



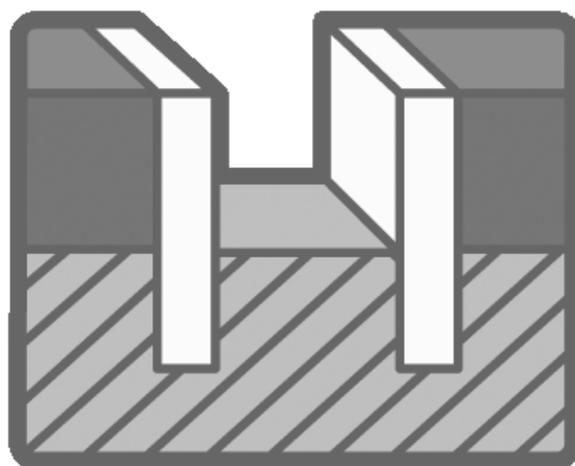
Software per Architettura,
Ingegneria ed Edilizia

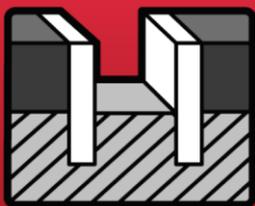


Stabilità globale del terreno

Manuale di utilizzo

Calcolo della superficie di scivolamento circolare più sfavorevole





Indice

1	Introduzione	3
1.1	Fenomeno della stabilità globale	3
1.2	Calcolo del coefficiente di sicurezza nei confronti dello scivolamento circolare	4
1.3	Metodi di calcolo	5
1.4	Metodo delle strisce (Metodo di Bishop semplificato)	6
2	Considerazioni e metodi di calcolo	8
2.1	Ipotesi di calcolo.....	8
2.2	Idoneità del metodo delle strisce (Metodo semplificato di Bishop).....	10
2.3	Procedura di calcolo	11
3	Bibliografia di riferimento	14
4	Esempio 1. Muri a mensola in calcestruzzo armato	15
4.1	Superficie di scivolamento circolare più sfavorevole di un muro di sostegno a mensola	15
5	Esempio 2. Paratie.....	19
5.1	Superficie di scivolamento circolare più sfavorevole in una fase qualsiasi di una paratia	19

1 Introduzione

1.1 Fenomeno della stabilità globale

Come conseguenza del dislivello generato dagli elementi di sostegno, il terreno presenta una tendenza a livellarsi; ciò comporta che la massa del terreno sia soggetta a un possibile problema di instabilità globale cui si opporrà la sua resistenza a taglio.

Questo tipo di instabilità può essere classificato in due grandi gruppi: **smottamenti** (la massa instabile cede) e **spostamenti** (la massa instabile si sposta). Tra questi ultimi, un caso tipico è rappresentato dallo scivolamento, in cui un concio di terreno scivola rispetto a un altro quando la resistenza a taglio viene superata lungo la loro zona di separazione. Tale scivolamento potrà seguire superfici di forma piana, curva, spezzata o derivante da una loro combinazione.

Bisognerà quindi verificare la sicurezza nei confronti della stabilità globale in tutta la struttura di sostegno.

Nella pratica, si studiano generalmente superfici di scivolamento circolari, per cui è necessario determinare quel cerchio che richiede la maggior resistenza del terreno o, analogamente, che possiede un coefficiente di sicurezza minimo nei confronti dello scivolamento circolare. Quest'ultimo è definito come il rapporto tra la resistenza a taglio del terreno a rottura e la resistenza a taglio che lo stesso deve sviluppare.

Le forze che tendono a destabilizzare un determinato concio di terreno sono, principalmente, il suo peso proprio, il peso proprio dell'elemento di sostegno, i sovraccarichi contenuti all'interno del cerchio, l'eccitazione sismica e, infine, qualsiasi altra forza destabilizzante.

Per portare a termine la determinazione della superficie di scivolamento circolare più sfavorevole bisognerà conoscere i dati del problema, il dislivello del terreno a monte e a valle dell'elemento di sostegno, le caratteristiche di quest'ultimo, la stratigrafia, l'insieme di carichi agente sul sistema elemento di sostegno – terreno e, per ultimo, la scelta di un metodo la cui formulazione sia idonea a risolvere il problema in questione.

Le seguenti figure schematizzano il problema della stabilità globale trattato in questa sede:

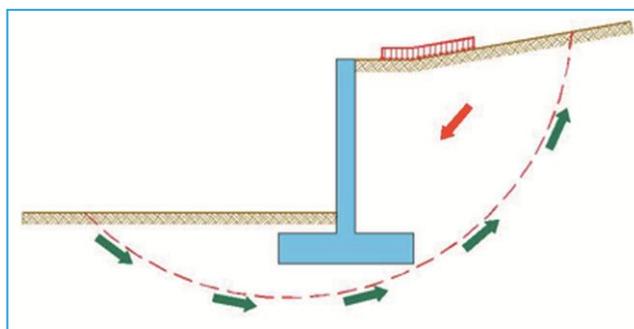


Fig. 1

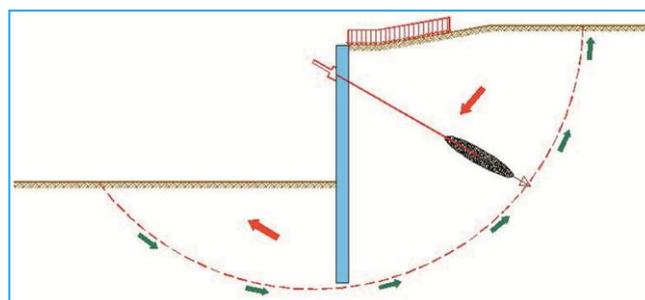


Fig. 2

1.2 Calcolo del coefficiente di sicurezza nei confronti dello scivolamento circolare

Come sopra menzionato, il coefficiente di sicurezza presentato da un cono di terreno potenzialmente instabile nei confronti di un fenomeno di scivolamento circolare, può essere valutato come il rapporto tra l'effetto delle azioni stabilizzanti e l'effetto delle azioni destabilizzanti.

Quantitativamente, in termini di momenti può essere espresso come:

$$F = \frac{\sum M_S}{\sum M_D}$$

dove:

$\sum M_S$: sommatoria dei momenti prodotti dalle azioni stabilizzanti rispetto al centro del cerchio in questione.

$\sum M_D$: sommatoria dei momenti prodotti dalle azioni destabilizzanti rispetto al centro del cerchio in questione.

Il coefficiente di sicurezza può essere associato a distinti parametri, quali la resistenza del terreno, il valore dei sovraccarichi, l'eccitazione sismica ecc., a seconda di quali siano i loro valori che si impiegano nella formula. In altre parole, il coefficiente di sicurezza ottenuto fornirà, rispettivamente, un valore della resistenza a taglio richiesta dal terreno, o dell'eccesso di sovraccarico che può agire su di esso, o della massima eccitazione sismica sopportata dal sistema.

1.3 Metodi di calcolo

Attualmente, esistono svariati metodi per calcolare il coefficiente di sicurezza di un conico di terreno potenzialmente instabile nei confronti dello scivolamento circolare. In generale, questi metodi consistono nel proporre una superficie di scivolamento e nello studiare il suo equilibrio, in funzione del sistema di azioni che si sviluppa; questo studio si esegue suddividendo il conico di terreno in piccole porzioni con forme geometriche definite, tali da consentire un calcolo semplice delle azioni alle quali risultano sottoposte.

Una volta determinate le azioni agenti sul conico di terreno e sulla base di una serie di ipotesi, si stabiliscono le corrispondenti equazioni di equilibrio dalle quali, mediante un calcolo previo più o meno complesso, si otterrà il valore del coefficiente di sicurezza della superficie circolare in esame.

Successivamente, si ripete questo procedimento per un numero sufficientemente significativo di possibili cerchi di scivolamento, variando sia il loro raggio che la loro posizione nello spazio; ciascuno di essi fornirà un coefficiente di sicurezza e, tra tutti questi, il minore coinciderà con il coefficiente di sicurezza del sistema.

Abitualmente, tutti questi cerchi si tracciano sulla base di una maglia ortogonale X-Y, in cui in ogni suo nodo si tracciano tutti i possibili cerchi di scivolamento con raggi crescenti. In Fig. 3 si mostra un cerchio generico di raggio "R" il cui centro è il punto "o" di tale maglia ortogonale.

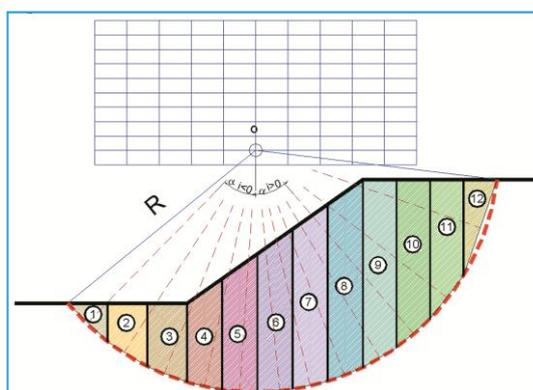


Fig. 3

1.4 Metodo delle strisce (Metodo di Bishop semplificato)

Consiste nell'analizzare l'equilibrio di un concio di terreno che segue una superficie di scivolamento circolare; a tale scopo si traccia un cerchio sulla sezione trasversale del terreno e si suddivide in strisce il concio contenuto in tale cerchio.

Basandosi sullo schema di corpo libero di ciascuna striscia generica "i", come quello mostrato in Fig. 4, si imposta la formulazione matematica del metodo.

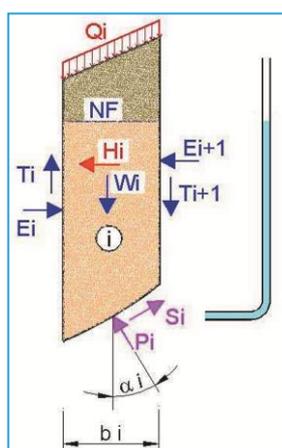


Fig. 4

Per una determinata pendenza, l'equazione utilizzata per ottenere il coefficiente di sicurezza "F" di un qualsiasi cerchio di raggio R (su cui potranno o meno agire sovraccarichi Q) è la seguente¹:

¹ Per ottenere la formulazione e le sue ipotesi, si raccomanda di consultare i riferimenti bibliografici I e IV indicati nel seguito.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c_i \times b_i + (W_i + Q_i - u_i \times b_i) \times \operatorname{tg} \phi_i}{m \alpha_i} \right]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \times \sin \alpha_i} \quad (1)$$

dove:

$$m \alpha_i = \cos \alpha_i \times \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \phi_i \times \operatorname{tg} \alpha_i}{F} \right) \quad (2)$$

b_i : larghezza della striscia "i".

c_i : valore della coesione del terreno in corrispondenza del punto medio della base della striscia "i".

$\text{tg } \phi_i$: valore della tangente dell'angolo di attrito interno del terreno in corrispondenza del punto medio della striscia "i".

α_i : valore dell'angolo che la retta che unisce il centro del cerchio forma con il punto medio della base della striscia "i" rispetto alla verticale.

W_i : somma del peso proprio di tutti gli strati di terreno che si appoggiano sul punto medio della base della striscia "i".

Q_i : risultante della pressione prodotta dai sovraccarichi agenti sul terreno sul punto medio della base della striscia "i".

u_i : valore della sovrappressione dei pori in corrispondenza del punto medio della base della striscia "i".

Si ipotizza che le forze tra le strisce presentino un valore nullo, cioè, $\{\Delta T_i = 0\}$ e $\{\Delta E_i = 0\}$.

L'equazione precedente è di tipo implicito in F , per cui si risolve mediante iterazioni successive partendo da un valore iniziale di $F = F_1$ che si inserisce nell'equazione (2) e si paragona con il valore F_2 che si ottiene dall'equazione (1). Se i valori di F_1 e di F_2 non sono sufficientemente prossimi tra di loro, si esegue una nuova iterazione partendo dal valore di F_2 nell'equazione (2) e così via, fino a quando i valori convergono a un valore finale del coefficiente di sicurezza, F .

2 Considerazioni e metodi di calcolo

2.1 Ipotesi di calcolo

Come in tutte le analisi, è necessario definire in primo luogo le ipotesi su cui si basa il metodo di calcolo. A tale scopo, e per tenere in considerazione situazioni particolari quali la presenza di un elemento di sostegno, del livello freatico, di carichi in sommità, ecc., si riepilogano in seguito quali sono state le ipotesi formulate al momento di calcolare la superficie di scivolamento circolare più sfavorevole:

- Il metodo impiegato per il calcolo del coefficiente di sicurezza più sfavorevole è il Metodo delle strisce o Metodo semplificato di Bishop, in cui si ipotizza che le forze tra le strisce siano nulle, cioè, $\{\Delta T_i = 0\}$ e $\{\Delta E_i = 0\}$. Per conoscere i limiti e la validità del metodo, la invitiamo a consultare la bibliografia di riferimento.
- Il terreno è omogeneo e non ci sono blocchi predominanti nella sua composizione.
- La resistenza a taglio del terreno considerata è quella calcolata tramite l'equazione di Mohr - Coulomb, cioè, $\tau = c + (\sigma - \mu) \operatorname{tg} \phi$.
- Si considera uno stato di deformazione piana, per cui lo studio viene condotto per un'unità di larghezza del sistema.
- Il concio instabile segue una potenziale superficie di scivolamento di direttrice circolare.
- Non si considerano né fenomeni quali distacchi, collassi, né fenomeni quali liquefazione, né l'esistenza di irregolarità quali fessure, erosioni dovute a fluidi, cedimenti dovuti a correnti naturali, ecc.
- Si ipotizza che gli strati siano perfettamente orizzontali lungo tutta la loro estensione, e che lo strato più profondo presenti un'estensione semi-infinita in profondità.
- La densità del terreno di uno strato sarà apparente o sommersa a seconda che quest'ultimo si trovi al di sopra o al di sotto del livello freatico.
- Si analizzano unicamente i cerchi profondi che penetrano nel terreno, e non quelli che penetrano in uno strato roccioso.
- Non si considerano cerchi che giacciono parzialmente al di fuori dei limiti del terreno, senza penetrare al suo interno.
- Non si considerano tensioni di capillarità sul concio di terreno.

- Il livello freatico si considera in equilibrio orizzontale.
- Nel caso di paratie, non si considerano le azioni prodotte dagli ancoraggi e dai puntelli sulla parete, cioè, si analizza l'equilibrio trascurando il loro contributo. Se il coefficiente ottenuto sotto questa ipotesi estrema è ragionevole, significa che il contributo apportato dagli elementi di sostegno non è strettamente necessario. Nel caso in cui il coefficiente ottenuto non risultasse soddisfacente, bisognerà considerare il contributo di questi elementi che dovranno essere dimensionati per sopportare le azioni richieste dall'equilibrio globale. Inoltre, non si analizzano i coefficienti di sicurezza nelle fasi costruttive in cui sono presenti solai, dato che si considera che l'esecuzione dell'edificio non consente lo sviluppo della superficie di scivolamento circolare.
- Nel caso di paratie generiche, non si prendono in considerazione cerchi che le attraversano, e si ipotizza che il loro peso specifico sia nullo.
- Il coefficiente sismico orizzontale (frazione dell'accelerazione dovuta alla gravità) si considera uniforme lungo l'altezza del muro.
- Si assume che i sovraccarichi agenti sul terreno si diffondano in profondità lungo una direzione inclinata di 30° rispetto alla verticale.
- Si ipotizza che la resistenza che l'elemento di sostegno possiede lungo la superficie di taglio con qualsiasi cerchio di scivolamento sia il valore della resistenza caratteristica a taglio del materiale specificata dalla norma corrispondente σ , alternativamente, la resistenza caratteristica a trazione nel caso in cui la norma non specifichi il valore della resistenza a taglio. Per elementi in calcestruzzo, si considerano le resistenze corrispondenti al caso di calcestruzzo non armato.
- Sulla superficie di scivolamento oggetto di studio, non si prendono in considerazione le tensioni prodotte sul terreno dall'elemento di sostegno e i carichi applicati lungo la sua sommità. Questa situazione, in generale, è conservativa, per cui si ottiene un coefficiente di sicurezza minore di quello che si otterrebbe se si considerassero tali pressioni. In generale, escludendo quei casi in cui si applichino carichi di valore considerevole sull'elemento, la differenza tra i valori assunti dai coefficienti sarà piccola.
- Per quanto concerne le combinazioni con azione sismica, si esegue un'analisi statica e si considerano le azioni orizzontali prodotte dalle masse del sistema terreno – livello freatico – elemento di sostegno moltiplicate per il valore dell'azione sismica definita dall'utente e per i vettori dei carichi in sommità corrispondenti alla combinazione con sisma. Si trascura qualsiasi influenza che l'azione sismica possa esercitare sui sovraccarichi definiti.

2.2 Idoneità del metodo delle strisce (Metodo semplificato di Bishop)

Il metodo sopra descritto è stato adattato alle condizioni più svariate e complesse che si presentano nello studio della superficie di scivolamento circolare più sfavorevole in strutture di sostegno; a tale scopo sono stati seguiti i criteri del riferimento bibliografico II.

Il risultato è che l'equazione (1) diventa l'equazione (3) seguente:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{c_i \times b_i + (W_i + Wh_i + Q_i - u_i \times b_i) \times \text{tg} \phi_i}{m \alpha_i} \right] + \frac{M_{\tau M}}{R} + \frac{\sum_m ME_m}{R}}{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(W_i + Wh_i) \times \sin \alpha_i \right] + \frac{\sum_k MD_k}{R}} \quad (3)$$

dove:

$$m \alpha_i = \cos \alpha_i \times \left(1 + \frac{\text{tg} \phi_i \times \text{tg} \alpha_i}{F} \right) \quad (4)$$

Nell'equilibrio del conico di terreno, si considerano solo quelle strisce che soddisfano la seguente disequazione:

$$\left(1 + \frac{\text{tg} \phi_i \times \text{tg} \alpha_i}{F} \right) \geq 0.10 \quad (5)$$

b_i : larghezza della striscia "i" (si assume il valore minimo tra $R/10$ e 1.00 m).

c_i : valore della coesione del terreno in corrispondenza del punto medio della base della striscia "i".

$\text{tg} \phi_i$: valore della tangente dell'angolo di attrito interno del terreno in corrispondenza del punto medio della base della striscia "i".

α_i : valore dell'angolo che la retta che unisce il centro del cerchio forma con il punto medio della base della striscia "i" rispetto alla verticale.

W_i : somma del peso di tutti gli strati di terreno che si appoggiano sul punto medio della base della striscia "i". Si considerano le densità apparenti o sommerse del terreno a seconda che gli strati si trovino al di sopra o al di sotto del livello freatico.

Wh_i : peso dell'acqua situata al di sopra della superficie della striscia "i" se esistesse il livello freatico.

Q_i : risultante della pressione prodotta dai sovraccarichi agenti sul terreno in corrispondenza del punto medio della base della striscia "i".

u_i : valore della sovrappressione dei pori in corrispondenza del punto medio della base della striscia "i". Questo valore è nullo, dato che il programma considera che la pressione dei pori è uguale al valore della pressione idrostatica.

$M_{\tau M}$: momento prodotto dalla resistenza a taglio dell'elemento di sostegno rispetto al centro del cerchio, quando questo lo attraversa.

$\sum MD_k$: sommatoria dei "k" momenti prodotti dalle azioni esterne destabilizzanti rispetto al centro del cerchio.

$\sum ME_m$: sommatoria degli "m" momenti prodotti dalle azioni esterne stabilizzanti rispetto al centro del cerchio.

Come detto prima, l'equazione precedente è di tipo implicita in F, per cui si risolve mediante iterazioni successive. In generale, la convergenza del coefficiente di sicurezza verso un valore finale è rapida; tuttavia, se il numero di iterazioni raggiunge il valore limite fissato, pari a 50, il programma emette un messaggio nell'elenco delle verifiche. Si raggiunge il valore limite per quanto riguarda le iterazioni quando il sistema presenta una situazione particolare che instabilizza la convergenza all'equilibrio (ad esempio quando esistano terreni con densità singolari, ecc.).

Le iterazioni terminano quando la differenza tra il valore del coefficiente di sicurezza calcolato all'iterazione "j" e quello calcolato all'iterazione "j+1" è minore o uguale a 0.001:

$$(|F_j - F_{j+1}| \leq 0.001)$$

2.3 Procedura di calcolo

La procedura impiegata dal programma per determinare la superficie di scivolamento circolare cui corrisponde il minimo coefficiente di sicurezza consiste nel definire una prima maglia di punti nel piano della sezione trasversale in esame, che coincideranno con i centri dei cerchi oggetto di analisi. Questa prima mesh di centri copre una larghezza orizzontale pari a 4 volte l'altezza del sostegno e un'altezza verticale pari a 2 volte l'altezza del sostegno. Nel caso in cui il terreno presenti una berma all'estradosso, si incrementa l'altezza della mesh sommandole una quantità pari a 2 volte l'altezza di tale berma. Ciascun lato di questa prima maglia è suddiviso in 10 divisioni.

Una volta calcolato l'insieme di cerchi rappresentativi in ciascun nodo della mesh, si determina il punto P1 della stessa cui è associato il minimo coefficiente di sicurezza. In

seguito si definisce una maglia di dimensioni minori, il cui centro è proprio il punto 'P1', e si procede analogamente a prima, fino ad ottenere il coefficiente minimo associato al punto 'P2'. Si prosegue in tal modo fino a raggiungere 3 mesh, cicli o approssimazioni, ottenendo alla fine il coefficiente di sicurezza minimo associato a tutti i cerchi calcolati, il cui centro coinciderà con il punto 'P3' della terza iterazione. Le dimensioni della seconda e della terza mesh sono pari a 0.40 volte le dimensioni della mesh precedente, e ciascun suo lato è suddiviso in 6 divisioni.

In ogni punto della mesh si tracciano cerchi di raggi crescenti, partendo da un raggio minimo che penetri nel terreno di una profondità pari a 0.50 m, fino ad arrivare a un raggio massimo che coincide con il maggiore tra:

- Raggio minimo + 2 metri.
- Raggio che raggiunge lo strato più profondo + 2 volte l'altezza del sostegno del terreno.
- Raggio che raggiunge la quota del punto più profondo dell'elemento del sostegno + altezza di sostegno del terreno.

Tuttavia, una volta che il valore del raggio raggiunge la quota dello strato più profondo definito dall'utente, se il coefficiente di sicurezza dei 10 cerchi successivi aumenta, il programma non continua a penetrare nel terreno con più cerchi. Quando si verifica la situazione opposta, il programma continua a disegnare cerchi con raggi crescenti fino a soddisfare tale condizione.

Prima di calcolare il coefficiente di sicurezza del cerchio proposto, si eseguono più controlli per stabilire la validità del cerchio stesso. In altre parole, alcuni cerchi possono essere ignorati dal programma, quali quelli che penetrano in uno strato roccioso, quelli che non contengano un dislivello del terreno lungo la loro superficie, quelli contenenti un tratto che non attraversa il terreno, quelli che attraversano il terreno in corrispondenza di determinati punti la cui quota è maggiore rispetto a quella del centro.

Le seguenti figure mostrano esempi di cerchi ignorati dal programma:

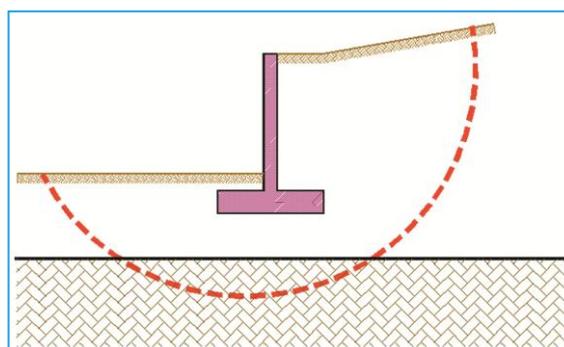


Fig. 5. Cerchio non valido poiché penetra nel manto roccioso

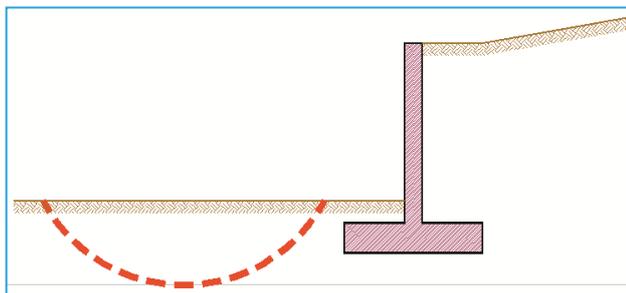


Fig. 6. Cerchio non valido in quanto non contiene una variazione di quota del terreno

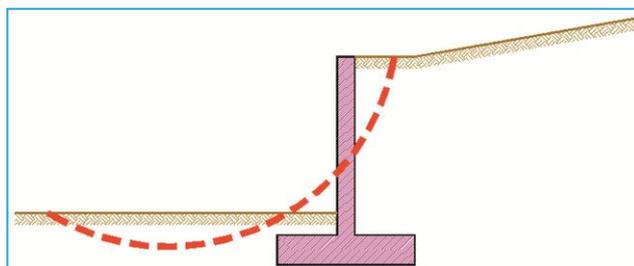


Fig. 7. Cerchio non valido poiché presenta un tratto che non attraversa il terreno

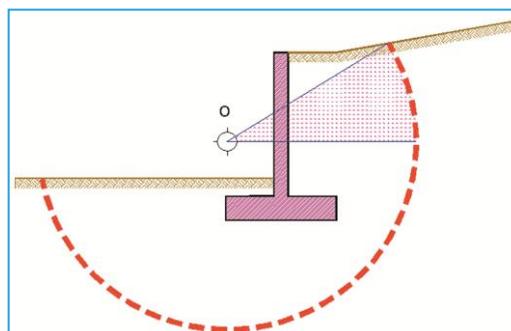


Fig. 8. Cerchio non valido in quanto il suo centro si trova al di sotto di alcuni punti di intersezione del cerchio con il terreno

3 **Bibliografia di riferimento**

- I. **MECCANICA DEI TERRENI NELL'INGEGNERIA PRATICA.** Karl Terzaghi – Ralph B. Peck. Seconda Edizione. Editoriale El Ateneo S.A.
- II. **RACCOMANDAZIONI GEOTECNICHE PER IL PROGETTO DI OPERE MARITTIME E PORTUALI. ROM 0.5.94.** Ministero delle Opere Pubbliche, Trasporti e Medio Ambiente.
- III. **FOUNDATION ANALYSIS DESIGN.** Joseph E. Bowles. Quinta Edizione. Editoriale McGraw Hill.
- IV. **GEOTECNICA E FONDAZIONI. MECCANICA DEL TERRENO E DELLE ROCCE.** José A. Jiménez Salas. José L. de Justo Alpañes. Alcibiades A. Serrano González.
- V. **FONDAZIONI W.E.** Schulze and K. Simmer. Editoriale Blume.

4 Esempio 1. Muri a mensola in calcestruzzo armato

4.1 Superficie di scivolamento circolare più sfavorevole di un muro di sostegno a mensola

4.1.1 *Dati del problema*

Si desidera verificare il valore del coefficiente di sicurezza minimo mediante l'uso del programma **StruBIM Cantilever Walls** (Muri a mensola in calcestruzzo armato) per il muro illustrato nella seguente figura:

Utilizzando il programma, si ottiene un valore del coefficiente di sicurezza minimo pari a $F=1.696$ e la mappa degli isovalori del coefficiente di sicurezza dei cerchi di scivolamento proposti indicati in Fig. 10.

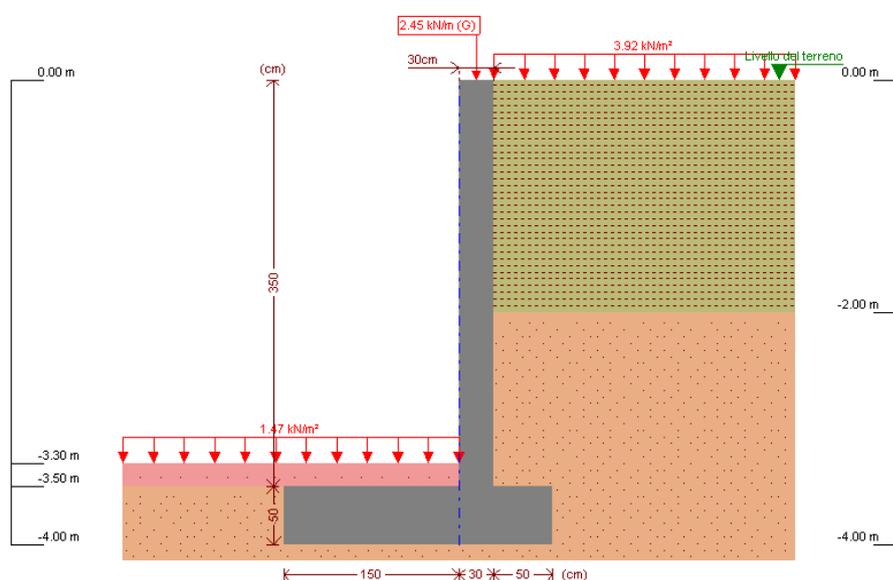


Fig. 9

4.1.3 Calcoli da paragonare con i risultati del programma

È possibile eseguire una verifica dei risultati ottenuti tramite il programma usando un foglio di calcolo che consente di eseguire iterazioni successive per determinare il coefficiente di sicurezza della superficie di scivolamento circolare che si sta analizzando.

Calcolo dei momenti degli elementi differenti dal terreno:

Muro

$$\text{Area del muro (m)} = 2.03 \times 0.50 + 3.50 \times 0.30 = 2.20 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso specifico del muro}^1 = 6.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Coordinata X del centro di gravità del muro} = -0.11136 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Momento dovuto al peso del muro} &= 2.20 \text{ m}^2 \times 6.0 \text{ kN/m}^3 \times (0.825 \text{ m} - 0.11136 \text{ m}) = \\ &= 9.42 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

¹ Si calcola il peso specifico del muro come 25.0 kN/m^2 meno il peso specifico medio ponderato del terreno lungo l'altezza del muro. Il motivo per cui si esegue questa sottrazione è dovuto al fatto che nello studio delle strisce non si considera l'esistenza del muro, per cui bisogna solo calcolare l'effettiva differenza di peso tra muro e terreno.

Sovraccarichi

- **All'estradosso:**

$$\begin{aligned} \text{Lunghezza del sovraccarico all'estradosso all'interno del cerchio} &= (4.23384\text{m} - 0.30\text{m}) \\ &= 3.9338 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Risultante del sovraccarico all'estradosso} &= \\ &= 3.9338 \text{ m} \times 4.0 \text{ kN/m}^2 = 15.7352 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Momento dovuto al sovraccarico all'estradosso} &= \\ &= (0.5 \times 3.9338 \text{ m} + 0.30 \text{ m} + 0.825 \text{ m}) \times 15.7352 \text{ kN/m} = 48.6517 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Momento dovuto ai sovraccarichi all'estradosso / R} &= 48.6517 \text{ kNm/m} / 5.131 \text{ m} = \\ &= 9.48121 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

- **All'intradosso:**

$$\text{Lunghezza del sovraccarico all'intradosso all'interno del cerchio} = 3.82933 \text{ m}$$

$$\text{Risultante del sovraccarico all'intradosso} = 3.82933 \text{ m} \times 1.5 \text{ kN/m}^2 = 5.74399 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Momento dovuto ai sovraccarichi all'intradosso} &= \\ &= (-0.5 \times 3.82933 \text{ m} + 0.825 \text{ m}) \times 5.74399 \text{ kN/m} = -6.2590 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

Momento dovuto ai sovraccarichi all'intradosso / R = $-6.2590 \text{ kNm/m} / 5.131 \text{ m} = -1.2198 \text{ kNm/m}$

Momento dovuto ai sovraccarichi / R = $(48.6517 \text{ kNm/m} - 6.2590 \text{ kNm/m}) / 5.131 \text{ m} = 8.2621 \text{ kNm/m}$

Carichi in sommità del muro

Momento dovuto al carico verticale in sommità del muro

= $2.5 \text{ kN/m} \times (0.825 \text{ m} + 0.15 \text{ m}) = 2.4375 \text{ kNm/m}$

Momento dovuto al carico verticale in sommità del muro / R = $2.4375 / 5.131 = 0.4751 \text{ kNm/m}$

Nella tabella che segue si mostra il modello di calcolo impiegato per il confronto con i dati forniti dal programma, in cui compaiono i dati delle strisce e i valori sopra calcolati.

Conclusioni

Come si può notare, il calcolo eseguito mediante il foglio di calcolo fornisce lo stesso valore del coefficiente di sicurezza per il cerchio in esame di quello ottenuto mediante il programma, cioè:

$F_s = 1.696$

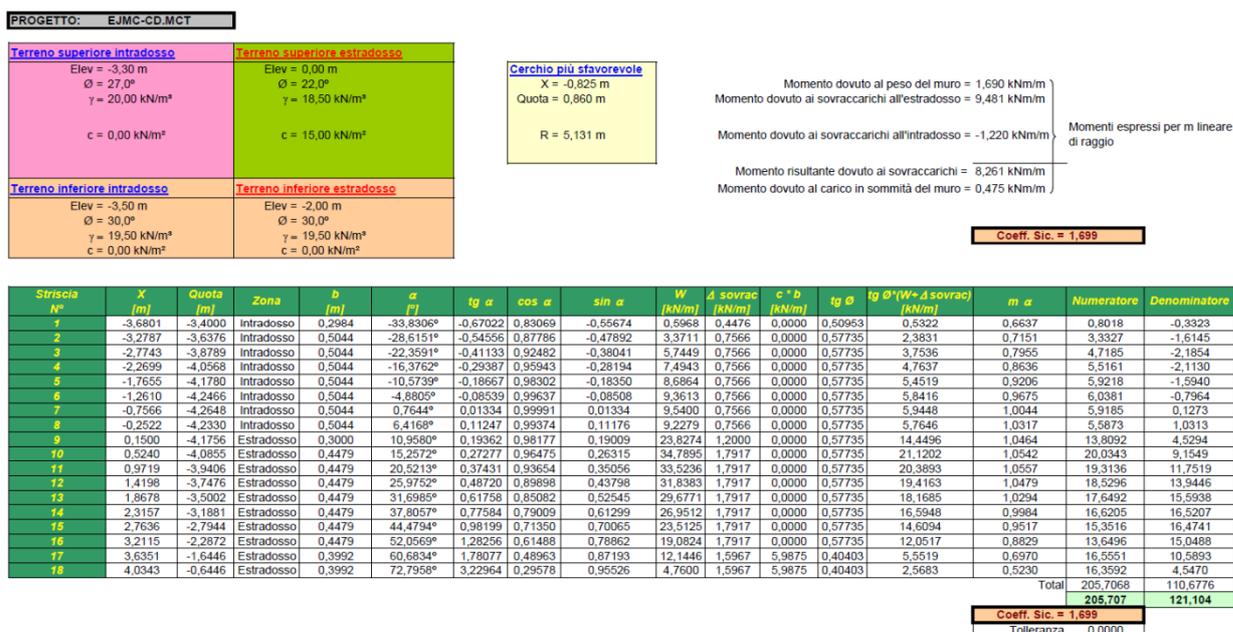


Fig. 12

5 Esempio 2. Paratie

5.1 Superficie di scivolamento circolare più sfavorevole in una fase qualsiasi di una paratia

5.1.1 *Dati del problema*

Si desidera verificare il valore del coefficiente di sicurezza minimo mediante l'uso del programma **StruBIM Embedded Walls** (Paratie) per la paratia illustrata nella seguente figura:

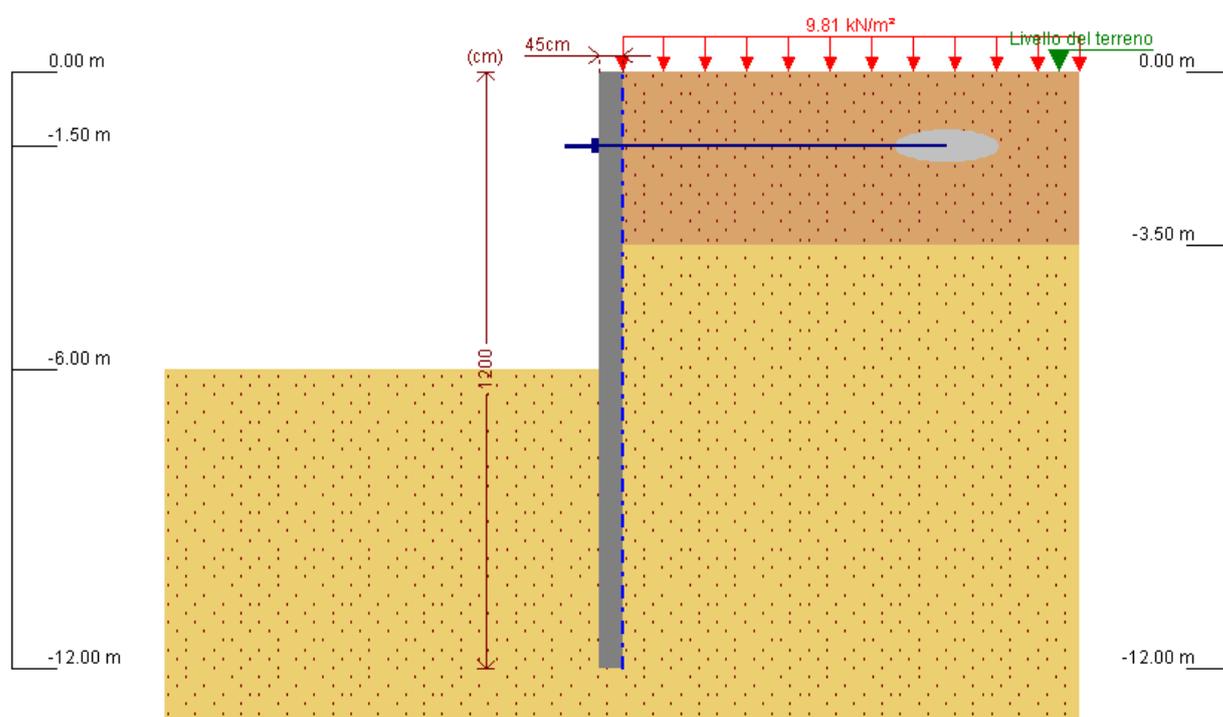


Fig. 13

5.1.2 Risultati del programma

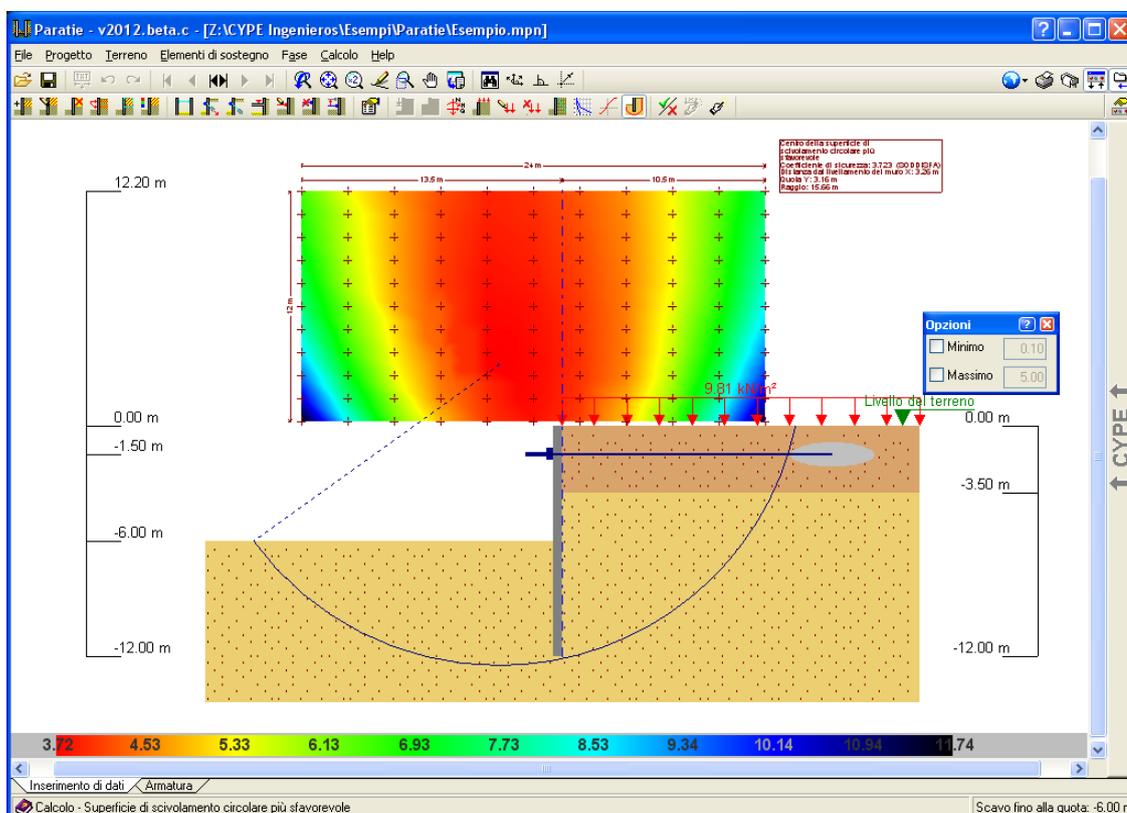


Fig. 14

Per sviluppare il problema, si traccia in primo luogo il centro della superficie di scivolamento circolare in questione al di sopra del profilo del terreno. In seguito, si suddivide il conico instabile di terreno in strisce, come illustrato in Fig. 15.

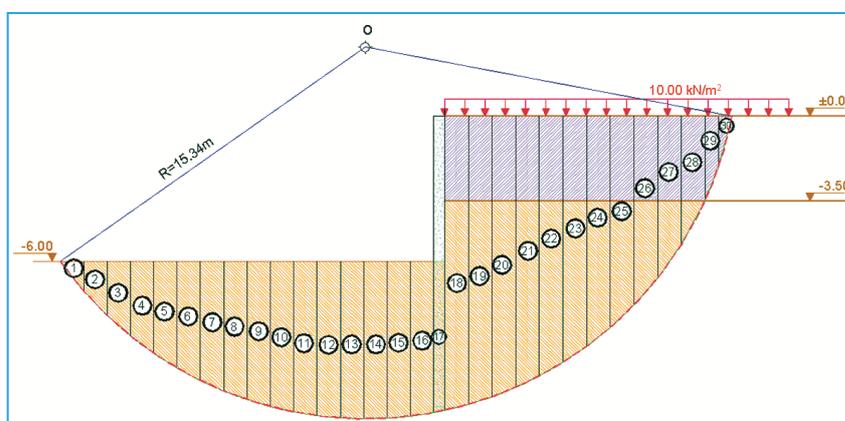


Fig. 15

5.1.3 *Calcoli da paragonare con i risultati del programma*

Anche in questo caso è possibile eseguire una verifica dei risultati ottenuti tramite il programma usando un foglio di calcolo che consente di eseguire iterazioni successive per determinare il coefficiente di sicurezza della superficie di scivolamento circolare che si sta analizzando.

Calcolo dei momenti degli elementi differenti dal terreno:

Muro

$$\text{Area del muro} = (0.45 \times 12) \text{ m}^2 = 5.40 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso specifico del muro}^1 = 5.583 \text{ kN/m}^3$$

¹ Si calcola il peso specifico del muro come 25.0 kN/m² meno il peso specifico medio ponderato del terreno lungo l'altezza del muro. Il motivo per cui si esegue questa sottrazione è dovuto al fatto che nello studio delle strisce non si considera l'esistenza del muro, per cui bisogna solo calcolare l'effettiva differenza di peso tra muro e terreno.

$$\text{Coordinata X del centro di gravità della parete} = -0.225 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Momento dovuto al peso della parete} &= 5.40 \text{ m}^2 \times 5.583 \text{ kN/m}^3 \times (3.26 \text{ m} - 0.225 \text{ m}) = \\ &= 9.15 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Sovraccarichi

- **All'estradosso:**

$$\text{Lunghezza del sovraccarico all'estradosso all'interno del cerchio} = 11.8148 \text{ m}$$

$$\text{Risultante del sovraccarico all'estradosso} = 11.8148 \times 10 \text{ kN/m}^2 = 118.148 \text{ kN/m}$$

$$\text{Momento dovuto ai sovraccarichi all'estradosso} =$$

$$= (0.5 \times 11.8148 \text{ m} + 3.26 \text{ m}) \times 118.148 \text{ kN/m} = 1083.110 \text{ kNm/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Momento dovuto ai sovraccarichi all'estradosso} / R &= 1083.110 \text{ kNm/m} / 15.34 \text{ m} = \\ &= 70.607 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

Nella seguente tabella, si mostra il modello di calcolo impiegato per la verifica, in cui compaiono i dati delle strisce e i valori sopra calcolati.

Conclusioni

il calcolo eseguito mediante il foglio di calcolo fornisce lo stesso valore del coefficiente di sicurezza per il cerchio in esame di quello ottenuto mediante il programma, cioè:

$$F_s = 3,726$$

PROGETTO: PARATIA

Terreno superiore Intradosso	Terreno superiore Estradosso
Quota = -10,000,00 m Ø = 0,0° γ = 0,00 kN/m ³ c = 0,00 kN/m ²	Quota = 0,00 m Ø = 20,0° γ = 18,00 kN/m ³ c = 5,00 kN/m ²
Terreno inferiore Intradosso	Terreno inferiore Estradosso
Quota = -6,00 m Ø = 35,0° γ = 20,00 kN/m ³ c = 0,00 kN/m ²	Quota = -3,50 m Ø = 35,0° γ = 20,00 kN/m ³ c = 0,00 kN/m ²

Cerchio più sfavorevole
X = -3,260 m
Quota = 2,840 m
R = 15,340 m

Momento dovuto al peso effettivo della parete = 5,458 kN·m/m
Momento dovuto ai sovraccarichi all'estradosso = 70,607 kN·m/m
Momento dovuto ai sovraccarichi all'intradosso = 0,000 kN·m/m
Momento risultante dovuto ai sovraccarichi = 70,607 kN·m/m
Momento dovuto al carico in sommità = 0,000 kN·m/m

Coeff. Sic. = 3,726

Striscia N°	X [m]	Quota [m]	Zona	b [m]	α [°]	tg α	cos α	sen α	W [kN/m]	Δ sovrac [kN/m]	c + b [kN/m]	tg Ø	tg Ø*(W+Δ sovrac) [kN/m]	m α	Numeratore	Denominatore
1	-15,3172	-6,6118	Intradosso	0,9592	-51,9066°	-1,27565	0,61695	-0,78701	11,7361	0,0000	0,0000	0,70021	8,2177	0,4690	17,5200	-9,2364
2	-14,3580	-7,7272	Intradosso	0,9592	-46,4033°	-1,05023	0,68958	-0,72421	33,1344	0,0000	0,0000	0,70021	23,2010	0,5535	41,9184	-23,9963
3	-13,3988	-8,6540	Intradosso	0,9592	-41,4155°	-0,88210	0,74993	-0,66151	50,9120	0,0000	0,0000	0,70021	35,6490	0,6256	56,9822	-33,6791
4	-12,4396	-9,4356	Intradosso	0,9592	-36,7889°	-0,74779	0,80085	-0,59887	65,9072	0,0000	0,0000	0,70021	46,1487	0,6883	67,0470	-39,4698
5	-11,4805	-10,0990	Intradosso	0,9592	-32,4289°	-0,63533	0,84406	-0,53625	78,8321	0,0000	0,0000	0,70021	55,0588	0,7433	74,0753	-42,1667
6	-10,5213	-10,6616	Intradosso	0,9592	-28,2719°	-0,53781	0,88071	-0,47366	89,4251	0,0000	0,0000	0,70021	62,6161	0,7917	79,0909	-42,3567
7	-9,5621	-11,1358	Intradosso	0,9592	-24,2722°	-0,45093	0,91160	-0,41107	98,5216	0,0000	0,0000	0,70021	68,9856	0,8344	82,6817	-40,4994
8	-8,6030	-11,5303	Intradosso	0,9592	-20,3954°	-0,37180	0,93731	-0,34850	106,0909	0,0000	0,0000	0,70021	74,2856	0,8718	85,2077	-36,9723
9	-7,6438	-11,8518	Intradosso	0,9592	-16,6143°	-0,28638	0,95825	-0,28593	112,2567	0,0000	0,0000	0,70021	78,6030	0,9045	86,9004	-32,0972
10	-6,6846	-12,1047	Intradosso	0,9592	-12,9068°	-0,22815	0,97474	-0,22336	117,1101	0,0000	0,0000	0,70021	82,0014	0,9328	87,9126	-26,1580
11	-5,7254	-12,2928	Intradosso	0,9592	-9,2534°	-0,16292	0,98699	-0,16080	120,7172	0,0000	0,0000	0,70021	84,5271	0,9568	88,3465	-19,4114
12	-4,7663	-12,4183	Intradosso	0,9592	-5,6379°	-0,09872	0,99516	-0,09824	123,1243	0,0000	0,0000	0,70021	86,2126	0,9767	88,2692	-12,0958
13	-3,8071	-12,4827	Intradosso	0,9592	-2,0449°	-0,03571	0,99936	-0,03568	124,3610	0,0000	0,0000	0,70021	87,0785	0,9927	87,7226	-4,4375
14	-2,8479	-12,4870	Intradosso	0,9592	1,5400°	0,02689	0,99964	0,02688	124,4422	0,0000	0,0000	0,70021	87,1353	1,0047	86,7286	3,3445
15	-1,8888	-12,4310	Intradosso	0,9592	5,1311°	0,08979	0,99599	0,08943	123,3687	0,0000	0,0000	0,70021	86,3837	1,0128	85,2920	11,0334
16	-0,9296	-12,3142	Intradosso	0,9592	8,7425°	0,15378	0,98838	0,15199	121,1278	0,0000	0,0000	0,70021	84,8146	1,0169	83,4013	18,4106
17	-0,2250	-12,1950	Intradosso	0,4500	11,4125°	0,20186	0,98023	0,19787	55,7551	0,0000	0,0000	0,70021	39,0402	1,0174	38,3720	11,0323
18	0,4868	-12,0269	Estradosso	0,9735	14,1451°	0,25202	0,96968	0,24438	227,3504	9,7350	0,0000	0,70021	166,0090	1,0156	163,4583	55,5595
19	1,4603	-11,7467	Estradosso	0,9735	17,9315°	0,32360	0,95143	0,30788	221,8953	9,7350	0,0000	0,70021	162,1893	1,0093	160,6974	68,3172
20	2,4338	-11,3945	Estradosso	0,9735	21,8012°	0,40000	0,92848	0,37139	215,0377	9,7350	0,0000	0,70021	157,3875	0,9983	157,6601	79,8623
21	3,4073	-10,9647	Estradosso	0,9735	25,7791°	0,48297	0,90048	0,43490	206,6696	9,7350	0,0000	0,70021	151,5283	0,9822	154,2732	89,8812
22	4,3808	-10,4498	Estradosso	0,9735	29,8961°	0,57493	0,86693	0,49843	196,6439	9,7350	0,0000	0,70021	144,5081	0,9606	150,4354	98,0129
23	5,3543	-9,8393	Estradosso	0,9735	34,1921°	0,67940	0,82716	0,56197	184,7565	9,7350	0,0000	0,70021	136,1844	0,9328	146,0005	103,8275
24	6,3278	-9,1183	Estradosso	0,9735	38,7215°	0,80177	0,78020	0,62554	170,7194	9,7350	0,0000	0,70021	126,3555	0,8978	140,7468	106,7910
25	7,3013	-8,2651	Estradosso	0,9735	43,5621°	0,95103	0,72463	0,68914	154,1080	9,7350	0,0000	0,70021	114,7241	0,8541	134,3161	106,2021
26	8,2748	-7,2455	Estradosso	0,9735	48,8349°	1,14370	0,65823	0,75282	134,2561	9,7350	0,0000	0,70021	100,8237	0,7997	126,0762	101,0702
27	9,2483	-6,0001	Estradosso	0,9735	54,7497°	1,41495	0,57715	0,81664	110,0076	9,7350	0,0000	0,70021	83,8447	0,7306	114,7586	89,8364
28	10,2218	-4,4057	Estradosso	0,9735	61,7445°	1,86066	0,47340	0,88085	78,9644	9,7350	0,0000	0,70021	62,1080	0,6389	97,2050	69,5554
29	10,9851	-2,8017	Estradosso	0,5531	68,3943°	2,52498	0,36822	0,92974	27,8948	5,5314	2,7657	0,36397	12,1661	0,4590	32,5285	25,9349
30	11,5382	-1,0517	Estradosso	0,5531	75,2659°	3,80255	0,25433	0,96712	10,4709	5,5314	2,7657	0,36397	5,8244	0,3488	24,6270	10,1266
Sommatore-->															2840,2517	686,2214
Coeff. Sic. = 3,726																
Tolleranza 0,0000																

Fig. 16