

Insegnamento di **Progetto di Infrastrutture viarie**

Opere in terra

Caratteristiche di un terreno
Compressibilità e costipamento delle terre
Portanza sottofondi e fondazioni stradali
Instabilità del corpo stradale

Soprastrutture

Materiali stradali
Soprastruttura flessibili
Cenni di calcolo delle soprastrutture

Intersezioni e Impianti stradali

Intersezioni a raso e a livelli sfalsati
Aree di sosta

Muri di sostegno (1)

Vari sono le tipologie di muri che possono variare a seconda della forma o delle caratteristiche strutturali.

Si distinguono:

- *Muri a gravità (figura 1)*. Utilizzano il loro peso proprio per contrastare la spinta del terreno, vengono realizzati in muratura o in calcestruzzo non armato ed utilizzati per altezze limitate (generalmente inferiori ai 3 m).
- *Muri a sbalzo o a mensola (figura 2)*. Sono caratterizzati da una suola di fondazione, in cui è inserita una parete verticale, che permette di sfruttare il peso del rinterro che si scarica su tale suola per aiutare ad equilibrare la spinta del terreno. Sono realizzati in cemento armato per disporre della necessaria resistenza a flessione e a taglio ed utilizzati per altezze non superiori ai 7 m.
- *Muri a speroni (figura 3)*. Sono simili ai muri a parete verticale con mensola di fondazione, con l'aggiunta di setti triangolari o trapezoidali, detti *speroni*, posti ortogonalmente rispetto alla parete verticale ed insieme alla soletta di base contrastano le spinte del terreno. Vengono impiegati per altezze superiori ai 7 m.

(1) S. Cascio, “ Muri di sostegno - Dalla teoria all'esecutivo di cantiere ”, D, Flaccovio Editore, Palermo, 2003.

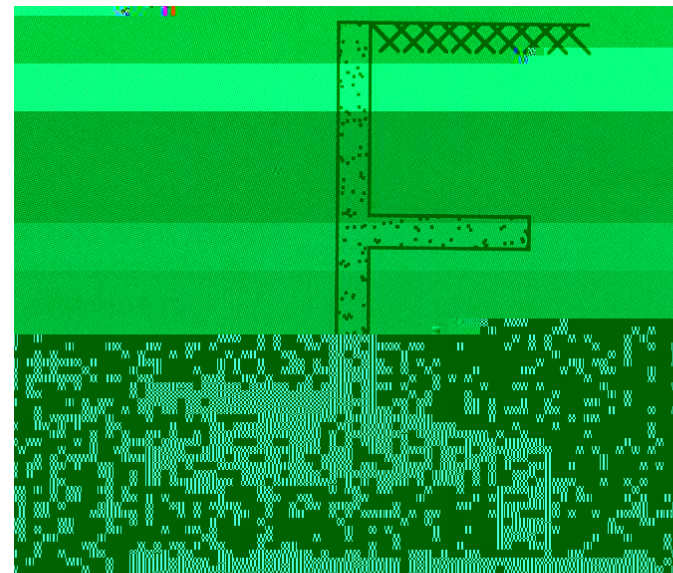
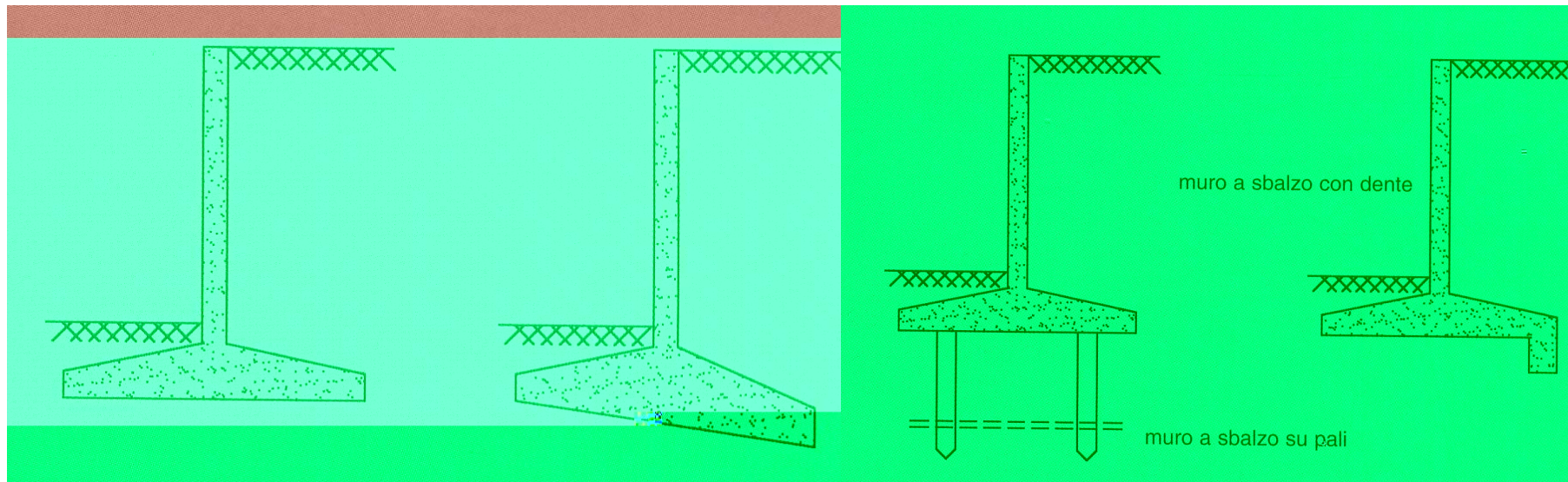
Progetto di Infrastrutture viarie

Muri a gravità



Scarpa esterna e	Scarpa interna i	Altezza h cui corrisponde lo spessore minimo in sommità m	Spessore s in sommità per altezze h	
			uguali o minori di h m	maggiori di h m
0,00	0,00	1,50	0,60	0,40 h
	0,10	2,00	0,60	0,30 h
	0,20	2,50	0,60	0,24 h
10	0,00	2,40	0,65	0,27 h
	0,10	3,00	0,65	0,18 h
	-0,10	3,00	0,60	0,20 h
20	0,00			

Muri a sbalzo o a mensola



Progetto di Infrastrutture viarie

Muri a speroni



Progetto di Infrastrutture viarie

Aspetti realizzativi

La realizzazione dei muri di sostegno richiede l'adozione di *rinterri* e *drenaggi*.

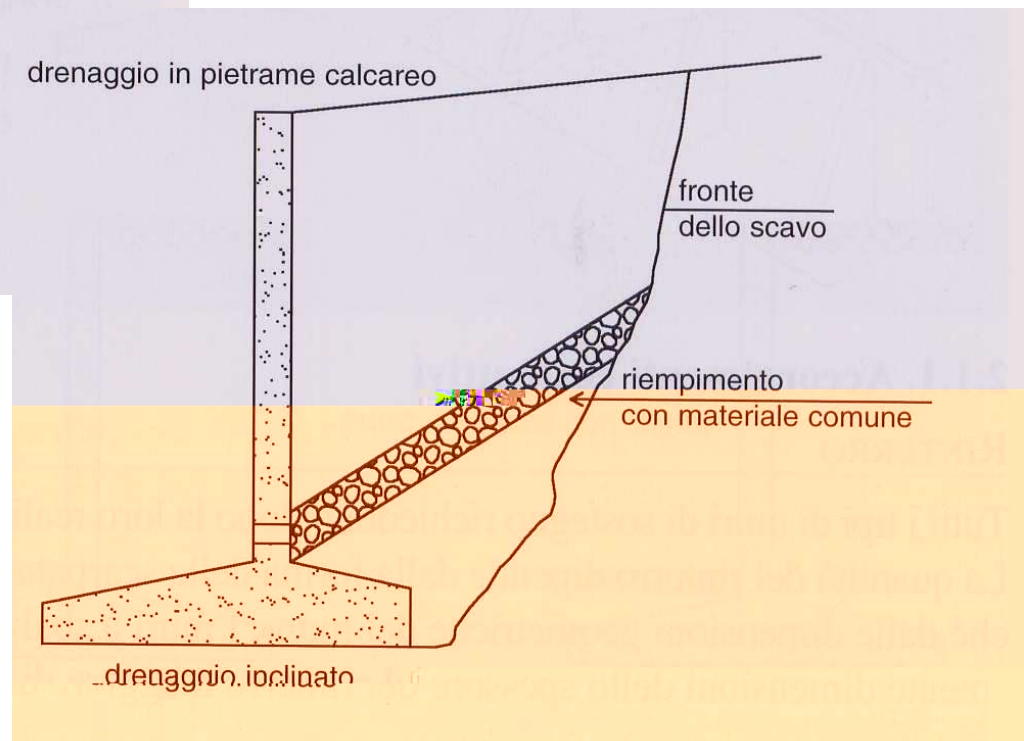
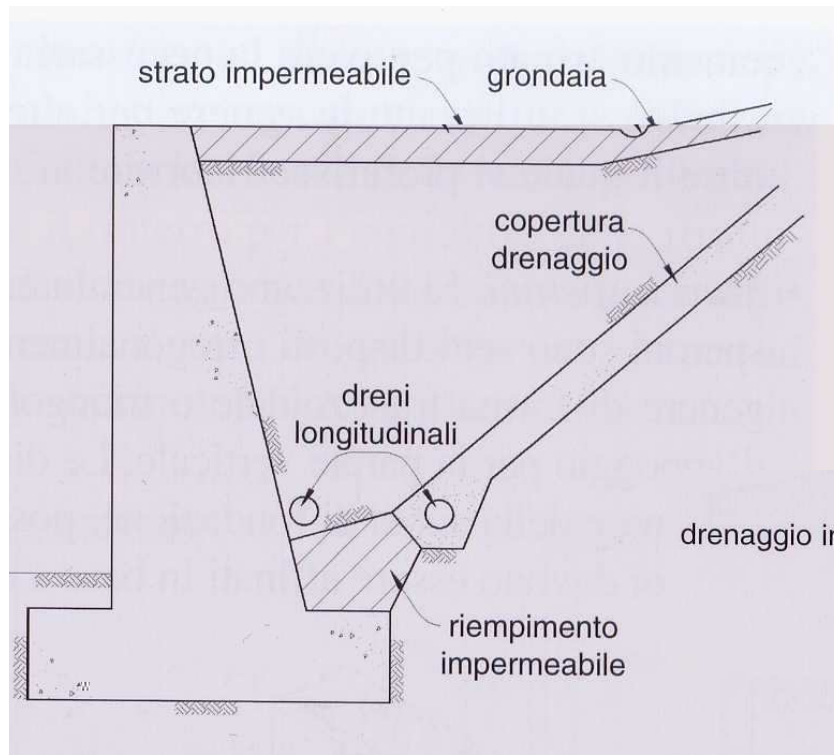
Tutti le tipologie di muri prima illustrate necessitano, dopo la loro realizzazione, un rinterro a monte del muro costituito da materiale la cui qualità dipende dalla forma della scarpata e dalle dimensioni geometriche del muro. Lo spessore del rinterro invece dipende dalla tipologia del muro: spessori maggiori sono richiesti per muri a sbalzo, mentre per muri a gravità lo spessore del rinterro è minore.

Si ricorda che la presenza di acqua a monte del muro contribuisce ad aumentare la pressione laterale sul muro stesso: é quindi necessario predisporre un idoneo sistema di drenaggio. La scelta del tipo di drenaggio più idoneo è da porsi in relazione con: il tipo di terreno da contenere, le precipitazioni atmosferiche, la presenza di falda idrica e la possibilità che si formi ghiaccio. La mancanza di un efficiente sistema di drenaggio è concausa di crolli di muri sostegno (nel 33 % dei casi). Di qui la necessità, come illustrato nelle figure: 4 e 5 di:

- rendere impermeabile, per quanto possibile, il piano superiore del terrapieno per evitare infiltrazioni di acque meteoriche,
- predisporre un drenaggio inclinato per ridurre al minimo la sovrappressione idrostatica,
- utilizzare materiale permeabile per la parte di rinterro a contatto con il muro.

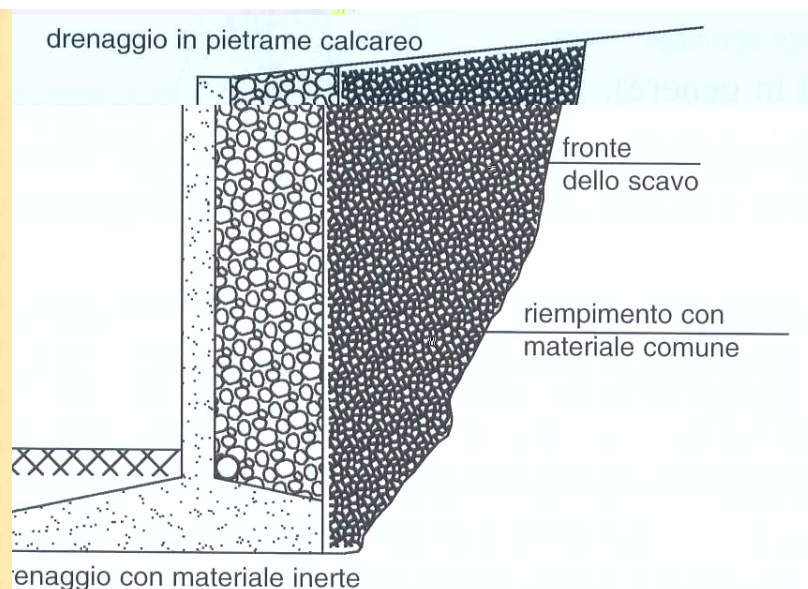
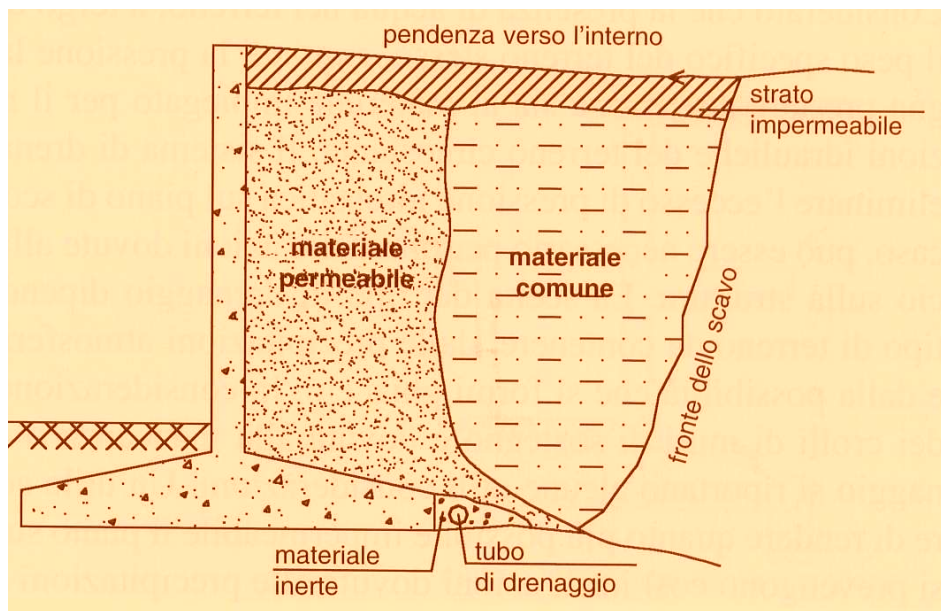
Progetto di Infrastrutture viarie

Esempi di rinterri e drenaggi



Realizzazione dei drenaggi

Per la realizzazione dei drenaggi di solito si utilizza materiale lapideo grossolano collocato con cura a monte del muro. Più in generale un buon drenaggio è costituito da materiali permeabili di opportuna granulometria e da un sistema di tubazioni, per l'allontanamento dell'acqua, di adeguata sezione e pendenza tali da favorire l'allontanamento, non solo dell'acqua, ma anche dei sedimenti, come illustrato dalle figure 6 e 7 .



Normativa italiana vigente

Il D.M. 11 marzo 1988 “ Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno e delle opere di fondazione “ unitamente al D.M. 16 gennaio 1996 relativo alla progettazione in zona sismica di muri di sostegno, costituiscono la normativa di riferimento in vigore.

Criteria di calcolo

Si ricorda che le opere di sostegno servono a sostenere le pareti degli scavi quando, per ragioni di spazio o di costo dei terreni, non si possono adottare scarpate naturali o a sostenere altre opere, tra cui le infrastrutture di trasporto.

Per la realizzazione di un muro di sostegno si deve in primo luogo effettuare lo scavo, poi si costruisce il muro ed infine si rinterra la parte a monte (rinfiante) compresa tra il muro e il terrapieno o fronte di scavo.

A questo scopo occorre quindi conoscere le seguenti informazioni:

- parametri geotecnici del terreno interessato all'opera: ϕ , c , γ ;
- condizioni di carico e dimensionamento di massima dell'opera;
- norme vigenti;
- costo dell'opere e di eventuali soluzioni alternative;
- calcolo particolareggiato dell'opera prescelta ed eventuali variazioni in corso d'opera eventualmente necessarie.

Il calcolo di un muro di sostegno viene eseguito prendendo in considerazione le forze agenti un istante prima del collasso per ribaltamento o per scorrimento.

Sistema di forze

Il sistema di forze che agiscono sui muri di sostegno, come riportato in figura 8, sono date dalla spinta attiva P_a , dal peso del manufatto W , dalla reazione verticale del terreno N e dalla resistenza allo scorrimento T .

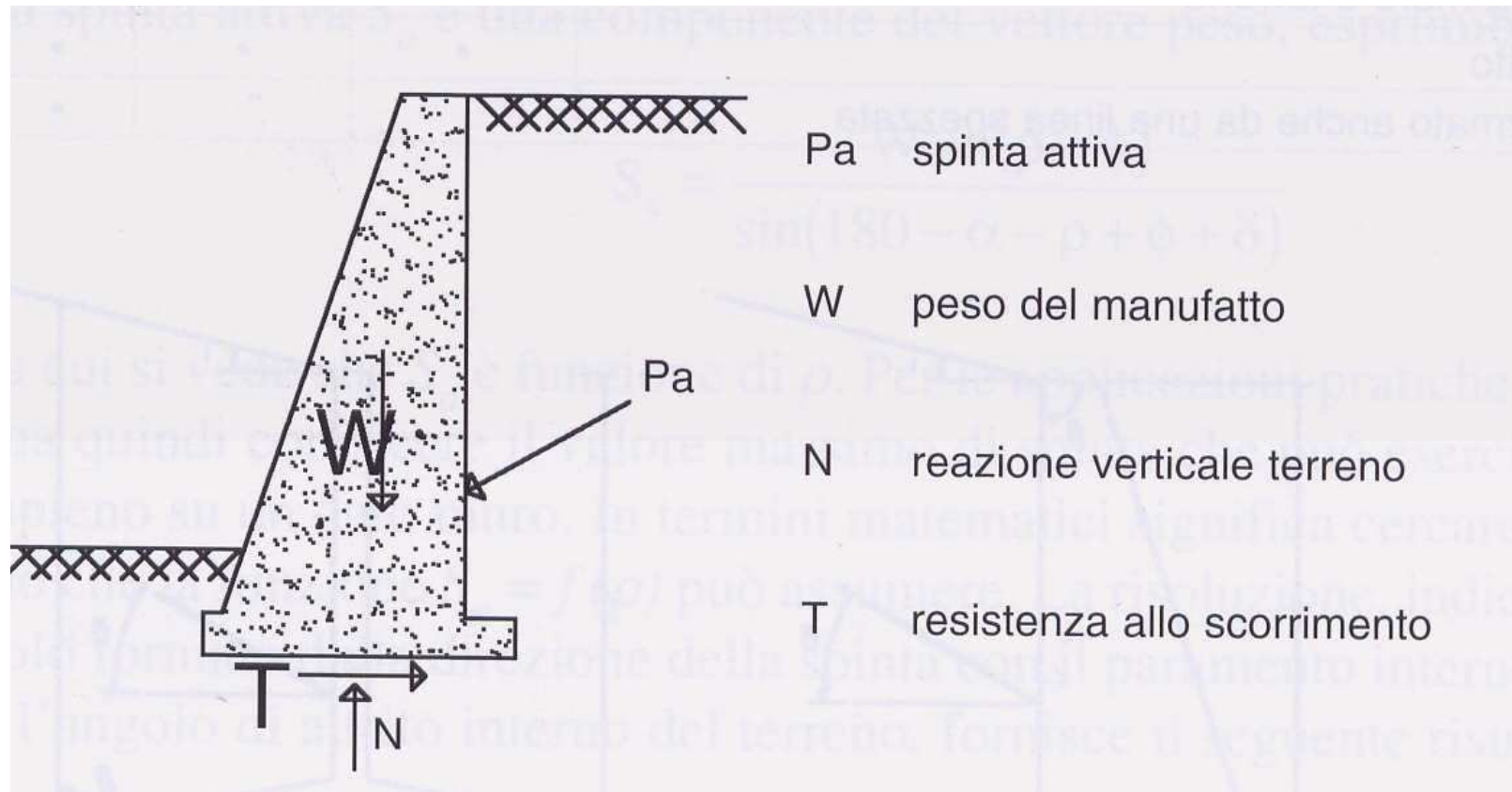
La reazione verticale del terreno N contrasterà il peso del manufatto W a cui va sommata la componente verticale della spinta attiva P_a ; la resistenza allo scorrimento T , che si sviluppa alla base del muro, contrasterà invece la componente orizzontale della spinta attiva per evitare che il muro si sposti verso l'esterno.

La spinta attiva inoltre tende a far ribaltare il muro intorno al piede, mentre il peso e la componente verticale della spinta attiva si oppongono a tale ribaltamento.

Il problema richiede di conoscere intensità, direzione e verso di tutte queste grandezze in gioco. Si ricorda che l'entità della spinta dipende, oltre che dal tipo di terreno, anche dalle modalità del rinfianco; per la sua determinazione occorre distinguere ammassi privi di coesione da quelli coesivi.

Il problema viene risolto introducendo l'ipotesi dell'esistenza di uno stato limite inferiore rappresentato dal piano di scorrimento lungo il quale le forze di taglio agenti sono eguali alla resistenza a taglio del materiale.

Forze agenti in un muro di sostegno



Metodi di calcolo per terreni privi di coesione

I metodi per il calcolo delle opere di sostegno in terreni privi di coesione, si avvalgono delle teorie di Coulomb, Rankine e Résal.

Tali teorie si basano sulle seguenti ipotesi come riportato nella seguente tabella:

Ipotesi di calcolo	Coulomb	Rankine	Résal
Terreno non coesivo, omogeneo ed isotropo, dotato di solo attrito interno	•	•	•
Scorrimento lungo un piano passante per il piede del muro	•	•	•
Distribuzione lineare della spinta lungo la parete del muro	•	•	•
Presenza di attrito fra muro e terreno	•	•	•
Profilo terrapieno retto	•	•	•
Profilo terrapieno formato anche da una linea spezzata			•

Teoria di Coulomb (2)

Tale metodo parte dal presupposto che quando un muro non resiste all'azione della spinta attiva cade trascinando un cuneo di terra, detto *cuneo di spinta*, che scorre lungo un piano inclinato (vedere figura 9). Tale cuneo, nell'istante in cui scorre, è considerato monolitico e, per effetto del peso proprio, scorre, sia lungo il suo piano di scorrimento, sia lungo il paramento interno del muro.

Per un terreno non coesivo e con riferimento alla figura 10, attraverso semplici considerazioni è possibile esprimere la spinta attiva R come funzione di β :

$$R = f(\beta)$$

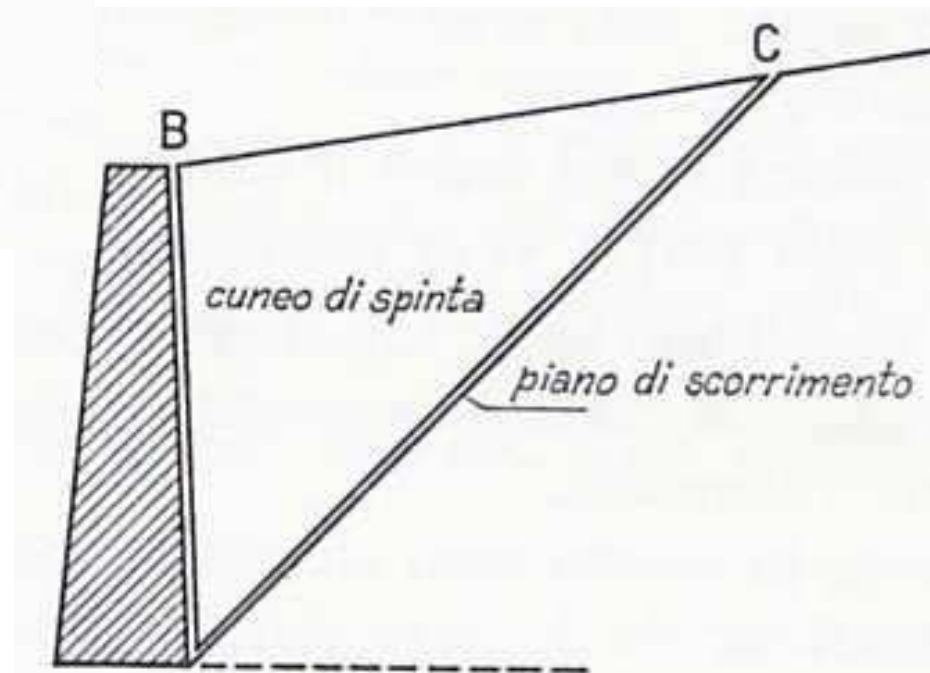
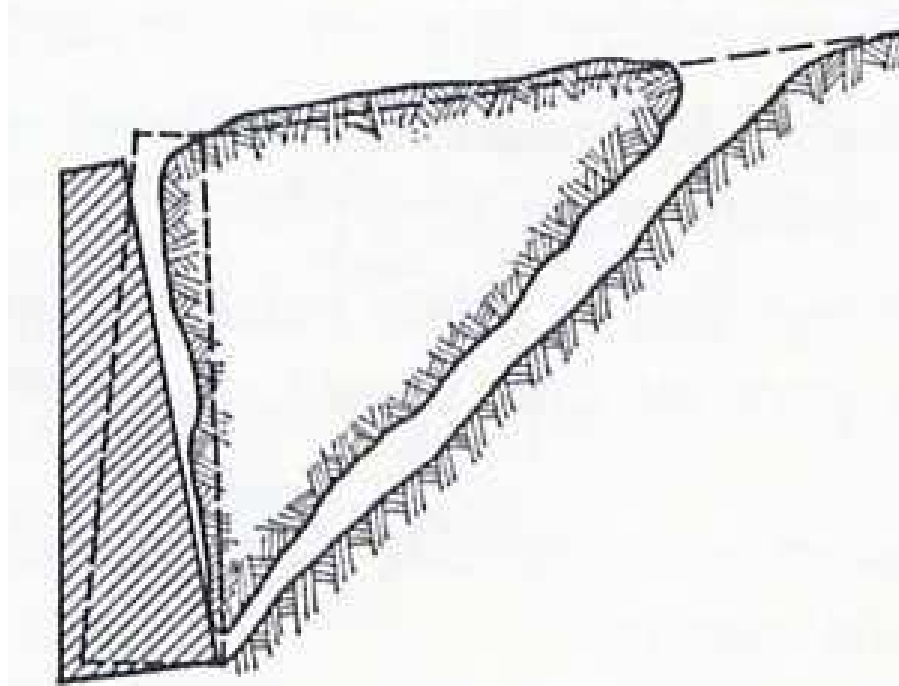
Il valore massimo di spinta R_{\max} che può esercitare un dato terreno su un dato muro è quindi il valore massimo assunto dalla funzione $R = f(\beta)$ e la soluzione fornisce il seguente risultato:

$$R = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_a$$

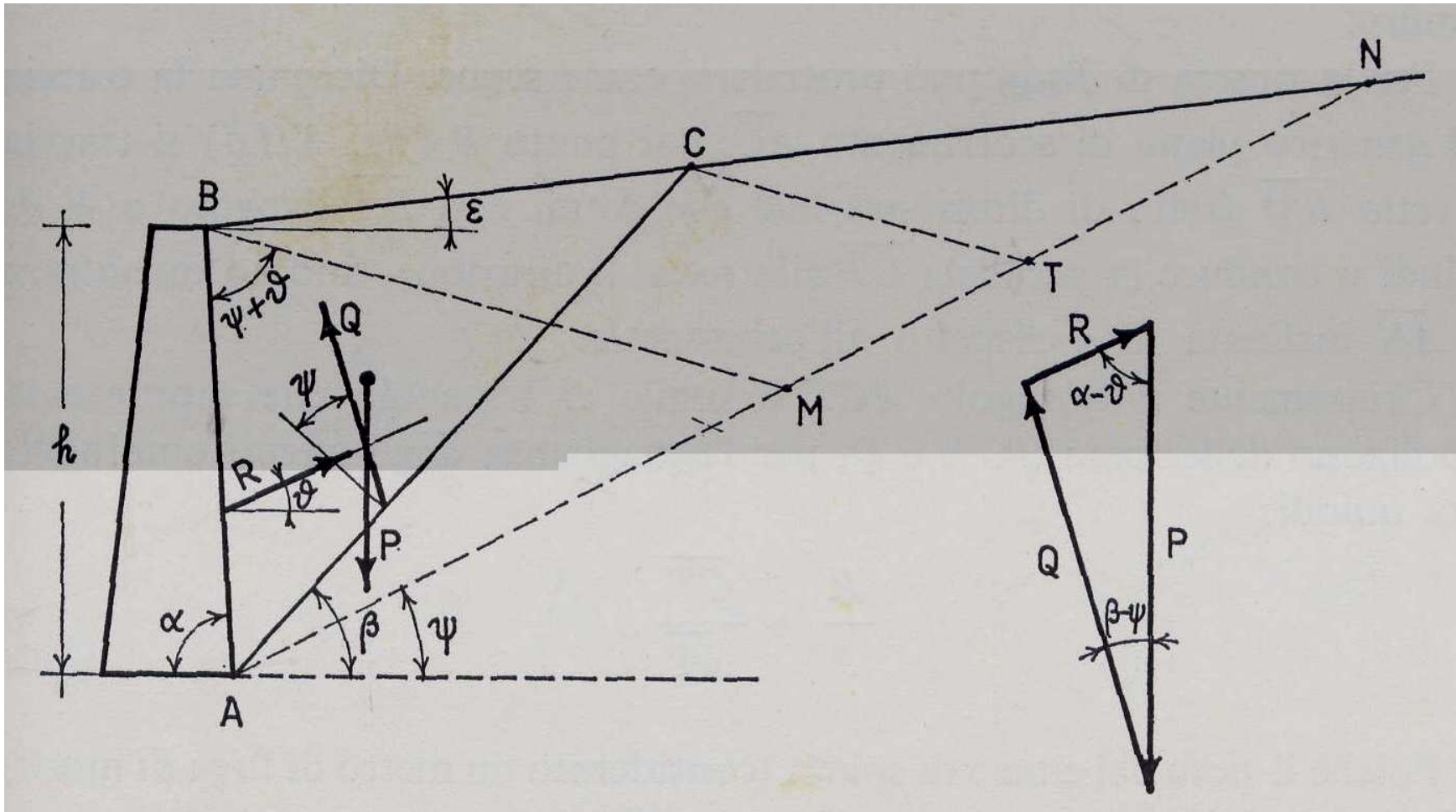
Dove: γ è il peso specifico del terreno, h è l'altezza del muro e K_a è una funzione che dipende dai parametri α , ε , θ e φ .

⁽²⁾ G. Tesoriere “ Strade Ferrovie Aeroporti”, Vol. I, UTET, Torino, 1974.

Ipotesi di Coulomb



Progetto di Infrastrutture viarie
Forze agenti nel metodo di Coulomb



Teoria di Rankine (2)

Tale metodo considera anch'esso un ammasso di materiale incoerente limitato da un piano; la spinta S sul paramento interno del muro (verticale), come riportato in figura 11, se la superficie dell'ammasso è orizzontale, e senza sovraccarico, risulta applicata ad $h/3$ dalla base del muro e vale:

$$S = \frac{1}{2} \gamma h^2 \tan^2 (45^\circ - \psi/2).$$

La spinta dovuta ad un eventuale sovraccarico p , se con $h' = p/\gamma$ si indica l'altezza fittizia di terra che determina la pressione p e se ci si trova nelle stesse precedenti condizioni, risulta applicata ad $h/2$ dalla base e pari a :

$$S_p = \gamma h h' \tan^2 (45^\circ - \psi/2).$$

Pertanto la spinta totale S_t sarà la risultante di S e S_p .

Nel caso in cui il piano di estradosso del terrapieno è inclinato di ε rispetto all'orizzontale, la spinta sul paramento interno del muro (verticale) è data dalla seguente espressione:

$$= \frac{1}{2} \gamma h^2 \cos \varepsilon \frac{\cos \varepsilon - \sqrt{\cos^2 \varepsilon - \cos^2 \psi}}{\cos \varepsilon + \sqrt{\cos^2 \varepsilon - \cos^2 \psi}}.$$

⁽²⁾ G. Tesoriere “ Strade Ferrovie Aeroporti”, Vol. I, UTET, Torino, 1974.

Teoria di Résal (2)

Tale teoria considera invece l'equilibrio interno di un ammasso incoerente limitato da due superfici piane: una rappresentata dalla piano superiore dell'ammasso e l'altra dal paramento interno del muro.

Il calcolo della spinta viene determinato calcolando le componenti orizzontale Q e verticale V della spinta mediante le seguenti espressioni:

$$Q = \gamma (A/1000) (h^2 /2) \quad e \quad V = \gamma (B/1000) (h^2 /2), \text{ dove:}$$

A e B sono dei coefficienti elaborati dallo stesso Résal che dipendono da:

- ψ è l'angolo d'attrito interno del terreno,
- ε è l'angolo che l'estradosso del terrapieno forma con l'orizzontale,
- α è l'angolo che il paramento interno del muro forma con l'orizzontale.

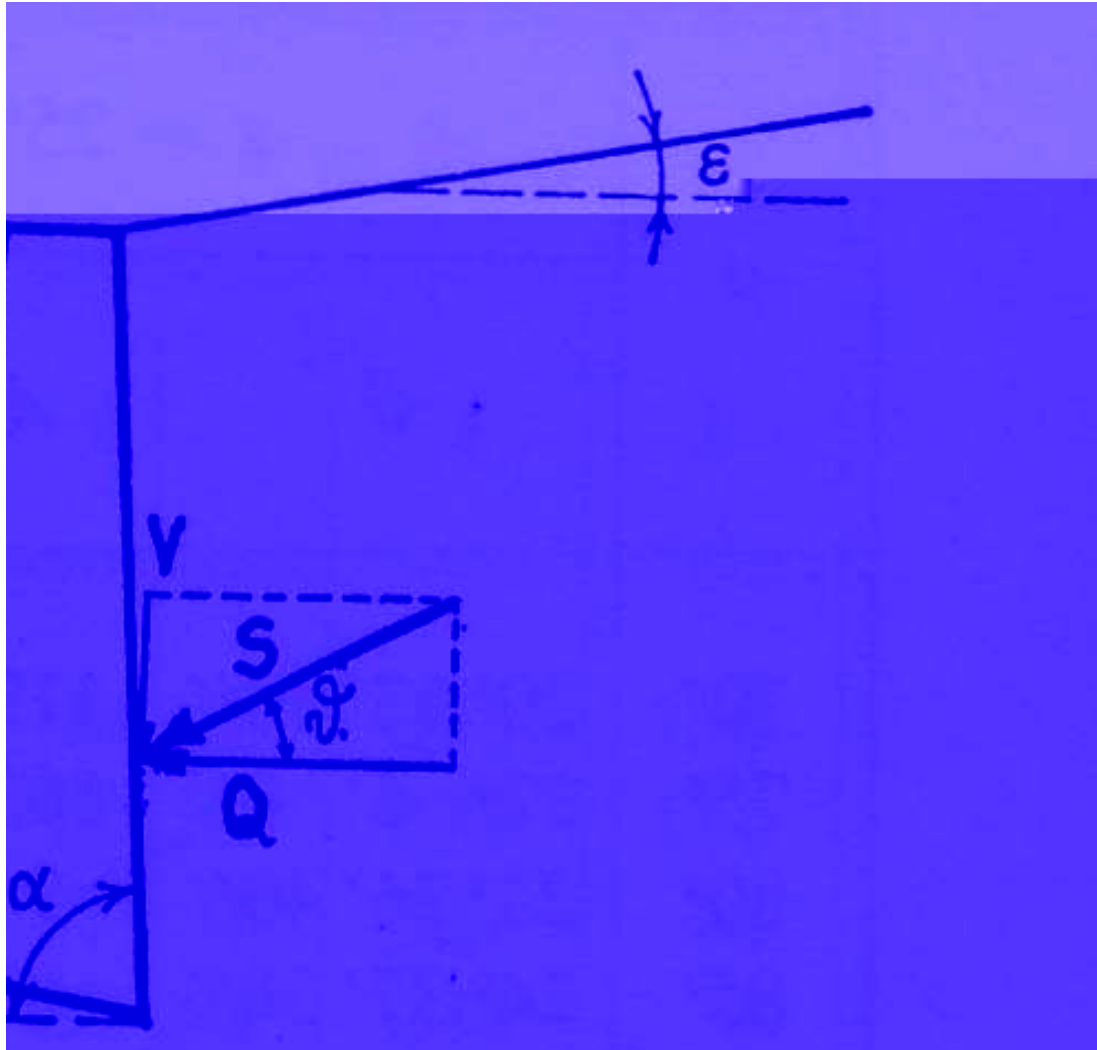
La spinta S è data da:

$$S = \sqrt{Q^2 + V^2} .$$

Noti i valori A e B , è pure noto il valore di θ cioè dell'angolo che la S forma con l'orizzontale, come riportato in figura 12.

⁽²⁾ G. Tesoriere “ Strade Ferrovie Aeroporti”, Vol. I, UTET, Torino, 1974.

Spinte secondo Résal



Metodi di calcolo per terreni coesivi

Il Résal sostiene che nel calcolo della spinta non può essere trascurato l'effetto della coesione, ricordando che essa è molto variabile con il contenuto d'acqua.

Per tener conto della coesione nel calcolo della spinta, occorre far riferimento al *teorema di Caquot* o *teorema degli stati corrispondenti*.

Un ammasso di terra, di coesione c ed attrito interno ψ , è in equilibrio se può essere sostituito da un altro ammasso pulverulento, anch'esso in equilibrio, situato nello stesso spazio, dotato dello stesso coefficiente di attrito interno ($\tan \psi$) e sollecitato lungo le pareti che lo delimitano dalle stesse azioni dell'ammasso coerente, aumentate della pressione idrostatica:

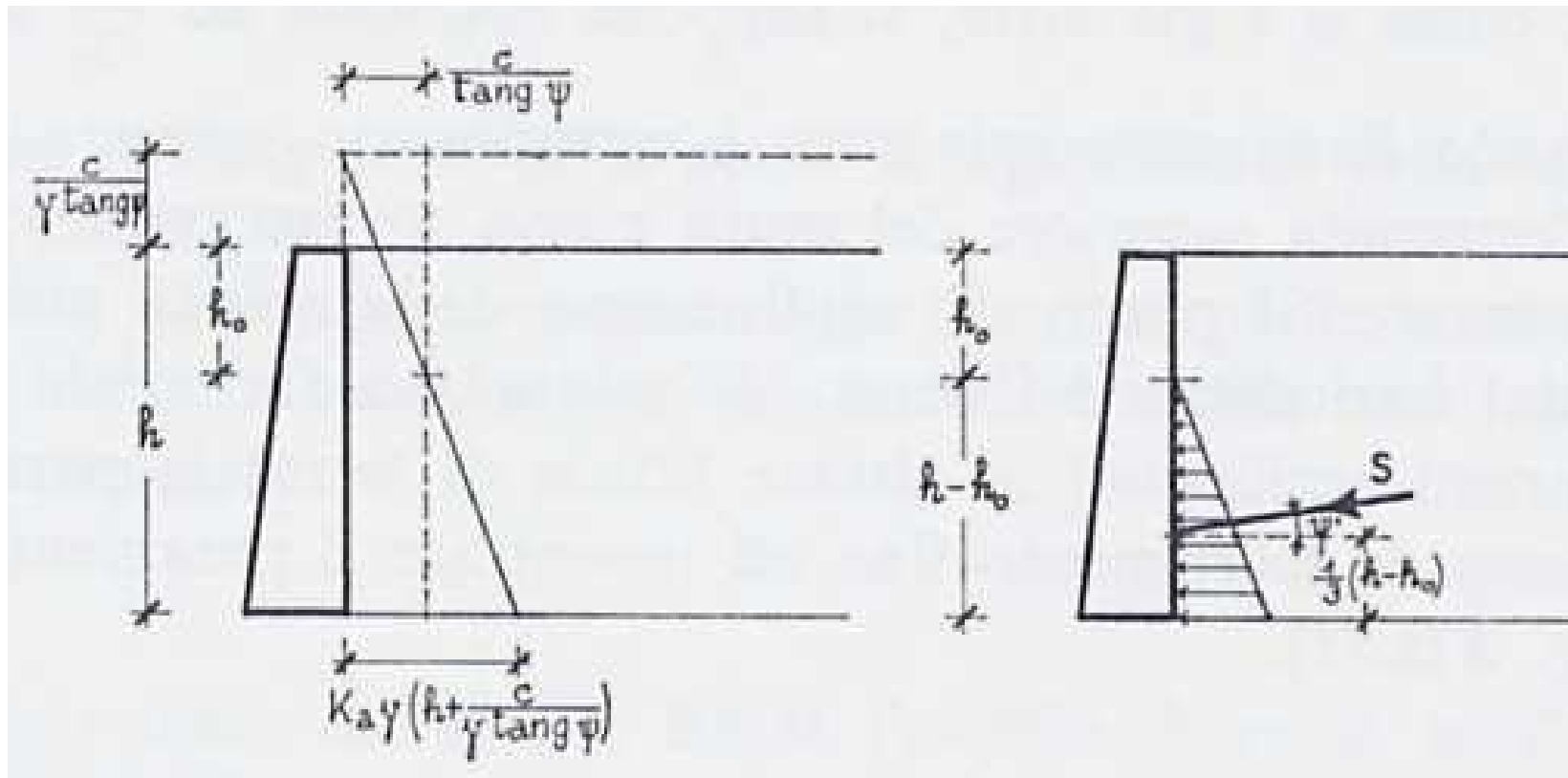
$$p = c / \tan \psi$$

Per un muro a paramento interno comunque inclinato, che sostenga un terrapieno con estradosso orizzontale, per il teorema degli stati corrispondenti, se il terreno è dotato di solo attrito, si può considerare la parte superiore del terrapieno sollecitata dalla pressione idrostatica $p = c / \tan \psi$ dove c rappresenta la coesione e ψ è l'attrito interno del terreno.

In altri termini è come se agisse un sovraccarico addizionale di terra di altezza $p / \gamma = c / \gamma \tan \psi$, dove γ è il peso specifico del terreno.

Progetto di Infrastrutture viarie
Spinta nei terreni coesivi

Come riportato nella figura 13, risulta che uno strato di terrapieno di altezza h_0 risulta non spingente e di conseguenza il punto di applicazione della spinta S rispetto a quello per terreni non coesivi è posto a $1/3 (h-h_0)$.



Progetto di Infrastrutture viarie

Valori di ψ , c e γ per alcuni terreni

TERRENI	ψ [°]	c [kg/m ²]	γ [kg/m ³]
<i>Terreno sabbioso compattato</i>	<i>32 ÷ 35</i>	<i>0</i>	<i>da 1600 a 1800</i>
<i>Sabbia sciolta a spigoli arrotondati</i>	<i>28 ÷ 32</i>	<i>0</i>	<i>da 1350 a 1450</i>
<i>Sabbia limosa compattata</i>	<i>27 ÷ 30</i>	<i>2000</i>	<i>da 1700 a 2000</i>
<i>Sabbia argillosa compattata</i>	<i>25 ÷ 30</i>	<i>3000</i>	<i>da 1650 a 1950</i>
<i>Argilla sabbiosa umida</i>	<i>15 ÷ 20</i>	<i>da 500 a 1500</i>	<i>da 1400 a 1700</i>
<i>Argilla molle</i>	<i>0 ÷ 5</i>	<i>da 200 a 700</i>	<i>da 1350 a 1600</i>

Considerazioni generali sul calcolo (2)

I muri di sostegno sono strutture soggette al peso proprio, alla spinta del terreno e di eventuali sovraccarichi. Sono quindi sollecitati a pressoflessione e non è escluso il taglio.

Quasi sempre il calcolo, fissate le dimensioni del muro in base all'esperienza, consiste in una verifica.

Le verifiche di stabilità richieste, per muri a gravità in muratura o in calcestruzzo, sono:

Verifica allo schiacciamento

Verifica allo scorrimento

Verifica al ribaltamento

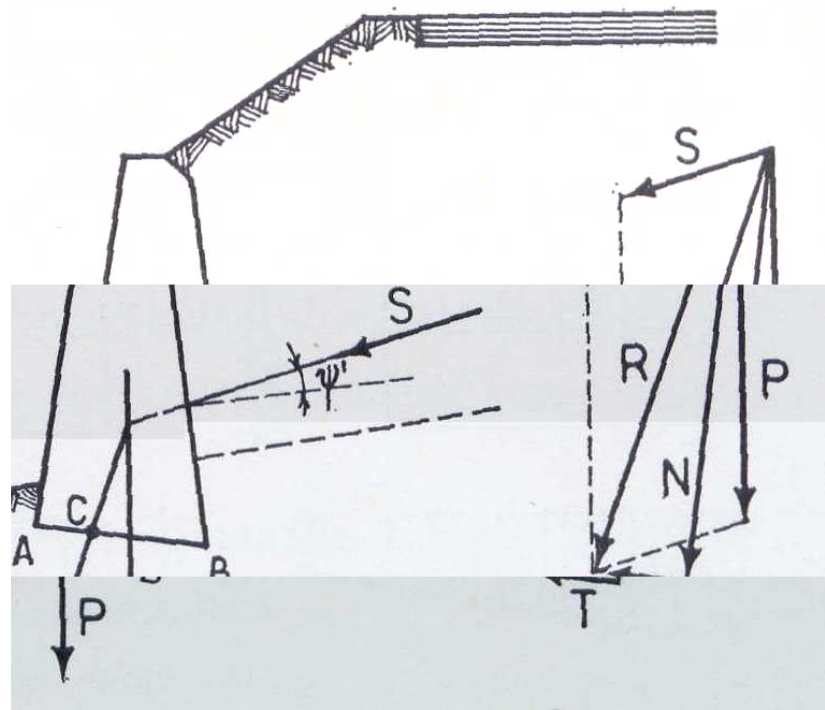
⁽²⁾ G. Tesoriere “ Strade Ferrovie Aeroporti”, Vol. I, UTET, Torino, 1974.

Verifica allo schiacciamento

Note le dimensioni del muro, si considera un tratto di esso lungo 1 m. Sia P il peso del muro applicato nel baricentro G ed S la spinta di cui si conosce il valore e la direzione per quanto detto in precedenza.

Come indicati dalla figura 14 occorre determinare il *centro di sollecitazione* C alla base del muro:

- occorre trovare la risultante R di S e di P ,
- tale risultante R avrà una componente normale N alla base $AB = l$ del muro ed una componente T secondo AB ,
- dal punto d'incontro di S e P si tracci la parallela ad R : il punto d'intersezione tra essa e la base AB individua il punto di sollecitazione C cercato.



Si deve ora considerare come si colloca tale centro di pressione C , rispetto al nocciolo centrale d'inerzia: se è interno o coincidente con uno dei suoi estremi o se è esterno ad esso, ma interno alla sezione.

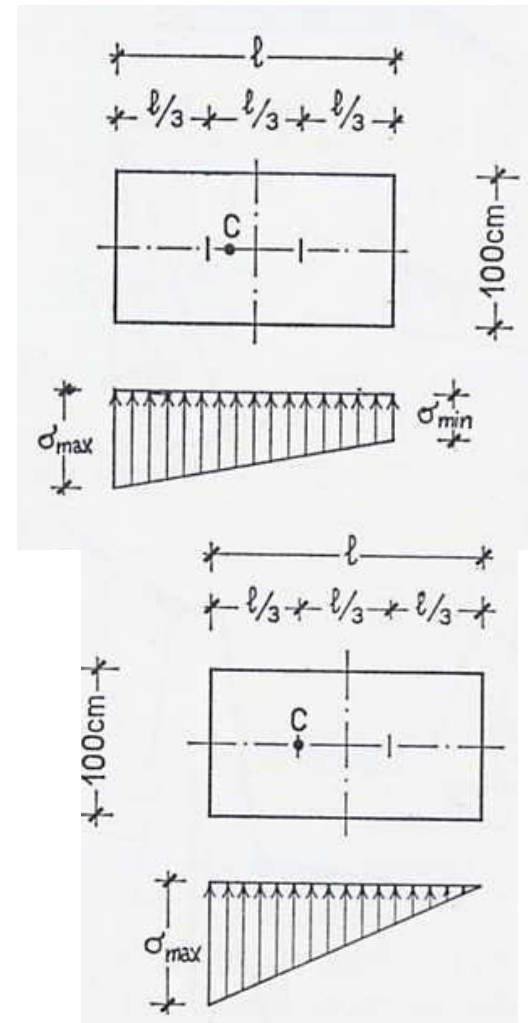
Centro di sollecitazione **C** interno al nocciolo centrale d'inerzia

Indicata con e l'eccentricità, cioè la distanza del centro di sollecitazione C dal baricentro della sezione, la sezione, come in figura 15, è tutta sollecitata a compressione e quindi il diagramma delle σ è trapezoidale e la sollecitazione, massima verso il bordo esterno e minima verso quello interno, vale:

$$\sigma = (N / 100 I) [1 \pm (6 e / I)]$$

Se il centro di sollecitazione C coincide con uno dei due estremi del nocciolo il diagramma delle sollecitazioni diventa triangolare con $\sigma_{min} = 0$ verso il bordo interno e $\sigma_{max} = 2 N / 100 I$ verso il bordo esterno.

Tale distribuzione delle tensioni è quella che deve ottenersi onde evitare che vi siano zone della sezione in cui si abbiano sollecitazioni a trazione.

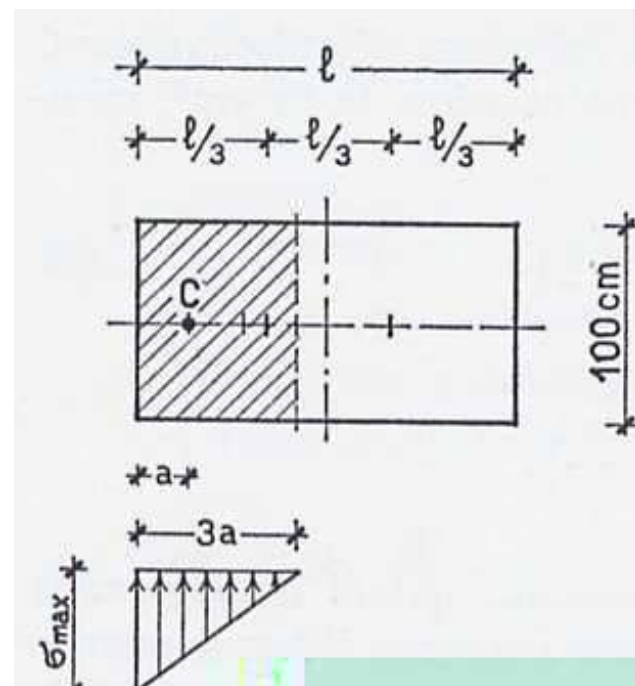


Centro di sollecitazione **C** esterno al nocciolo centrale d'inerzia

Trattandosi di muri costruiti con materiali che non resistono a trazione, per determinare il diagramma delle tensioni occorre parzializzare la sezione reagente, come in figura 16.

Se con a si indica la distanza del centro di sollecitazione C dal bordo esterno, la sezione reagente sarà delimitata dall'asse che dista $3a$ dal bordo esterno. In questo modo il punto C risulta coincidente con l'estremo del nocciolo di tale sezione parzializzata. Per quanto dello in precedenza il diagramma delle sollecitazioni diventa triangolare con $\sigma_{min} = 0$ verso il bordo interno e $\sigma_{max} = 2N / 3a$ verso il bordo esterno.

Nei muri in pietra o in calcestruzzo, il punto C non potrà mai essere esterno alla sezione.



Progetto di Infrastrutture viarie

Carichi di sicurezza a compressione per tipo di materiale impiegato

In ogni caso il σ_{max} deve risultare minore o al limite eguale al carico di sicurezza a compressione relativo al materiale che si impiega, come riportato in tabella:

<i>Muratura a secco</i>	<i>1 ÷ 1,5 kg/cm²</i>
<i>Muratura di pietrame e malta comune</i>	<i>2,5 ÷ 2,5 kg/cm²</i>
<i>Muratura di pietrame e malta idraulica</i>	<i>4 ÷ 5 kg/cm²</i>
<i>Muratura di pietrame e malta cementizia</i>	<i>4 ÷ 7 kg/cm²</i>
<i>Muratura di mattoni pieni e malta cementizia</i>	<i>10 ÷ 12 kg/cm²</i>
<i>Muratura in calcestruzzo di cemento</i>	<i>20 ÷ 25 kg/cm²</i>

Verifica allo scorrimento

Per la verifica allo scorrimento si ammette che il muro possa scorrere senza deformarsi lungo il piano di fondazione sotto l'azione della componente tangenziale T della forza risultante R .

A questa azione si oppone la resistenza d'attrito $f N$ dove f rappresenta il *coefficiente d'attrito* tra muro e fondazione (o fra muro e terreno di posa nel caso non vi sia fondazione). Di solito, per prudenza, si pone $f = 0,50$.

L'equilibrio si ha per: $T = f N$.

Assumendo come *grado di stabilità allo scorrimento* il rapporto tra $f N$ e T che deve risultare:

$$f N / T \geq 1,5.$$

Verifica al ribaltamento

Per la verifica al ribaltamento il muro viene considerato come un monolite e quindi capace di ruotare sotto l'azione della spinta attorno al punto A, come in figura 17.

I momenti: $S s$ e $P p$, dati del prodotto dalle forze agenti: di spinta S e di peso P per i rispettivi bracci s e p rispetto al punto A, rappresentano rispettivamente il momento ribaltante e quello resistente.

Per la stabilità al ribaltamento quindi:

$$P p > S s$$

Il rapporto tra momento resistente, dovuto all'azione del peso del muro, ed il momento ribaltante, dovuto alla spinta, viene definito *grado stabilità al ribaltamento*.

Per la stabilità detto rapporto deve risultare:

$$P p / S s \geq 2$$

