

Consolidamenti Corticali

Generalità

Consolidamenti Corticali è un software di calcolo per il dimensionamento, in ossequio alle vigenti NTC 2018, di un sistema di rivestimento corticale di coltri instabili, costituito da reti metalliche solidarizzate al terreno mediante ancoraggi in barra.

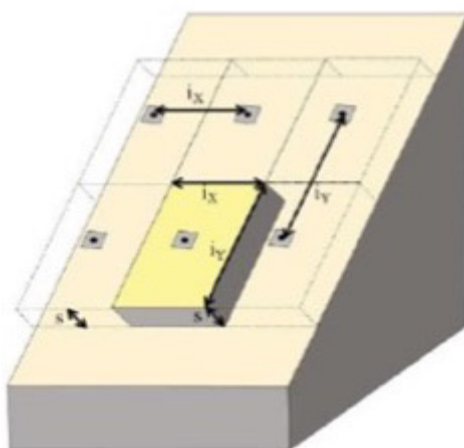
In **Consolidamenti Corticali**, invertendo l'usuale approccio progettuale, il Progettista fissa il valore del coefficiente di sicurezza di progetto (FS_{des}) e il software consente di determinare lo sforzo (di trazione) nel singolo ancoraggio necessario per raggiungerlo.

Poiché viene quantificato l'incremento del coefficiente di sicurezza conseguito in seguito alla realizzazione del sistema di consolidamento, questo può essere considerato come "intervento di stabilizzazione" secondo quanto prescritto al punto 6.3.5 della NTC 2018.

Schema di calcolo

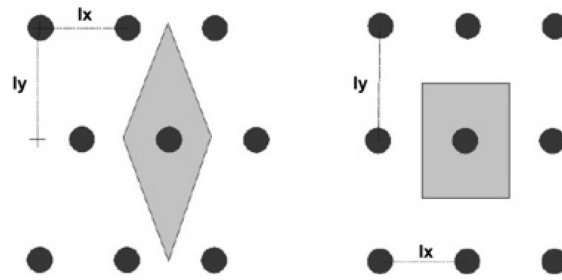
Lo schema adottato in **Consolidamenti Corticali** prevede l'analisi di stabilità rispetto a un cinematismo di tipo traslazionale del volume di terreno rappresentato planimetricamente dall'area di influenza del singolo ancoraggio e avente spessore pari allo spessore, misurato perpendicolarmente alla superficie di scorrimento, della coltre da stabilizzare (S).

Viene ipotizzato che lo scorrimento possa avvenire sulla superficie di contatto tra la coltre e il sottostante substrato, che può essere costituito da terreno oppure da roccia, avente lo stesso angolo di inclinazione α rispetto all'orizzontale della superficie topografica



L'analisi viene condotta anche in condizioni sismiche secondo l'approccio pseudostatico, così come previsto al punto 7.11.3.5.2 delle NTC 2018, considerando tali azioni secondo le condizioni più sfavorevoli.

Per la definizione del volume di terreno, può farsi riferimento ai seguenti schemi di disposizione degli ancoraggi (*raster* rettangolare o romboidale).

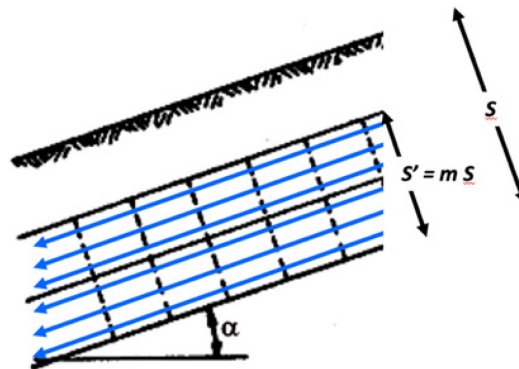


Il volume, sia in caso di *raster* romboidale che rettangolare, sarà dato da:

$$V = l_x l_y S \text{ (m}^3\text{)}$$

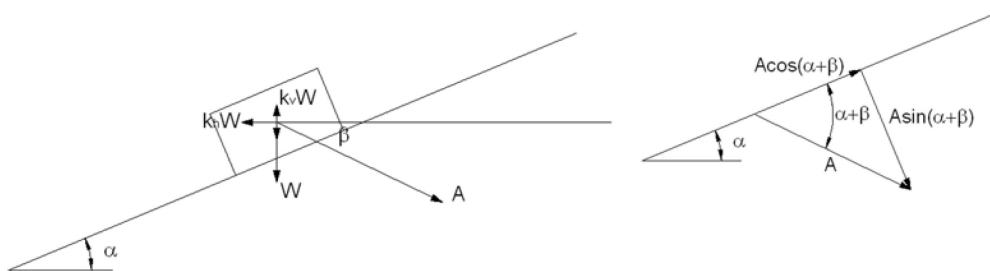
L'analisi di stabilità può essere condotta considerando, oltre alle azioni sismiche, anche la presenza di un moto di filtrazione con linee di flusso parallele al pendio che interessi la coltre per uno spessore:

$$S' = m S$$



In caso di assenza di falda: $m = 0$; per falda a p.c.: $m = 1$

Lo sforzo (di trazione) A da trasferire al singolo ancoraggio per ottenere il valore del coefficiente di sicurezza di progetto (FS_{des}) è ottenuto risolvendo la seguente espressione:



$$FS_{des} = \frac{[(W \pm F_v) \cos \alpha - F_h \sin \alpha + A \sin(\alpha + \beta)] \tan \varphi}{(W \pm F_v) \sin \alpha + F_h \cos \alpha - A \cos(\alpha + \beta)}$$

Noto lo sforzo di trazione agente sull'ancoraggio per il raggiungimento di FS_{des} , vengono effettuate, applicando gli opportuni coefficienti parziali previsti dalle NTC 2018, le seguenti verifiche:

- 1) Verifica a trazione della barra;

- 2) Verifica a sfilamento barra/malta;
- 3) Verifica a sfilamento fondazione/terreno;
- 4) Verifica a punzonamento della rete;
- 5) Verifica a trazione della rete.

Le verifiche si ritengono soddisfatte se le sollecitazioni E_d risultano inferiori alle resistenze R_d :

$$E_d < R_d$$

L'approccio di calcolo utilizzato, secondo le NTC 2018, è l'Approccio 2, che prevede l'unica combinazione (A1 + M1 + R3).

INPUT

Parametri del terreno e del substrato

Coltre

- I.1. *Inclinazione del pendio α* : angolo "medio" (in gradi sessagesimali) di inclinazione del pendio rispetto all'orizzontale
- I.2. *Spessore S* : spessore (in m) della coltre da stabilizzare mediante il sistema, misurato perpendicolarmente alla superficie topografica;
- I.3. *Peso unità di volume γ_{col}* : peso (in kN/m³) dell'unità di volume della coltre;
- I.4. *Angolo d'attrito ϕ_{col}* : angolo d'attrito (in gradi sessagesimali) del terreno;
- I.5. *Coesione drenata c'_{col}* : coesione drenata (in kPa) del terreno.
- I.6. *Spessore (adimensionalizzato) interessato da moto di filtrazione m* : rappresenta il rapporto $m = S' / S$, dove S' è lo spessore, misurato perpendicolarmente alla superficie di scorrimento, nel quale si verifica un moto di filtrazione con linee di flusso parallele alla superficie stessa ($m = 0$ per falda assente, $m = 1$ per falda al p.c., $0 < m < 1$ per situazioni intermedie).

Substrato

- I.7. *1 = terreno; 2 = roccia*: inserire il valore "1" in caso di substrato costituito da terreno, "2" in caso di substrato costituito da roccia.

Caso 1: terreno

- I.8. *Tensione di aderenza del terreno costituente il substrato ad_{soil}* (in MPa), desumibile da prove di estrazione o, in mancanza di determinazioni dirette, dalla tabella seguente:

TERRENO	Tensione di aderenza unitaria malta-terreno [Mpa]	
	min	max
ROCCIA		
✓ Basalto	5.50	6.00
✓ Calcare	2.80	4.80
✓ Arenaria	1.50	1.70
✓ Dolomite	1.70	1.90
✓ Scisti	0.50	0.70
✓ Scisti alterati	0.30	0.50
✓ Gesso	0.60	0.80
✓ Ardesia	1.60	1.80
SCIOLTO		
✓ Limi argillosi	0.06	0.09
✓ Argilla satura	0.05	0.08
✓ Argilla sabbiosa compatta	0.20	0.40
✓ Sabbia medio fine compatta	0.20	0.60
✓ Argilla medio plastica dura	0.20	0.50
✓ Argilla medio plastica media	0.16	0.29
✓ Sabbia grossa e ghiaia compatta	0.29	0.60

E. Segre, "Proposta di metodo di prove semplici per tiranti di ancoraggio" (Industria Italiana del Cemento 6/88)

I.9. Coefficiente α_{iniez} , che tiene conto delle modalità di iniezione, desumibile dalla tabella seguente:

LITOLOGIA	COEFFICIENTE α			
	Iniezione ripetuta		Iniezione semplice	
	min	max	min	max
✓ Ghiaia	1.8	1.8	1.3	1.4
✓ Ghiaia sabbiosa	1.6	1.8	1.2	1.4
✓ Sabbia ghiaiosa	1.5	1.6	1.2	1.3
✓ Sabbia pulita	1.4	1.5	1.1	1.2
✓ Sabbia limosa	1.4	1.5	1.1	1.2
✓ Limo	1.4	1.6	1.1	1.2
✓ Argilla	1.8	2.0	1.2	1.2
✓ Marne e arenarie alterate e/o fratturate	1.8	1.8	1.1	1.2

Bustamante & Doix (1985)

Caso 2: roccia

I.10. Tensione di aderenza della roccia costituente il substrato ad_{rock} (in MPa), desumibile da prove di estrazione o, in mancanza di determinazioni dirette, dalle tabelle seguenti:

TERRENO		Tensione di aderenza unitaria malta-terreno [Mpa]	
		min	max
ROCCIA			
✓	Basalto	5.50	6.00
✓	Calcere	2.80	4.80
✓	Arenaria	1.50	1.70
✓	Dolomite	1.70	1.90
✓	Scisti	0.50	0.70
✓	Scisti alterati	0.30	0.50
✓	Gesso	0.60	0.80
✓	Ardesia	1.60	1.80
SCIOLTO			
✓	Limi argillosi	0.06	0.09
✓	Argilla satura	0.05	0.08
✓	Argilla sabbiosa compatta	0.20	0.40
✓	Sabbia medio fine compatta	0.20	0.60
✓	Argilla medio plastica dura	0.20	0.50
✓	Argilla medio plastica media	0.16	0.29
✓	Sabbia grossa e ghiaia compatta	0.29	0.60

E. Segre, "Proposta di metodo di prove semplici per tiranti di ancoraggio" (Industria Italiana del Cemento 6/88)

		Tensione di aderenza unitaria [Mpa]		
		min	med	max
✓	Basalto compatto		5.73	
✓	Granito alterato	1.5		2.5
✓	Basalto		3.86	
✓	Granito		4.83	
✓	Serpentino		1.55	
✓	Granito e basalto	1.72		3.10
✓	Scisto		2.80	
✓	Ardesia e argilla scistosa	0.83		1.38
✓	Calcere		2.83	
✓	Creta (Chalk)	0.22		1.07
✓	Calcere argilloso		2.75	
✓	Calcere tenero	1.03		1.52
✓	Calcere dolomitico	1.38		2.07
✓	Arenaria alterata	0.69		0.85
✓	Limo ben cementato		0.69	
✓	Arenaria compatta		2.24	
✓	Arenaria	0.83		1.73
✓	Marna del Keuper	0.17		0.25
✓	Argilla scistosa tenera		0.35	
✓	Argilla tenera e scistosa	0.21		0.83

G. S. Littlejohn, D.A. Bruce "Rock anchors – Design and quality control" (1975)

Parametri sismici

- 1.11. *Coefficiente sismico orizzontale K_h* : tale coefficiente rappresenta il moltiplicatore della massa per ottenere, secondo l'approccio pseudostatico, la forza sismica orizzontale e verticale. Il valore del coefficiente si ricava, secondo la Normativa, in funzione dell'accelerazione massima attesa su sito rigido di riferimento, dipendente, a sua volta, dal tempo di ritorno considerato per l'azione sismica, opportunamente amplificato

attraverso i coefficienti S_s (amplificazione stratigrafica) e S_T (amplificazione topografica). Le forze sismiche sono considerate sempre secondo la direzione più cautelativa (aumento delle sollecitazioni, diminuzione delle resistenze).

Fattore di sicurezza di progetto

- I.12. **FS_{des}** : valore del coefficiente di sicurezza da raggiungere post-intervento. Poiché a tutte le grandezze che entrano in gioco vengono applicati, secondo Normativa, coefficienti parziali amplificativi (per le sollecitazioni) o riduttivi (per le resistenze), a tale variabile può essere attribuito di poco superiore all'unità (es.: 1,05).

Parametri del sistema

Ancoraggi

- I.13. *Dim Y raster I_y* : distanza (in m) in direzione verticale tra due ancoraggi;
- I.14. *Dim X raster I_x* : distanza (in m) in direzione orizzontale tra due ancoraggi;
- I.15. *Inclinazione ancoraggi β* : inclinazione (in °) degli ancoraggi rispetto all'orizzontale;
- I.16. *Lunghezza degli ancoraggi L_a* : lunghezza degli ancoraggi, considerando sia la parte che si sviluppa all'interno della coltre (non collaborante), che quella che si sviluppa nel substrato (collaborante);
- I.17. *Diametro della perforazione D_f* : diametro (in mm) del foro di alloggiamento degli ancoraggi;
- I.18. *Diametro barra ϕ_b* : diametro (in mm) della barra di ancoraggio;
- I.19. *Tensione di snervamento barra f_{yk}* : tensione caratteristica di snervamento (in N/mm²) dell'acciaio costituente la barra (dato fornito dal produttore);
- I.20. *Resistenza cubica a compressione malta R_{bk}* : resistenza caratteristica a compressione (in N/mm²) della malta di iniezione;
- I.21. *Coefficiente aderenza*: coefficiente riduttivo per la tensione tangenziale di aderenza acciaio-calcestruzzo, previsto al punto 4.1.2.1.1.4 delle NTC 2018, pari a 1 per buona aderenza e a 0,7 per non buona aderenza;
- I.22. *Numero di profili di indagine per la definizione dei parametri geotecnici*: numero in base al quale si determinano i fattori di correlazione per derivare la resistenza caratteristica dalle prove geotecniche, secondo Tab. 6.6.III delle NTC 2018.

Rete

- I.23. *Resistenza a trazione unitaria rete $R_{tr_u_rete}$* : resistenza (in kN/m) per metro di larghezza della rete scelta per il consolidamento (dato fornito dal produttore);
- I.24. *Resistenza a punzonamento rete R_{punz}* : resistenza (in kN) a punzonamento della rete scelta per il consolidamento (dato fornito dal produttore);
- I.25. *Coefficiente resistenza rete γ_{rete}* : coefficiente (≥ 1) che l'Utente può applicare per ridurre i valori di resistenza a trazione e a punzonamento della rete forniti dal produttore (non previsto dalle NTC).

ELABORAZIONI

- E.1. *Volume agente V*: volume in (m³) individuato dall'area di influenza del singolo ancoraggio moltiplicata per lo spessore della coltre:

$$V = S i_x i_y;$$

- E.2. *Peso volume W*: peso del volume (in kN) sopra calcolato:

$$W = \gamma_{col} V;$$

- E.3. *Sottospinta idraulica U*: spinta verso l'alto (in kN) esercitata alla base del blocco di terreno in caso di presenza di moto di filtrazione nella coltre, calcolata come:

$$U = \gamma_w S' \cos \alpha i_x i_y$$

- E.4. *Forza sismica orizzontale F_h*: forza sismica (in kN) in direzione orizzontale, ottenuta moltiplicando il coefficiente sismico orizzontale *K_h* per il peso del volume:

$$F_h = K_h W$$

- E.5. *Forza sismica verticale F_v*: forza sismica (in kN) in direzione verticale, ottenuta moltiplicando per 0,5 la forza sismica orizzontale:

$$F_v = 0,5 F_h$$

- E.6. *Forza tangenziale resistente Tres₀*: resistenza (in kN) opposta lungo la superficie di scorrimento, ottenuta come:

$$Tres_0 = c'_{col} i_x i_y + [V (\gamma_{col} - m \gamma_w) \cos \alpha - F_h \sin \alpha - F_v \cos \alpha] \tan \phi_{col}$$

- E.7. *Forza tangenziale agente Tag₀*: forza (in kN) agente lungo la superficie di scorrimento, ottenuta come:

$$Tag_0 = W \sin \alpha + F_h \cos \alpha + F_v \sin \alpha$$

- E.8. *Coefficiente di sicurezza pre-intervento FS₀*: ottenuto come:

$$FS_0 = Tres_0 / Tag_0$$

- E.9. *Forza di trazione A*: sforzo di trazione nell'ancoraggio (in kN) necessario per raggiungere il valore del coefficiente di sicurezza di progetto *FS_{des}*, ottenuto come:

$$A = (FS_{des} Tag_0 - Tres_0) / [\sin (\alpha + \beta) \tan \phi_{col} + FS_{des} \cos (\alpha + \beta)]$$

- E.10. *Sollecitazione di trazione di progetto nell'ancoraggio Ed*: ottenuta moltiplicando il valore di *A* per il coefficiente parziale $\gamma_{Q1} = 1,5$ (caso statico NTC 2018 A1 - 6.2.4.1.1) oppure 1,0 (caso sismico - Tab. 6.2.I e 7.11.1):

$$E_d = \gamma_{Q1} A$$

- E.11. *Sollecitazione di taglio di progetto T_d*: ottenuta moltiplicando il valore di *Tag₀* per il coefficiente parziale $\gamma_{Q1} = 1,5$ o 1,0 (NTC 2018 A1 - 6.2.4.1.1 - Tab. 6.2.I e 7.11.1):

$$T_d = \gamma_{Q1} Tag_0$$

- E.12. *Resistenza massima a trazione barra R_f* : massimo sforzo di trazione (in kN) sopportabile dalla barra in funzione del tipo di acciaio e del diametro scelti, applicando il coefficiente amplificativo γ_f di stato limite ultimo per l'acciaio, pari a 1,15 (NTC 2018 4.1.2.1.1.3):

$$R_f = [f_{yk} (\phi_b^2/4) / \gamma_f] / 1000$$

- E.13. *Resistenza massima a taglio barra T_f* : massimo sforzo di taglio (in kN) sopportabile dalla barra intesa come "chiodo" pari a:

$$T_f = R_f / (3)^{0,5}$$

- E.14. *Resistenza cilindrica a compressione malta f_{ck}* : resistenza (in N/mm²) riferita a provini cilindrici, ottenuta moltiplicando la resistenza cubica per 0,83 (NTC 2018 11.2.10.1);

- E.15. *Resistenza media a trazione malta f_{ctm}* : resistenza media (in N/mm²) a trazione della malta, ottenuta come (NTC 2018 11.2.10.2):

$$f_{ctm} = 0,3 (f_{ck})^{2/3}$$

- E.16. *Resistenza caratteristica a trazione malta f_{ctk}* : resistenza caratteristica (in N/mm²) a trazione della malta, ottenuta come (NTC 2018 11.2.10.2):

$$f_{ctk} = 0,7 f_{ctm}$$

- E.17. *Coefficiente diametro barre η_2* : coefficiente definito al punto 4.1.2.1.1.4 delle NTC 2018 in funzione del diametro delle barre di ancoraggio, pari a 1,0 per barre di diametro $\phi_b \leq 32$ mm e pari a $(132 - \phi_b)/100$ per barre di diametro superiore;

- E.18. *Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza f_{bk}* : resistenza tangenziale malta/barra (in N/mm²), data da (NTC 2018 4.1.2.1.1.4):

$$f_{bk} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctk}$$

- E.19. *Resistenza tangenziale di aderenza di progetto f_{bd}* : resistenza tangenziale di progetto per l'aderenza malta/barra (in N/mm²), data da (NTC 2018 4.1.2.1.1.4):

$$f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c$$

con $\gamma_c = 1,5$ coefficiente parziale per il calcestruzzo (NTC 2018 4.1.2.1.1.1);

- E.20. *Resistenza allo sfilamento barra/malta R_{bm}* : resistenza massima allo sfilamento (in kN) della barra dalla malta di iniezione, ottenuta come:

$$R_{bm} = f_{bd} S_{lat_bar}$$

dove la superficie laterale della barra è data da:

$$S_{lat_bar} = \pi \phi_b L_{tot}$$

(nell'ipotesi che la perforazione sia iniettata per tutta la sua lunghezza)

- E.21. *Lunghezza ancoraggio non collaborante L_{nc}* : parte dell'ancoraggio (in m) che si sviluppa nella coltre e non considerata ai fini della verifica a sfilamento bulbo/substrato, calcolata come:

$$L_{nc} = S / \text{sen} (\alpha + \beta)$$

E.22. *Lunghezza ancoraggio collaborante (bulbo) L_{bulb}* : parte dell'ancoraggio (in m) che si sviluppa nel substrato e considerata ai fini della verifica a sfilamento bulbo/substrato, calcolata come:

$$L_{bulb} = L_{tot} - L_{nc}$$

E.23. *Aderenza media bulbo/substrato τ_{sub}* : valore (in MPa) dell'aderenza tra il bulbo e il substrato:

In caso di substrato costituito da terreno (I.7 = 1):

$$\tau_{sub} = \alpha_{iniez} \mathbf{ad}_{soil}$$

In caso di substrato costituito da roccia (I.7 = 2):

$$\tau_{sub} = \mathbf{ad}_{rock}$$

E.24. *Coefficiente riduttivo verticali investigate ξ_{a4}* : coefficiente ricavato dalla Tab. 6.6.III delle NTC 2018 in funzione del numero dei profili di indagine per la definizione dei parametri geotecnici:

Tab. 6.6.III

Numero di profili di indagine	1	2	3	4	≥ 5
ξ_{a3}	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
ξ_{a4}	1,80	1,70	1,65	1,60	1,55

E.25. *Coefficiente riduttivo ancoraggi permanenti γ_{Rap}* : coefficiente ricavato dalla Tab. 6.6.I delle NTC 2018:

Tab. 6.6.I - Coefficienti parziali per la resistenza degli ancoraggi

	Simbolo	Coefficiente parziale
Temporanei	γ_R	1,1
Permanenti	γ_R	1,2

E.26. *Resistenza allo sfilamento bulbo/substrato R_{bulb}* : resistenza massima allo sfilamento (in kN) del bulbo di fondazione dal substrato, ottenuta considerando solo la parte dell'ancoraggio (diametro perforazione D_f in mm) che si sviluppa nel substrato L_{bulb} (in m, trascurando la lunghezza che si sviluppa nella coltre, non collaborante), applicando i coefficienti di Normativa per ancoraggi permanenti e per le verticali investigate:

$$R_{bulb} = (\tau_{sub} L_{bulb} \pi D_f) / \xi_{a4} / \gamma_{Rap}$$

E.27. *Resistenza a punzonamento rete di progetto R_{punz_des}* : (in kN) ottenuta dividendo il valore della resistenza a punzonamento R_{punz} per il coefficiente di resistenza della rete γ_{rete} :

$$R_{punz_des} = R_{punz} / \gamma_{rete}$$

E.28. *Resistenza a trazione rete di progetto* $R_{tr\ rete_des}$: resistenza della rete (in kN) ottenuta moltiplicando il valore della resistenza a trazione unitaria della rete $R_{tr_u_rete}$ per il valore dell'interasse orizzontale del raster I_x e dividendo per il coefficiente di resistenza della rete γ_{rete} :

$$R_{tr\ rete} = R_{tr_u_rete} I_x / \gamma_{rete}$$

OUTPUT

Viene fornito l'incremento del valore del coefficiente di sicurezza e vengono condotte le verifiche di sicurezza valutando, per ogni meccanismo, la condizione:

$$E_d < R_d$$

Viene, inoltre, per ogni meccanismo analizzato, fornito il valore del coefficiente di sicurezza FS definito come:

$$FS = R_d / E_d$$

R.1. *Incremento del coefficiente di sicurezza* ΔFS : ottenuto come differenza tra il valore del coefficiente di sicurezza pre-intervento FS_0 e il valore del coefficiente di sicurezza di progetto FS_{des} :

$$\Delta FS = FS_{des} - FS_0$$

R.2. *Trazione barra*: si confronta lo sforzo di trazione E_d con la resistenza a trazione della barra R_f ;

R.3. *Taglio barra*: si confronta lo sforzo di taglio T_d con la resistenza a taglio della barra T_f ;

R.4. *Sfilamento barra/malta*: si confronta lo sforzo di trazione E_d con la resistenza allo sfilamento barra/malta R_{bm} ;

R.5. *Sfilamento bulbo/substrato*: si confronta lo sforzo di trazione E_d con la resistenza allo sfilamento bulbo/substrato R_{bulb} ;

R.6. *Punzonamento rete*: si confronta lo sforzo di trazione E_d con la resistenza al punzonamento della rete R_{punz_des} ;

R.7. *Trazione rete*: si confronta lo sforzo di taglio T_d con la resistenza alla trazione della rete R_{tr_rete} : (in questo caso, si ipotizza che tutta la sollecitazione di taglio debba essere assorbita dalla rete, la quale reagisce attraverso la propria resistenza a trazione).

Viene, infine, condotto un calcolo di massima sulle quantità riferite agli ancoraggi per ogni 100m² di rete:

R.8. *Numero di ancoraggi* N_{tot} : numero di ancoraggi per ogni 100m² di rete, ottenuto come:

$$N_{tot} = 100 / (i_x i_y)$$

R.9. *Lunghezza totale delle perforazioni* L_{tot} : lunghezza delle perforazioni per ogni 100m² di rete, ottenuto come:

$$L_{tot} = N_{tot} L_a$$