive modifiche, i coefficienti sismici orizzontale  $K_O$  e verticale  $K_V$  che interessano tutte le masse vengono calcolati come:

$$K_O = S \cdot (a_g/g) \quad K_V = 0.5 \cdot K_O$$

$S$ : fattore dipendente dal tipo di suolo secondo lo schema:

tipo A -  $S=1$ ;

tipo B -  $S=1.25$ ;

tipo C -  $S=1.25$ ;

tipo E -  $S=1.25$ ;

tipo D -  $S=1.35$ .

Per pendii con inclinazione superiore a  $15^\circ$  e dislivello superiore a 30 m, l'azione sismica deve essere incrementata moltiplicandola per il coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$ :

$S_T \geq 1,2$  per siti in prossimità del ciglio superiore di pendii scoscesi isolati;

$S_T \geq 1,4$  per siti prossimi alla sommità di profili topografici aventi larghezza in testa molto inferiore alla larghezza alla base e pendenza media  $> 30^\circ$ ;  $S_T \geq 1,2$  per siti dello stesso tipo ma pendenza media inferiore.

L'applicazione del **D.M. 88** e successive modifiche ed integrazioni è consentito mediante l'inserimento del coefficiente sismico orizzontale  $K_0$  in funzione delle Categorie Sismiche secondo il seguente schema: I Cat.  $K_0=0.1$ ; II Cat.  $K_0=0.07$ ; III Cat.  $K_0=0.04$

Per l'applicazione dell'**Eurocodice 8** (progettazione geotecnica in campo sismico) il coefficiente sismico orizzontale viene così definito:

$$K_0 = a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S / (g)$$

$a_{gR}$  : accelerazione di picco di riferimento su suolo rigido affiorante,

$\gamma_I$ : fattore di importanza,

S: soil factor e dipende dal tipo di terreno (da A ad E).

$$a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I$$

è la "design ground acceleration on type A ground".

Il coefficiente sismico verticale  $K_V$  è definito in funzione di  $K_0$ , e vale:

$$K_V = \pm 0.5 \cdot K_0$$

### Ricerca della superficie di scorrimento critica

In presenza di mezzi omogenei non si hanno a disposizione metodi per individuare la superficie di scorrimento critica ed occorre esaminarne un numero elevato di potenziali superfici.

Nel caso vengano ipotizzate superfici di forma circolare, la ricerca diventa più semplice, in quanto dopo aver posizionato una maglia dei centri costituita da m righe e n colonne saranno esaminate tutte le superfici aventi per centro il generico nodo della maglia  $m \cdot n$  e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

## STATO ATTUALE

### Analisi di stabilità dei pendii con BISHOP

```
=====
Numero di strati                                     1,0
Numero dei conci                                    20,0
```

#### Superficie di forma circolare

#### Maglia dei Centri

```
=====
Ascissa vertice sinistro inferiore xi                218,8 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi              715,22 m
Ascissa vertice destro superiore xs                 241,37 m
Ordinata vertice destro superiore ys                730,8 m
Passo di ricerca                                    10,0
Numero di celle lungo x                             10,0
Numero di celle lungo y                             10,0
=====
```

### Coefficienti sismici [N.T.C.]

#### Dati generali

```
Descrizione:
Latitudine:           42,97
Longitudine:         11,86
```

Tipo opera: 2 - Opere ordinarie  
 Classe d'uso: Classe II  
 Vita nominale: 50,0 [anni]  
 Vita di riferimento: 50,0 [anni]

#### Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo: A  
 Categoria topografica: T2

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30,0	0,5	2,53	0,25
S.L.D.	50,0	0,62	2,55	0,26
S.L.V.	475,0	1,45	2,48	0,29
S.L.C.	975,0	1,81	2,51	0,29

#### Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,6	0,2	0,0122	0,0061
S.L.D.	0,744	0,2	0,0152	0,0076
S.L.V.	1,74	0,27	0,0479	0,024
S.L.C.	2,172	0,27	0,0598	0,0299

Coefficiente azione sismica orizzontale 0,048  
 Coefficiente azione sismica verticale 0,024

#### Vertici profilo

N	X m	y m
1	0,0	639,01
2	0,0	639,01
3	0,01	639,01
4	0,01	639,01
5	0,02	639,01
6	0,02	639,01
7	0,03	639,01
8	0,04	639,01
9	0,05	639,01
10	0,08	639,02
11	0,1	639,02
12	0,13	639,02
13	0,15	639,02
14	0,23	639,03
15	0,48	639,05
16	0,71	639,07
17	4,64	639,4
18	8,34	639,62
19	12,08	639,84
20	14,38	639,98
21	18,01	640,03
22	23,04	640,11
23	26,53	640,17
24	28,52	640,2
25	32,34	640,3
26	36,16	640,4

---

27	41,88	642,99
28	45,66	644,71
29	55,11	648,25
30	58,01	648,22
31	59,94	648,2
32	61,35	648,18
33	62,75	648,22
34	66,98	650,27
35	89,67	661,23
36	96,66	664,6
37	102,23	667,29
38	105,64	667,46
39	114,34	667,74
40	115,06	666,49
41	115,14	666,28
42	115,77	666,29
43	118,99	666,25
44	121,97	666,19
45	121,97	666,19
46	124,69	666,13
47	126,5	666,13
48	129,23	669,39
49	129,42	669,67
50	130,25	669,68
51	131,08	669,69
52	132,81	669,73
53	133,39	669,75
54	134,54	669,78
55	139,33	666,93
56	142,72	664,93
57	144,12	664,5
58	149,5	662,86
59	153,53	662,66
60	157,55	662,47
61	159,98	662,81
62	162,03	663,1
63	165,52	664,1
64	168,65	665,0
65	171,54	665,82
66	174,87	666,78
67	176,85	667,34
68	178,28	666,88
69	179,53	666,46
70	180,93	666,45
71	182,32	666,43
72	184,28	666,41
73	185,56	666,4
74	187,7	666,38
75	188,6	666,38
76	192,84	666,31
77	196,53	666,27
78	198,8	666,24
79	200,94	666,2
80	202,23	666,2
81	204,77	666,27
82	206,88	666,32
83	208,17	666,35
84	210,1	666,4
85	214,53	666,53
86	218,19	666,63

87	220,81	666,71
88	222,08	666,75
89	222,78	666,77
90	224,36	666,84
91	226,68	666,94
92	228,91	667,03
93	230,06	667,08
94	231,34	667,14
95	235,57	667,32
96	237,84	667,42
97	243,15	676,31
98	248,42	676,59
99	251,04	681,58
100	252,63	684,6
101	253,18	684,61
102	254,29	684,69
103	256,36	684,83
104	257,95	684,93
105	260,02	687,76
106	261,27	689,48
107	262,73	691,49
108	264,01	693,24
109	265,68	693,12
110	267,11	693,12
111	268,94	695,07
112	271,29	697,43
113	273,16	699,22
114	274,03	700,04
115	274,79	700,76
116	276,86	700,93
117	278,89	701,06
118	280,89	704,06
119	281,82	705,46
120	283,08	707,44
121	284,12	707,54
122	285,34	707,72
123	286,56	707,9
124	287,24	708,13

### Stratigrafia

c: coesione; Fi: Angolo di attrito; G: Peso Specifico; Gs: Peso Specifico Saturo; K: Modulo di Winkler

Strato	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	G (Kg/m <sup>3</sup> )	Gs (Kg/m <sup>3</sup> )	K (Kg/cm <sup>3</sup> )	Litologia
1	1	38	2500		0,00	Substrato Calcare

### Risultati analisi pendio

```

=====
Fs minimo individuato                1,59
Ascissa centro superficie             234,6 m
Ordinata centro superficie            715,22 m
Raggio superficie                     47,84 m
=====

```

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio ; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Fi: Angolo di attrito; c: coesione.



**Analisi dei conchi. Superficie...xc = 234,602 yc = 715,223 Rc = 47,837 Fs=1,587**

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	2,17	5,3	2,18	9361,61	449,36	224,68	0,8	32,0	0,0	8099,1	14162,7
2	3,1	8,4	3,13	45058,5	2162,81	1081,4	0,8	32,0	0,0	40834,2	31861,1
3	1,24	11,1	1,26	25006,35	1200,31	600,15	0,8	32,0	0,0	22502,2	15225,1
4	2,17	13,1	2,23	42265,3	2028,73	1014,37	0,8	32,0	0,0	37349,3	25930,1
5	1,86	15,6	1,94	34425,53	1652,43	826,21	0,8	32,0	0,0	29741,1	21468,7
6	2,62	18,4	2,76	60469,48	2902,54	1451,27	0,8	32,0	0,0	52243,4	34479,6
7	2,14	21,5	2,3	68963,62	3310,25	1655,13	0,8	32,0	0,0	60222,8	35296,7
8	2,05	24,2	2,25	67211,06	3226,13	1613,07	0,8	32,0	0,0	58274,6	34294,8
9	1,13	26,3	1,26	35214,95	1690,32	845,16	0,8	32,0	0,0	30250,3	18272,5
10	1,59	28,1	1,81	47157,97	2263,58	1131,79	0,8	32,0	0,0	40151,3	24918,8
11	2,07	30,7	2,41	63497,84	3047,9	1523,95	0,8	32,0	0,0	54017,4	33399,3
12	1,25	33,0	1,49	42256,98	2028,34	1014,17	0,8	32,0	0,0	36237,5	21786,4
13	1,46	35,0	1,78	52884,52	2538,46	1269,23	0,8	32,0	0,0	45668,1	26974,6
14	1,27	37,0	1,59	48910,04	2347,68	1173,84	0,8	32,0	0,0	42555,3	24795,0
15	4,93	41,9	6,63	167369,9	8033,75	4016,88	0,8	32,0	0,0	144006,8	90118,5
16	4,22	49,8	6,54	136683,5	6560,81	3280,4	0,8	32,0	0,0	117840,5	79366,9
17	1,63	55,4	2,87	48592,71	2332,45	1166,23	0,8	32,0	0,0	41133,7	30668,9
18	2,12	59,7	4,19	52161,87	2503,77	1251,89	0,8	32,0	0,0	40147,1	36941,2
19	1,98	65,0	4,68	30254,25	1452,2	726,1	0,8	32,0	0,0	11395,3	28068,9
20	2,36	72,5	7,82	14615,24	701,53	350,77	0,8	32,0	0,0	-33973,2	26057,9

## STATO FINALE

### Analisi di stabilità dei pendii con BISHOP

=====

Numero di strati 1,0  
 Numero dei conchi 20,0

#### Superficie di forma circolare

=====

### Maglia dei Centri

=====

Ascissa vertice sinistro inferiore xi 188,43 m  
 Ordinata vertice sinistro inferiore yi 739,89 m  
 Ascissa vertice destro superiore xs 215,15 m  
 Ordinata vertice destro superiore ys 752,85 m  
 Passo di ricerca 10,0  
 Numero di celle lungo x 10,0  
 Numero di celle lungo y 10,0

=====

### Coefficienti sismici [N.T.C.]

=====

#### Dati generali

Descrizione:  
 Latitudine: 42,97  
 Longitudine: 11,86  
 Tipo opera: 2 - Opere ordinarie  
 Classe d'uso: Classe II  
 Vita nominale: 50,0 [anni]  
 Vita di riferimento: 50,0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:

A

Categoria topografica:

T2

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30,0	0,5	2,53	0,25
S.L.D.	50,0	0,62	2,55	0,26
S.L.V.	475,0	1,45	2,48	0,29
S.L.C.	975,0	1,81	2,51	0,29

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera:

Stabilità dei pendii

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,6	0,2	0,0122	0,0061
S.L.D.	0,744	0,2	0,0152	0,0076
S.L.V.	1,74	0,27	0,0479	0,024
S.L.C.	2,172	0,27	0,0598	0,0299

Coefficiente azione sismica orizzontale

0,048

Coefficiente azione sismica verticale

0,024

**Vertici profilo**

N	X m	y m
1	0,03	638,0
2	0,08	638,0
3	0,12	638,01
4	0,15	638,01
5	0,19	638,01
6	0,26	638,01
7	0,35	638,02
8	0,43	638,02
9	0,52	638,02
10	1,15	638,05
11	2,11	638,09
12	2,77	638,12
13	3,75	638,17
14	5,38	638,24
15	8,03	638,35
16	11,63	638,51
17	17,21	638,76
18	19,66	638,86
19	22,74	639,0
20	33,21	639,46
21	37,38	639,64
22	43,16	639,9
23	45,47	640,0
24	48,72	640,64
25	53,08	641,5
26	55,61	642,0
27	55,87	642,0
28	56,94	642,02
29	58,27	642,03
30	60,45	642,06
31	67,46	642,15
32	89,91	642,44

33	133,48	643,0
34	159,38	643,33
35	191,52	643,75
36	199,5	643,85
37	211,34	644,0
38	215,96	652,0
39	221,96	652,0
40	226,58	660,0
41	232,58	660,0
42	237,2	668,0
43	243,2	668,0
44	247,82	676,0
45	253,82	676,0
46	258,44	684,0
47	264,44	684,0
48	269,06	692,0
49	275,06	692,0
50	279,67	700,0
51	285,67	700,0
52	289,14	706,0
53	303,19	706,0

### Stratigrafia

c: coesione; Fi: Angolo di attrito; G: Peso Specifico; Gs: Peso Specifico Saturo; K: Modulo di Winkler

Strato	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	G (Kg/m <sup>3</sup> )	Gs (Kg/m <sup>3</sup> )	K (Kg/cm <sup>3</sup> )	Litologia
1	1	38	2500		0,00	

### Risultati analisi pendio

=====

Fs minimo individuato 1,36  
 Ascissa centro superficie 205,8 m  
 Ordinata centro superficie 740,54 m  
 Raggio superficie 96,46 m

=====

### Analisi dei conci. Superficie...xc = 205,797 yc = 740,537 Rc = 96,456 Fs=1,359

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	4,48	4,7	4,49	41597,47	1996,68	998,34	0,8	32,0	0,0	38111,7	43968,5
2	3,96	7,2	3,99	70817,48	3399,24	1699,62	0,8	32,0	0,0	64629,7	53228,8
3	4,22	9,7	4,28	70293,28	3374,08	1687,04	0,8	32,0	0,0	62126,9	53767,1
4	2,44	11,7	2,49	71995,31	3455,78	1727,89	0,8	32,0	0,0	64356,6	44268,2
5	6,0	14,3	6,19	194024,7	9313,19	4656,59	0,8	32,0	0,0	170927,7	115041,8
6	4,62	17,6	4,85	178263,6	8556,66	4278,33	0,8	32,0	0,0	155335,1	99984,7
7	3,81	20,2	4,06	171507,5	8232,36	4116,18	0,8	32,0	0,0	148765,5	92347,8
8	4,22	22,8	4,58	173003,2	8304,15	4152,08	0,8	32,0	0,0	147788,2	94904,1
9	2,59	25,0	2,85	133591,5	6412,39	3206,2	0,8	32,0	0,0	114925,2	69655,5
10	5,85	27,8	6,61	304315,5	14607,14	7303,57	0,8	32,0	0,0	260364,0	158677,7
11	4,77	31,4	5,59	258272,1	12397,06	6198,53	0,8	32,0	0,0	220580,0	134346,9
12	3,67	34,4	4,45	211479,3	10151,01	5075,5	0,8	32,0	0,0	181293,3	109549,4
13	4,22	37,3	5,3	213193,3	10233,28	5116,64	0,8	32,0	0,0	180858,4	114395,5
14	2,73	39,9	3,56	157661,3	7567,74	3783,87	0,8	32,0	0,0	135772,1	83425,9
15	5,7	43,3	7,84	309373,5	14849,93	7424,97	0,8	32,0	0,0	266238,9	168597,9
16	4,91	47,8	7,31	245731,3	11795,15	5897,55	0,8	32,0	0,0	211264,2	140171,0
17	3,53	51,7	5,69	170544,5	8186,14	4093,07	0,8	32,0	0,0	147048,5	101153,6
18	5,94	56,6	10,78	202731,4	9731,11	4865,55	0,8	32,0	0,0	160230,2	137150,6
19	2,5	61,3	5,21	73764,31	3540,69	1770,34	0,8	32,0	0,0	53059,0	55054,8
20	4,22	65,9	10,35	53408,23	2563,6	1281,8	0,8	32,0	0,0	-2684,8	59686,9