



COMUNE DI
ALESSANDRIA DELLA ROCCA

"LAVORI DI COMPLETAMENTO DEGLI IMPIANTI
SPORTIVI IN ZONA DI ESPANSIONE NEL
COMUNE DI ALESSANDRIA DELLA ROCCA"

PROGETTO DEFINITIVO-ESECUTIVO

VERIFICA DEL MURO SZ CON SPINTA RIDOTTA

RTP

Architetto Vito Garbo
Architetto Paolo Pettene
Architetto Giancarlo Fischetti
Ingegnere Salvatore Barone
Architetto Ignazia Grimaudo
Ingegnere Gaetano Barresi
Architetto Giuseppe Barca
Ingegnere Giuseppe Lo Faro
Architetto Enrico Accardo
Geologo Gaspare Motisi

TAV. S 11

DATA

IL RUP

1- Descrizione intervento

La presente relazione tratta la verifica del muro di sostegno del tratto S-Z realizzato nell'ambito dell'intervento di cui al "Progetto per la costruzione degli impianti sportivi in zona di espansione, nel Comune di Alessandria della Rocca" di cui all'Autorizzazione dell'Ufficio del Genio Civile di Agrigento n. 46210 del 02.07.2002.

Stando alle informazioni in possesso dello scrivente, la realizzazione delle opere di sostegno di cui alla citata autorizzazione è avvenuta tra il 23.06.2004 e il 20.04.2006.

Il collaudatore statico delle opere, nominato con Determinazione Sindacale n. 32 del 11.09.2008, Ing. Accursio Pippo Oliveri nella relazione di collaudo riportava *"Alla data di sospensione del 20-04-2006 i lavori realizzati consistevano nello sbancamento generale dell'area, nella creazione dei terrazzamenti di progetto, nella demolizione di un banco di roccia, nella realizzazione dei pali di fondazione delle tipologie di muri di sostegno con fondazioni indirette, nella realizzazione dei muri di sostegno sia con fondazioni dirette che indirette."*

Il collaudatore Ing. Oliveri, durante l'esecuzione delle operazioni di collaudo ha disposto, tra l'altro, prelievi sulle strutture realizzate e prove di carico su pali. Tralasciando tutte l'iter che ha portato a un contenzioso tra il Comune di Alessandria della Rocca e la Consortile Alessandria srl, in estrema sintesi le operazioni di collaudo hanno evidenziato l'inaccettabilità ai fini strutturali del calcestruzzo dei pali di fondazione dei muri del tratto in questione SZ, oltre che dei pali del tratto DO. Tale circostanza ha determinato la non collaudabilità delle opere realizzate.

La copia degli esecutivi e della relazione di calcolo, forniti dall'Ufficio Tecnico del Comune di Alessandria della Rocca e allegati alla citata autorizzazione, riportano per il tratto SZ in esame un muro della tipologia "MURO 6" avente altezza $H=4,00$ m e fondazione profonda su pali di diametro pari a 500 mm disposti a quinconce, con interasse longitudinale pari a 260 cm e interasse trasversale di 130 cm.

In questa sede si avanza una proposta per il recupero dell'opera di sostegno trattata. Il muro di sostegno SZ è interno al lotto su cui dovranno sorgere gli impianti sportivi, ed è possibile, oltre che compatibile con la funzionalità dell'opera da realizzare, adottare una sistemazione del lotto tale che il terrapieno a monte del lotto abbia altezza massima pari a 250 cm.

In questo modo si riduce sensibilmente la spinta del terreno sul muro. La spinta risultante è tale da poter considerare il muro verificato anche in assenza dei pali di fondazione, il cui calcestruzzo è stato giudicato non accettabile per fini strutturali.

La verifica del muro, coerentemente con i calcoli allegati all'autorizzazione n. 46210 del 02.07.2002 e riguardanti anche il resto dei muri realizzati, viene condotta ai sensi delle Norme tecniche di cui al D.M. 16.01.96. Tali norme è risaputo che risultano oggi superate, ma sono quelle a suo tempo adottate per il progetto

dell'opera in questione. Si ritiene opportuno e condivisibile riferirsi al D.M. 1996 in ragione del fatto che non si prevede di realizzare interventi di consolidamento sull'opera in questione (tiranti, adeguamento delle sezioni resistenti, ecc), ma soltanto la riduzione delle azioni su di essa agenti.

Si riporta nel seguito la verifica dell'opera in questione.

Ai fini della verifica dell'opera si sono assunti i seguenti parametri geotecnici sia per il terreno a monte del muro, che per il terreno interessato dallo scarico in fondazione

Peso dell'unità di volume $\gamma = 17.0 \text{ KN/m}^3$;

coesione drenata $c' = 0.00$

angolo di resistenza a taglio $\phi' = 23^\circ$

Tali parametri sono stati ricavati come valori medi dei parametri geomeccanici riportati nello studio geologico relativamente allo strato superficiale di terreno avente caratteristico peggiori.

Sollecitazioni muro

Per il calcolo delle sollecitazioni il muro è stato discretizzato in *n*-tratti in funzione delle sezioni significative e per ogni tratto sono state calcolate le spinte del terreno (valutate secondo un piano di rottura passante per il paramento lato monte), le risultanti delle forze orizzontali e verticali e le forze inerziali.

Calcolo delle spinte per le verifiche globali

Le spinte sono state valutate ipotizzando un piano di rottura passante per l'estradosso della mensola di fondazione lato monte, tale piano è stato discretizzato in *n*-tratti.

Convenzione segni

Forze verticali	positive se dirette dall'alto verso il basso;
Forze orizzontali	positive se dirette da monte verso valle;
Coppie	positive se antiorarie;
Angoli	positivi se antiorari.

Dati generali

Codice progetto	010
Descrizione	Muro SZ
Comune di	Alessandria della Rocca
Tecnico	Gaetano Barresi
Data	21/10/2019
Condizioni ambientali	Ordinarie
Lat./Long. [WGS84]	37,559397/13,455892
Normativa GEO	D.M. 1996 (T.A.)
Normativa STR	D.M. 1996
Spinta	Mononobe e Okabe [M.O. 1929]

Dati generali muro

Altezza muro	250,0 cm
Spessore testa muro	12,0 cm
Risega muro lato valle	0,0 cm
Risega muro lato monte	0,0 cm
Sporgenza mensola a valle	110,0 cm
Sporgenza mensola a monte	107,0 cm
Svaso mensola a valle	0,0 cm
Svaso mensola a valle	0,0 cm
Altezza estremità mensola a valle	80,0 cm
Altezza estremità mensola a monte	80,0 cm

Stratigrafia

DH	Spessore strato
Eps	Inclinazione dello strato.
Gamma	Peso unità di volume
Fi	Angolo di resistenza a taglio
c	Coesione
Delta	Angolo di attrito terra muro
P.F.	Presenza di falda (Si/No)

Ns	DH (cm)	Eps (°)	Gamma (KN/m ³)	Fi (°)	c (kPa)	Delta (°)	P.F.	Litologia	Descrizione
1	330	0	17,00	23	0,00	14	No		

2	1000	0	17,00	23	0,00	14	No		Argilla o argilla limosa molle
---	------	---	-------	----	------	----	----	--	-----------------------------------

FATTORI DI COMBINAZIONE

Combinazione Nr. 1

Nr.	Azioni	Fattore combinazione
1	Peso muro	1,00
2	Spinta terreno	1,00
3	Peso terreno mensola	1,00
4	Spinta falda	1,00
5	Spinta sismica in x	1,00
6	Spinta sismica in y	1,00

Nr.	Parametro	Coefficienti parziali
1	Tangente angolo res. taglio	1
2	Coesione efficace	1
3	Resistenza non drenata	1
4	Peso unità volume	1

Nr.	Verifica	Coefficienti resistenze
1	Carico limite	1
2	Scorrimento	1
3	Partecipazione spinta passiva	1

Combinazione Nr. 1 [GEO+STR]

CALCOLO SPINTE

Discretizzazione terreno

Qi	Quota iniziale strato (cm);
Qf	Quota finale strato
Gamma	Peso unità di volume (KN/m ³);
Eps	Inclinazione dello strato. (°);
Fi	Angolo di resistenza a taglio (°);
Delta	Angolo attrito terra muro;
c	Coesione (kPa);
β	Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
Note	Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
330,0	280,36	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	353,0	
280,36	230,71	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	353,0	
230,71	181,07	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	353,0	
181,07	163,33	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	353,0	
163,33	131,42	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	353,0	
131,42	80,0	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	353,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ	Angolo di direzione della spinta.
Ka	Coefficiente di spinta attiva.
Kd	Coefficiente di spinta dinamica.

Dk Coefficiente di incremento dinamico.
 Kax, Kay Componenti secondo x e y del coefficiente di spinta attiva.
 Dkx, Dky Componenti secondo x e y del coefficiente di incremento dinamico.

μ	Ka	Kd	Dk	Kax	Kay	Dkx	Dky
7,0	0,35	0,0	0,0	0,34	0,04	0,0	0,0
7,0	0,35	0,0	0,0	0,34	0,04	0,0	0,0
7,0	0,35	0,0	0,0	0,34	0,04	0,0	0,0
7,0	0,35	0,0	0,0	0,34	0,04	0,0	0,0
7,0	0,35	0,0	0,0	0,34	0,04	0,0	0,0
7,0	0,35	0,0	0,0	0,34	0,04	0,0	0,0

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi Quota inizio strato.
 Qf Quota inizio strato.
 Rpx, Rpy Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
 Z(Rpx) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
 Z(Rpy) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	330,0	280,36	0,72	0,09	296,9	296,9
2	280,36	230,71	2,16	0,27	252,78	252,78
3	230,71	181,07	3,6	0,44	204,24	204,24
4	181,07	163,33	1,63	0,2	172,03	172,03
5	163,33	131,42	3,4	0,42	146,91	146,91
6	131,42	80,0	6,74	0,83	104,73	104,73

CARATTERISTICHE MURO (Peso, Baricentro, Inerzi a)

Py Peso del muro (kN);
 Px Forza inerziale (kN);
 Xp, Yp Coordinate baricentro dei pesi (cm);

Quota	Px	Py	Xp	Yp
280,36	0,0	1,47	143,0	305,2
230,71	0,0	2,92	140,0	280,4
181,07	0,0	4,39	137,1	255,5
163,33	0,0	4,9	136,0	246,7
131,42	0,0	5,83	134,1	230,8
80,0	0,0	7,35	131,0	205,0

Sollecitazioni sul muro

Quota Origine ordinata minima del muro (cm).
 Fx Forza in direzione x (kN);
 Fy Forza in direzione y (kN);
 M Momento (kNm);
 H Altezza sezione di calcolo (cm);

Quota	Fx	Fy	M	H
280,36	0,72	1,56	0,07	21,47
230,71	2,88	3,27	0,75	34,98

181,07	6,48	5,18	2,75	48,4
163,33	8,11	5,9	3,93	53,06
131,42	11,52	11,18	5,02	61,33
80,0	18,25	13,53	11,88	74,43

Tensioni - Armature parete (T.A .)

Afv	Area dei ferri lato valle.
Afm	Area dei ferri lato monte.
σ_c	Tensione calcestruzzo (N/mm ²);
σ_{ft}	Tensione acciaio teso (N/mm ²);
σ_{fc}	Tensione acciaio compresso (N/mm ²);
τ	Tensione tangenziale (N/mm ²);

Afv	Afm	σ_c	σ_{ft}	σ_{fc}	τ
12Ø10 (9,42)	12Ø10 (9,42)	0,01	0,01	0,19	0,0
12Ø10 (9,42)	12Ø10 (9,42)	0,05	1,13	0,71	0,01
12Ø10 (9,42)	12Ø10 (9,42)	0,11	4,23	1,52	0,02
12Ø10 (9,42)	12Ø10 (9,42)	0,14	5,83	1,88	0,02
12Ø10 (9,42)	12Ø10 (9,42)	0,14	4,41	1,94	0,02
12Ø10 (9,42)	12Ø10 (9,42)	0,25	11,85	3,39	0,03

VERIFICHE GLOBALI

Piano di rottura passante per (xr1,yr1) = (229,0/0,0)

Piano di rottura passante per (xr2,yr2) = (229,0/330,0)

Centro di rotazione (xro,yro) = (0,0/0,0)

Discretizzazione terreno

Qi	Quota iniziale strato (cm);
Qf	Quota finale strato
Gamma	Peso unità di volume (KN/m ³);
Eps	Inclinazione dello strato. (°);
Fi	Angolo di resistenza a taglio (°);
Delta	Angolo attrito terra muro;
c	Coesione (kPa);
β	Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
Note	Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
330,0	280,36	17,0	0,0	23,0	23,0	0,0	0,0	
280,36	230,71	17,0	0,0	23,0	23,0	0,0	0,0	
230,71	181,07	17,0	0,0	23,0	23,0	0,0	0,0	
181,07	131,42	17,0	0,0	23,0	23,0	0,0	0,0	
131,42	80,0	17,0	0,0	23,0	23,0	0,0	0,0	
80,0	1,0	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	0,0	
1,0	0,0	17,0	0,0	23,0	14,0	0,0	0,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ	Angolo di direzione della spinta.
Ka	Coefficiente di spinta attiva.
Kd	Coefficiente di spinta dinamica.

Dk Coefficiente di incremento dinamico.
 Kax, Kay Componenti secondo x e y del coefficiente di spinta attiva.
 Dkx, Dky Componenti secondo x e y del coefficiente di incremento dinamico.

μ	Ka	Kd	Dk	Kax	Kay	Dkx	Dky
23,0	0,38	0,0	0,0	0,35	0,15	0,0	0,0
23,0	0,38	0,0	0,0	0,35	0,15	0,0	0,0
23,0	0,38	0,0	0,0	0,35	0,15	0,0	0,0
23,0	0,38	0,0	0,0	0,35	0,15	0,0	0,0
23,0	0,38	0,0	0,0	0,35	0,15	0,0	0,0
14,0	0,39	0,0	0,0	0,38	0,09	0,0	0,0
14,0	0,39	0,0	0,0	0,38	0,09	0,0	0,0

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi Quota inizio strato.
 Qf Quota inizio strato.
 Rpx, Rpy Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
 Z(Rpx) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
 Z(Rpy) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	330,0	280,36	0,74	0,31	296,9	296,9
2	280,36	230,71	2,21	0,94	252,78	252,78
3	230,71	181,07	3,68	1,56	204,24	204,24
4	181,07	131,42	5,15	2,19	155,06	155,06
5	131,42	80,0	6,89	2,93	104,73	104,73
6	80,0	1,0	13,82	5,51	38,58	39,3
7	1,0	0,0	0,2	0,08	0,5	0,5

SPINTE IN FONDAZIONE

Discretizzazione terreno

Qi Quota iniziale strato (cm);
 Qf Quota finale strato
 Gamma Peso unità di volume (KN/m³);
 Eps Inclinazione dello strato. (°);
 Fi Angolo di resistenza a taglio (°);
 Delta Angolo attrito terra muro;
 c Coesione (kPa);
 β Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
 Note Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
80,0	0,0	17,0	180,0	23,0	14,0	0,0	180,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ Angolo di direzione della spinta.
 Kp Coefficiente di resistenza passiva.
 Kpx, Kpy Componenti secondo x e y del coefficiente di resistenza passiva.

μ	Kp	Kpx	Kpy

194,0 0,68 -0,66 -0,17

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi Quota inizio strato.
 Qf Quota inizio strato.
 Rpx, Rpy Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
 Z(Rpx) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
 Z(Rpy) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	80,0	0,0	-3,61	-0,9	26,67	26,67

Sollecitazioni total i

Fx Forza in direzione x (kN);
 Fy Forza in direzione y (kN);
 M Momento (kNm);

	Fx	Fy	M
Spinta terreno	32,7	13,52	4,88
Carichi esterni	0,0	3,93	-6,6
Peso muro	0,0	7,35	-9,64
Peso fondazione	0,0	44,91	-51,43
Sovraccarico	0,0	0,0	0,0
Terr. fondazione	0,0	39,1	-71,4
Spinte fondazione	-3,61	-0,9	-0,96
	29,08	107,92	-135,14

Momento stabilizzante -170,01 kNm
 Momento ribaltante 34,87 kNm

Verifica alla traslazione

Sommatoria forze orizzontali 32,7 kN
 Sommatoria forze verticali 108,82 kN
 Coefficiente di attrito 0,42
 Adesione 0,0 kPa
 Angolo piano di scorrimento -360,0 °
 Forze normali al piano di scorrimento 108,82 kN
 Forze parall. al piano di scorrimento 32,7 kN
 Resistenza terreno 49,8 kN
Coeff. sicurezza traslazione Csd **1,52**
Traslazione verificata Csd>1,5

Verifica al ribaltamento

Momento stabilizzante -170,01 kNm
 Momento ribaltante 34,87 kNm
Coeff. sicurezza ribaltamento Csv **4,88**
Muro verificato a ribaltamento Csv>1,3

Carico limite - Metodo di Vesic (1973)

Somma forze in direzione x	29,08 kN
Somma forze in direzione y (Fy)	107,92 kN
Somma momenti	-135,14 kNm
Larghezza fondazione	229,0 cm
Lunghezza	1000,0 cm
Eccentricità su B	10,72 cm
Peso unità di volume	17,0 KN/m ³
Angolo di resistenza al taglio	23,0 °
Coesione	0,0 kPa
Terreno sulla fondazione	80,0 cm
Peso terreno sul piano di posa	17,0 KN/m ³
Nq	8,66
Nc	18,05
Ng	8,2
Fattori di forma	
sq	1,09
sc	1,1
sg	0,92
Inclinazione carichi	
iq	0,56
ic	0,51
ig	0,41
Inclinazione valle	
gq	1,0
gc	0,0
gg	1,0
Carico limite verticale (Qlim)	263,15 kN
Fattore sicurezza (Csq=Qlim/Fy)	2,44
Carico limite verificato Csq>2	

Tensioni sul terreno

Ascissa centro sollecitazione	125,22 cm
Larghezza della fondazione	229,0 cm
x = 0,0 cm Tensione...	33,89 kPa
x = 229,0 cm Tensione...	60,36 kPa

MENSOLA A VALLE

Xprogr.	Ascissa progressiva (cm);
Fx	Forza in direzione x (kN);
Fy	Forza in direzione y (kN);
M	Momento (kNm);
H	Altezza sezione (cm);

Xprogr.	Fx	Fy	M	H
110,0	-3,61	-23,59	-11,71	80,0

Armature - Tensio ni

Afi	Area dei ferri inferiori.
Afs	Area dei ferri superiori.

σ_c Tensione calcestruzzo (N/mm²);
 σ_{ft} Tensione acciaio teso (N/mm²);
 σ_{fc} Tensione acciaio compresso (N/mm²);
 τ Tensione tangenziale (N/mm²);

Afi	Afs	σ_c	σ_{ft}	σ_{fc}	τ
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,24	17,78	2,78	0,03

MENSOLA A MONTE

$X_{progr.}$ Ascissa progressiva (cm);
 F_x Forza in direzione x (kN);
 F_y Forza in direzione y (kN);
 M Momento (kNm);
 H Altezza sezione (cm);

$X_{progr.}$	F_x	F_y	M	H
122,0	0,2	25,95	-19,7	80,0
128,17	0,2	25,07	-18,12	80,0
134,13	0,2	24,31	-16,62	80,0
140,0	0,2	23,59	-15,25	80,0
140,09	0,2	23,55	-15,21	80,0
146,04	0,2	22,9	-13,85	80,0
152,0	0,2	22,25	-12,5	80,0
167,67	0,2	16,75	-9,15	80,0

Armature - Tensioni (T.A.)

A_{fi} Area dei ferri inferiori.
 A_{fs} Area dei ferri superiori.
 σ_c Tensione calcestruzzo (N/mm²);
 σ_{ft} Tensione acciaio teso (N/mm²);
 σ_{fc} Tensione acciaio compresso (N/mm²);
 τ Tensione tangenziale (N/mm²);

Afi	Afs	σ_c	σ_{ft}	σ_{fc}	τ
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,4	33,57	4,44	0,04
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,37	30,89	4,08	0,04
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,34	28,34	3,75	0,04
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,31	26,01	3,44	0,03
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,31	25,95	3,43	0,03
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,28	23,63	3,12	0,03
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,25	21,35	2,82	0,03
4Ø16 (8,04)	4Ø16 (8,04)	0,19	15,66	2,06	0,02

VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE

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 (φ), 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 (τ) e confrontate con la resistenza disponibile (τ_f), valutata secondo il criterio di rottura di *Coulomb*, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza $F = \tau_f / \tau$.

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_i 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 FELLENIUS (1927)

Con questo metodo (valido solo per superfici di scorrimento di forma circolare) vengono trascurate le forze di interstriscia pertanto le incognite si riducono a:

n valori delle forze normali N_i ;
 n valori delle forze da taglio T_i ;
 1 fattore di sicurezza.
 Incognite $(2n+1)$

Le equazioni a disposizione sono:

n equazioni di equilibrio alla traslazione verticale;
 n equazioni relative al criterio di rottura;
 1 equazione di equilibrio dei momenti globale.

$$F = \frac{\sum \{ c_i \times l_i + (W_i \times \cos \alpha_i - u_i \times l_i) \times \tan \varphi_i \}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$

Questa equazione è semplice da risolvere ma si è trovato che fornisce risultati conservativi (fattori di sicurezza bassi) soprattutto per superfici profonde.

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:

$\Sigma F_V = 0$, $\Sigma M_0 = 0$, Criterio di rottura.

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

I valori di F e di ΔX per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre $\Delta X = 0$ 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 %.

Metodo di JANBU (1967)

Janbu estese il metodo di *Bishop* a superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio) a tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

$$F = \frac{\Sigma \{ c_i \times b_i + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i \} \times \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\Sigma W_i \times \tan \alpha_i}$$

Assumendo $\Delta X_i = 0$ si ottiene il metodo ordinario.

Janbu propose inoltre un metodo per la correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente:

$$F_{\text{corretto}} = f_0 F$$

dove f_0 è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici.

Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.

Metodo di BELL (1968)

Le forze agenti sul corpo che scivola includono il peso effettivo del terreno, W , le forze sismiche pseudostatiche orizzontali e verticali $K_x W$ e $K_z W$, le forze orizzontali e verticali X e Z applicate esternamente al profilo del pendio, infine, la risultante degli sforzi totali normali e di taglio σ e τ agenti sulla superficie potenziale di scivolamento.

Lo sforzo totale normale può includere un eccesso di pressione dei pori u che deve essere specificata con l'introduzione dei parametri di forza efficace.

In pratica questo metodo può essere considerato come un'estensione del metodo del cerchio di attrito per sezioni omogenee precedentemente descritto da *Taylor*.

In accordo con la legge della resistenza di *Mohr-Coulomb* in termini di tensione efficace, la forza di taglio agente sulla base dell' i -esimo concio è data da:

$$T_i = \frac{c_i L_i + (N_i - u_{ci} L_i) \tan \phi_i}{F}$$

in cui

F = il fattore di sicurezza;

c_i = la coesione efficace (o totale) alla base dell' i -esimo concio;

ϕ_i = l'angolo di attrito efficace (= 0 con la coesione totale) alla base dell' i -esimo concio;

L_i = la lunghezza della base dell' i -esimo concio;

u_{ci} = la pressione dei pori al centro della base dell' i -esimo concio.

L'equilibrio risulta uguagliando a zero la somma delle forze orizzontali, la somma delle forze verticali e la somma dei momenti rispetto all'origine.

Viene adottata la seguente assunzione sulla variazione della tensione normale agente sulla potenziale superficie di scorrimento:

$$\sigma_{ci} = \left[C_1 (1 - K_z) \frac{W_i \cos \alpha_i}{L_i} \right] + C_2 f(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$$

in cui il primo termine dell'equazione include l'espressione:

$W_i \cos \alpha_i / L_i$ = valore dello sforzo normale totale associato con il metodo ordinario dei conci.

Il secondo termine dell'equazione include la funzione:

$$f = \sin 2\pi \left(\frac{x_n - x_{ci}}{x_n - x_0} \right)$$

Dove x_0 ed x_n sono rispettivamente le ascisse del primo e dell'ultimo punto della superficie di scorrimento, mentre x_{ci} rappresenta l'ascissa del punto medio della base del concio i -esimo.

Una parte sensibile di riduzione del peso associata con una accelerazione verticale del terreno K_z g può essere trasmessa direttamente alla base e ciò è incluso nel fattore $(1 - K_z)$.

Lo sforzo normale totale alla base di un concio è dato da:

$$N_i = \sigma_{ci} L_i$$

La soluzione delle equazioni di equilibrio si ricava risolvendo un sistema lineare di tre equazioni ottenute moltiplicando le equazioni di equilibrio per il fattore di sicurezza F , sostituendo l'espressione di N_i e moltiplicando ciascun termine della coesione per un coefficiente arbitrario C_3 .

Si assume una relazione di linearità tra detto coefficiente, determinabile tramite la regola di Cramer, ed il fattore di sicurezza F . Il corretto valore di F può essere ottenuto dalla formula di interpolazione lineare:

$$F = F(2) + \left(\frac{1 - C_3(2)}{C_3(2) - C_3(1)} \right) (F(2) - F(1))$$

dove i numeri in parentesi (1) e (2) indicano i valori iniziale e successivo dei parametri F e C_3 .

Qualsiasi coppia di valori del fattore di sicurezza nell'intorno di una stima fisicamente ragionevole può essere usata per iniziare una soluzione iterativa.

Il numero necessario di iterazioni dipende sia dalla stima iniziale sia dalla desiderata precisione della soluzione; normalmente, il processo converge rapidamente.

Metodo di SARMA (1973)

Il metodo di **Sarma** è un semplice, ma accurato metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, che permette di determinare l'accelerazione sismica orizzontale richiesta affinché l'ammasso di terreno, delimitato dalla superficie di scivolamento e dal profilo topografico, raggiunga lo stato di equilibrio limite (accelerazione critica Kc) e, nello stesso tempo, consente di ricavare l'usuale fattore di sicurezza ottenuto come per gli altri metodi più comuni della geotecnica.

Si tratta di un metodo basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in n strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale N_i agisce nel punto medio della base della striscia.

Le equazioni da prendere in considerazione sono:

L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;

L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;

L'equazione di equilibrio dei momenti.

Condizioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale:

$$\begin{aligned} N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i &= W_i - \Delta X_i \\ T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i &= KW_i + \Delta E_i \end{aligned}$$

Viene, inoltre, assunto che in assenza di forze esterne sulla superficie libera dell'ammasso si ha:

$$\begin{aligned} \sum \Delta E_i &= 0 \\ \sum \Delta X_i &= 0 \end{aligned}$$

dove E_i e X_i rappresentano, rispettivamente, le forze orizzontale e verticale sulla faccia i -esima del concio generico i .

L'equazione di equilibrio dei momenti viene scritta scegliendo come punto di riferimento il baricentro dell'intero ammasso; sicché, dopo aver eseguito una serie di posizioni e trasformazioni trigonometriche ed algebriche, nel metodo di **Sarma** la soluzione del problema passa attraverso la risoluzione di due equazioni:

$$\begin{aligned} * \sum \Delta X_i \cdot \operatorname{tg}(\psi'_i - \alpha_i) + \sum \Delta E_i &= \sum \Delta_i - K \cdot \sum W_i \\ ** \sum \Delta X_i \cdot [(y_{mi} - y_G) \cdot \operatorname{tg}(\psi'_i - \alpha'_i) + (x'_i - x_G)] &= \sum W_i \cdot (x_{mi} - x_G) + \sum \Delta_i \cdot (y_{mi} - y_G) \end{aligned}$$

Ma l'approccio risolutivo, in questo caso, è completamente capovolto: il problema infatti impone di trovare un valore di K (accelerazione sismica) corrispondente ad un determinato fattore di sicurezza;

ed in particolare, trovare il valore dell'accelerazione K corrispondente al fattore di sicurezza $F = 1$, ossia l'*accelerazione critica*.

Si ha pertanto:

$K = K_c$ *accelerazione critica* se $F = 1$

$F = F_s$ *fattore di sicurezza in condizioni statiche* se $K = 0$

La seconda parte del problema del Metodo di Sarma è quella di trovare una distribuzione di forze interne X_i ed E_i tale da verificare l'equilibrio del concio e quello globale dell'intero ammasso, senza violazione del criterio di rottura.

E' stato trovato che una soluzione accettabile del problema si può ottenere assumendo la seguente distribuzione per le forze X_i :

$$\Delta X_i = \lambda \cdot \Delta Q_i = \lambda \cdot (Q_{i+1} - Q_i)$$

dove Q_i è una funzione nota, in cui vengono presi in considerazione i parametri geotecnici medi sulla i -esima faccia del concio i , e λ rappresenta un'incognita.

La soluzione completa del problema si ottiene pertanto, dopo alcune iterazioni, con i valori di K_c , λ e F , che permettono di ottenere anche la distribuzione delle forze di interstriscia.

Metodo di SPENCER

Il metodo è basato sull'assunzione:

Le forze d'interfaccia lungo le superfici di divisione dei singoli conci sono orientate parallelamente fra loro ed inclinate rispetto all'orizzontale di un angolo θ . tutti i momenti sono nulli $M_i = 0 \quad i=1 \dots n$

Sostanzialmente il metodo soddisfa tutte le equazioni della statica ed equivale al metodo di Morgenstern e Price quando la funzione $f(x) = 1$.

Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al centro dell'arco descritto dalla superficie di scivolamento si ha:

$$\sum Q_i R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

dove:

$$Q_i = \frac{\frac{c}{F_s} (W \cos \alpha - \gamma_w h l \sec \alpha) \frac{tg \alpha}{F_s} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[\frac{F_s + tg \phi tg(\alpha - \theta)}{F_s} \right]}$$

forza d'interazione fra i conci;

R = raggio dell'arco di cerchio;

θ = angolo d'inclinazione della forza Q_i rispetto all'orizzontale.

Imponendo l'equilibrio delle forze orizzontali e verticali si ha rispettivamente:

$$\sum(Q_i \cos \theta) = 0 \quad \sum(Q_i \sin \theta) = 0$$

Con l'assunzione delle forze Q_i parallele fra loro, si può anche scrivere:

$$\sum Q_i = 0$$

Il metodo propone di calcolare due coefficienti di sicurezza: il primo (F_{sm}) ottenibile dalla 1), legato all'equilibrio dei momenti; il secondo (F_{sf}) dalla 2) legato all'equilibrio delle forze. In pratica si procede risolvendo la 1) e la 2) per un dato intervallo di valori dell'angolo θ , considerando come valore unico del coefficiente di sicurezza quello per cui si abbia $F_{sm} = F_{sf}$.

Metodo di MORGENSTERN e PRICE

Si stabilisce una relazione tra le componenti delle forze di interfaccia del tipo $X = \lambda f(x)E$, dove λ è un fattore di scala e $f(x)$, funzione della posizione di E e di X , definisce una relazione tra la variazione della forza X e della forza E all'interno della massa scivolante. La funzione $f(x)$ è scelta arbitrariamente (costante, sinusoidale, semisinusoidale, trapezia, spezzata...) e influenza poco il risultato, ma va verificato che i valori ricavati per le incognite siano fisicamente accettabili.

La particolarità del metodo è che la massa viene suddivisa in strisce infinitesime alle quali vengono imposte le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale e di rottura sulla base delle strisce stesse. Si perviene ad una prima equazione differenziale che lega le forze d'interfaccia incognite E , X , il coefficiente di sicurezza F_s , il peso della striscia infinitesima dW e la risultante delle pressioni neutra alla base dU .

Si ottiene la cosiddetta "equazione delle forze":

$$c' \sec^2 \frac{\alpha}{F_s} + tg \varphi \left(\frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - tg \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \alpha \frac{dU}{dx} \right) =$$

$$= \frac{dE}{dx} - tg \alpha \left(\frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right)$$

Una seconda equazione, detta "equazione dei momenti", viene scritta imponendo la condizione di equilibrio alla rotazione rispetto alla mezzeria della base:

$$X = \frac{d(E_\gamma)}{dx} - \gamma \frac{dE}{dx}$$

queste due equazioni vengono estese per integrazione a tutta la massa interessata dallo scivolamento.

Il metodo di calcolo soddisfa tutte le equazioni di equilibrio ed è applicabile a superfici di qualsiasi forma, ma implica necessariamente l'uso di un calcolatore.

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

β_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.

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 $m \times n$ e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

Analisi di stabilità dei pendii con: BISHOP (1955)

Lat./Long.	37,559397/13,455892
Normativa	NTC 2008
Numero di strati	2,0
Numero dei conci	10,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,3
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

Maglia dei Centri

Ascissa vertice sinistro inferiore x_i	4,63 m
Ordinata vertice sinistro inferiore y_i	8,61 m
Ascissa vertice destro superiore x_s	7,57 m
Ordinata vertice destro superiore y_s	11,55 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

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: B
 Categoria topografica: T1

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30,0	0,026	2,442	0,2
S.L.D.	50,0	0,033	2,45	0,238
S.L.V.	475,0	0,072	2,608	0,362
S.L.C.	975,0	0,089	0,265	0,398

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Opere di sostegno

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,0312	1,0	0,0032	0,0016
S.L.D.	0,0396	1,0	0,004	0,002
S.L.V.	0,0864	1,0	0,0088	0,0044
S.L.C.	0,1068	1,0	0,0109	0,0054

Coefficiente azione sismica orizzontale 0,003
 Coefficiente azione sismica verticale 0,002

Vertici profilo

N	X m	y m
1	2,0	5,8
2	5,0	5,8
3	6,1	5,8
4	6,52	8,3
5	6,52	8,3
6	8,52	8,3
7	12,27	8,3

Vertici strato1

N	X (m)	y (m)
1	2,0	5,0
2	6,52	5,0
3	12,27	5,0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1,25
Coesione efficace	1,25
Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

Stratigrafia

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

Strato	c (kg/cm ²)	cu (kg/cm ²)	Fi (°)	G (Kg/m ³)	Gs (Kg/m ³)	K (Kg/cm ³)	Litologia	
1	0		23	1733,518	1733,518	4,00		
2	0		23	1733,518	1733,518	0,00	Argilla o argilla limosa molle	

Risultati analisi pendio [D.M. 88/96]

Fs minimo individuato	1,33
Ascissa centro superficie	5,66 m
Ordinata centro superficie	9,35 m
Raggio superficie	4,69 m

(ID=38) xc = 5,66 yc = 9,346 Rc = 4,687 Fs=1,334

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm ²)	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	0,76	-35,1	0,93	392,98	1,18	0,79	0,0	23,0	0,0	619,0	196,9
2	0,76	-24,3	0,84	965,8	2,9	1,93	0,0	23,0	0,0	1237,1	393,5
3	0,76	-14,3	0,79	1318,28	3,95	2,64	0,0	23,0	0,0	1481,1	471,1
4	0,76	-4,8	0,77	1488,23	4,46	2,98	0,0	23,0	0,0	1534,8	488,2
5	0,87	5,2	0,88	1695,09	5,09	3,39	0,0	23,0	0,0	1654,1	526,2
6	0,66	14,7	0,68	3961,67	11,89	7,92	0,0	23,0	0,0	3780,2	1202,5
7	0,76	24,0	0,84	4287,8	12,86	8,58	0,0	23,0	0,0	4111,1	1307,8
8	0,76	34,8	0,93	3722,51	11,17	7,45	0,0	23,0	0,0	3712,1	1180,8
9	0,76	47,4	1,13	2851,87	8,56	5,7	0,0	23,0	0,0	3129,6	995,5
10	0,76	65,7	1,85	1403,09	4,21	2,81	0,0	23,0	0,0	2000,1	636,2