

STUDI SASSARESI

Sezione III

1979

Volume XXVII

ANNALI DELLA FACOLTÀ DI AGRARIA DELL'UNIVERSITÀ
DI SASSARI

DIRETTORE: G. RIVOIRA

COMITATO DI REDAZIONE: M. DATTILO - F. FATICHENTI - C. GESSA - L. IDDA
F. MARRAS - A. MILELLA - P. PICCAROLO - A. PIETRACAPRINA - R. PROTA
R. SATTA - G. TORRE - A. VODRET



ORGANO UFFICIALE
DELLA SOCIETÀ SASSARESE DI SCIENZE MEDICHE E NATURALI

GALLIZZI - SASSARI - 1981

St. Sass. III Agr.

**Analisi delle prestazioni statiche
e dei costi di muri di sostegno in calcestruzzo armato
in funzione di alcune caratteristiche dimensionali.**

STEFANO DE MONTIS* - MARIO PISANU**

1. PREMESSA

La progettazione ed il dimensionamento di manufatti stradali in genere e di muri di sostegno in particolare raramente sono preceduti da studi preliminari di conoscenza dei diversi fattori che vi concorrono; mancano soprattutto i presupposti e l'approfondimento necessari a determinare soluzioni economiche e funzionali in rapporto alle prestazioni statiche e di stabilità da conseguire.

Solitamente infatti ogni decisione deriva da scelte che si ricollegano ad attività di routine, esplicita in specie con l'impiego di tabelle e formule generiche, utilizzate spesso in maniera pedissequa e superficiale. Ne conseguono soluzioni progettuali approssimate il cui costo è notevolmente superiore al necessario e tale da determinare differenze talvolta non compatibili con gli investimenti preventivati.

Va anche ricordato che la necessità di contenere i costi, condizione essenziale per ogni attività d'impresa, assume rilevanza determinante nel settore agricolo per il quale la disponibilità di risorse è limitata e precari e difficili da conseguire sono gli equilibri tra investimenti e possibili ricavi.

Ciò si rileva essere ancor più evidente in iniziative che richiedono l'impiego di somme rilevanti da utilizzare nella realizzazione di importanti opere: tali si configurano infatti le infrastrutture stradali, nelle quali di frequente sono presenti elevate spinte di terre da contenere, sia che si operi nell'ambito ristretto di miglioramenti fondiari aziendali o in un quadro più vasto di dimensione comprensoriale o consortile.

* Docente di Edilizia Zootecnica e Assistente ordinario - Istituto di Topografia e Costruzioni rurali.

** Assistente ordinario presso il medesimo Istituto.

L'elaborazione dei dati con il calcolatore è stata eseguita da Gianna Panu, tecnico dell'Istituto.

Tutto ciò è accentuato dalla complessità e dal numero di variabili che si riscontrano nel calcolo statico dei muri di sostegno in calcestruzzo armato e soprattutto dalla mancanza di attendibili e articolate tabelle di facile ed immediata lettura che contengano un numero così ampio di soluzioni da soddisfare la più vasta gamma di casi possibili.

2. SCOPO DELLO STUDIO

Delle problematiche accennate in premessa, il presente studio fa riferimento ad un aspetto particolare: si propone infatti di analizzare l'andamento dei costi di costruzione e delle sollecitazioni indotte sul terreno da muri di sostegno in calcestruzzo armato, al variare della posizione della parete verticale resistente rispetto alla piastra di fondazione.

Allo scopo si sono elaborate, con l'impiego di calcolatore, una serie di tabelle per tutte le possibili combinazioni dei parametri variabili presi in esame ed elencati appresso in 3.1.2.

Di dette tabelle nel presente lavoro per necessità di sintesi, si riporta solo un esempio, peraltro esposto in termini riassuntivi.

Le caratteristiche geometriche e costruttive del muro di sostegno preso a riferimento sono (fig. 1):

- parete verticale di spessore costante e priva di nervature;
- piastra di fondazione anch'essa di spessore costante;
- armatura doppia simmetrica con tondo nervato ad elevata aderenza (privo pertanto di uncinate di ancoraggio) disposta sia nel paramento verticale che nella piastra di fondazione.

Al fine di rendere più lineare la successiva esposizione dello studio, si riporta la simbologia adottata, con i necessari riferimenti a significati e caratteristiche dimensionali:

γ_c	[kg/m ³]	peso specifico del calcestruzzo armato,
K_c	[kg/cm ²]	coefficiente di sicurezza a compressione del calcestruzzo,
K_t	[kg/cm ²]	coefficiente di sicurezza a trazione dell'armatura,
n		rapporto di amplificazione,
d	[cm]	spessore di protezione in calcestruzzo delle armature (co-priferro),
λ		rapporto fra le distanze delle due armature dal bordo esterno compresso,
r'		coefficiente per il calcolo di progetto dell'altezza di una sezione rettangolare inflessa con doppia armatura,

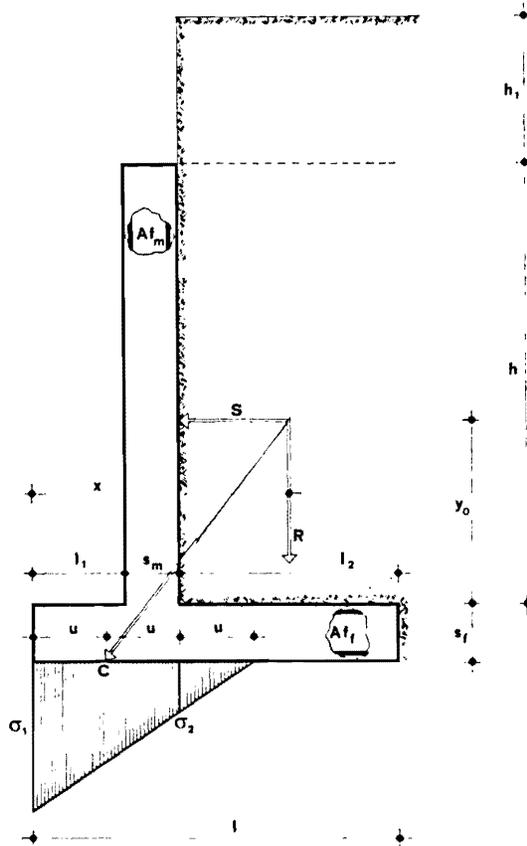


Fig. 1 - Caratteristiche geometriche, statiche e costruttive del muro di sostegno.
Geometric, static and building features of the retaining wall.

t'	coefficiente per il calcolo di progetto dell'armatura di una sezione rettangolare inflessa con doppia armatura,
h [m]	altezza del paramento verticale del muro valutata dall'estradosso della piastra fino alla sommità,
h_1 [m]	altezza virtuale di strato di terreno superiore equipesante, corrispondente a possibile sovraccarico,
φ [$^\circ$]	angolo di attrito del terreno,
γ_t [kg/m^3]	peso specifico del terreno,
s_m [m]	spessore del paramento verticale,

Af_m [cm ²]	armatura del paramento verticale presente nelle fibre tese, uguale a quella delle fibre compresse,
l_1 [m]	larghezza della risega esterna della fondazione,
l_2 [m]	larghezza della risega interna,
l [m]	larghezza totale ($l_1 + s_m + l_2$) della piastra di fondazione,
s_f [m]	spessore della fondazione,
Af_f [cm ²]	armatura della fondazione, prevista doppia come per la parete verticale,
S [kg]	spinta orizzontale del terreno sul muro di sostegno,
y_o [m]	distanza di S dall'estradosso della piastra di fondazione,
M_s [kgm]	momento spingente (il braccio è uguale a $y_o + s_f$),
R [kg]	risultante delle forze verticali (peso proprio del muro + peso del terreno),
x [m]	braccio di R ,
M_R [kgm]	momento stabilizzante,
u [m]	distanza del centro di applicazione C della risultante ($\vec{S} + \vec{R}$), dal bordo esterno della fondazione,
σ_1 [kg/cm ²]	tensione del terreno in corrispondenza del bordo esterno della fondazione,
σ_2 [kg/cm ²]	tensione del terreno in corrispondenza del piano che contiene la faccia interna del paramento verticale,
V_c [m ³]	volume di calcestruzzo per metro lineare di muro,
P_f [kg]	peso dell'armatura per metro lineare di muro.

3. METODOLOGIA

3.1. *Dati preliminari*

Ai fini dei successivi calcoli, sono stati presi in considerazione e quantificati i seguenti parametri:

3.1.1. Parametri costanti:

γ_c	=	2500	kg/m ³
K_c	=	80	kg/cm ²
K_f	=	2000	kg/cm ²
n	=	10	
d	=	2,5	cm

$$\begin{aligned}\lambda &= 0,05 \\ r' &= 0,25455 \\ t' &= 0,00217\end{aligned}$$

3.1.2. Parametri variabili

h : sono stati presi in esame tutti i casi che vanno da 1,50 a 6,00 m con intervalli di 0,5 m.

γ_1 : si sono esaminati i casi di 1600 e 1700 kg/m³.

φ : sono stati considerati 30°, 35°, 40°.

sovraccarico: sono state prese in considerazione le condizioni di carico per $h_1 = 0$, $h_1 = 0,50$ m, $h_1 = 1,00$ m, per folla compatta (400 kg/m²), e per rullo compressore da 18 t.

l_1 : si sono esaminati tutti i casi compresi tra $l_1 = 0$ ed $l_1 = 0$, con intervalli di 0,20 m.

3.2. Calcolo della spinta e del relativo punto di applicazione.

Il metodo usato è quello di Coulomb che, nella sua formulazione più estesa (tenendo cioè conto di eventuali sovraccarichi), si avvale delle seguenti formule:

$$S = \gamma_1 \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{2h_1}{h} \right)$$

$$y_0 = \frac{h}{3} \cdot \frac{h + 3h_1}{h + 2h_1}$$

3.3. Calcolo del paramento verticale.

È stato effettuato considerando il muro come una mensola incastrata alla base e sollecitata dal momento flettente prodotto da S . Sono state utilizzate pertanto le formule generali per il progetto di travi inflesse a sezione rettangolare:

$$s_m = r' \sqrt{S \cdot y_0} + d \qquad Af_m = t' \sqrt{S \cdot y_0}$$

3.4. Calcolo della larghezza della piastra di fondazione.

In prima approssimazione si è attribuito un valore fittizio s_{10} (per semplicità 1 metro) a s_1 e si è quantificato l_1 (iniziando da $l_1 = 0$ e incrementandolo sistematicamente di 0,20 m, come visto precedentemente in 3.1.2).

Si sono potuti così esprimere R , x ed M_R in funzione di l_2 , unica incognita.

Posta, ai fini delle stabilità a rotazione, la condizione che $M_R = 1,5 M_s$, è stato possibile definire il valore di l_2 e quindi di l ($l = l_1 + l_2 + s_m$).

Successivamente si è provveduto a quantificare R ed a calcolare u .

3.5. Determinazione delle sollecitazioni trasmesse al terreno di fondazione.

Poiché il diagramma delle sollecitazioni è di tipo incrociato, si è trascurata la parte soggetta a trazione in quanto il terreno non offre nessuna reazione a questo tipo di sollecitazione. È stato possibile così determinare i valori di:

$$\sigma_1 = \frac{2R}{3u} \quad \text{tensione del terreno in corrispondenza del lembo estremo della risega esterna di fondazione}$$

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot \frac{(l_2 + 3u - l)}{3u} \quad \text{tensione del terreno in corrispondenza della proiezione della faccia interna del muro sul terreno}$$

3.6. Calcolo di progetto della fondazione.

Le due riseghe della fondazione sono state considerate come mensole rovescie sollecitate a flessione dalle reazioni del terreno sottostante.

Per ragioni di sicurezza, nei calcoli sono state impiegate le seguenti ipotesi di carico (fig. 2):

- per la risega esterna, invece del diagramma trapezoidale delle sollecitazioni del terreno, si è ipotizzato un diagramma rettangolare di altezza σ_1 , pari alla tensione massima, e di lunghezza l_1 .
- per la risega interna, al diagramma triangolare delle suddette tensioni si è sostituito un diagramma rettangolare di altezza costante σ_2 e di lunghezza l_2 .
- non sono stati considerati, a vantaggio della stabilità, i momenti resistenti relativi al peso del terreno gravante sulle due riseghe, che contrastano i momenti prodotti dalle sollecitazioni esaminate in a).

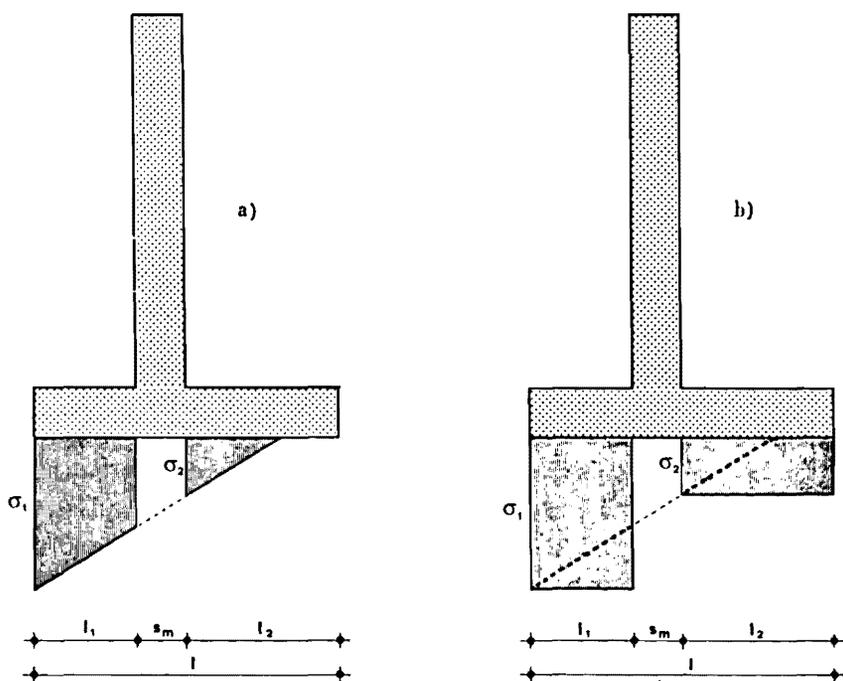


Fig. 2 - Diagrammi delle sollecitazioni del terreno sulla piastra di fondazione: a) diagramma reale, b) diagramma ipotizzato per i calcoli.
 Stress diagram of the ground on the foundation: a) real diagram, b) hypothetical diagram assumed for the calculations.

Le formule impiegate pertanto sono:

$$\begin{cases}
 s_{1r} = r' \cdot l_1 \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_1} + d \\
 A f_{1r} = t' \cdot l_1 \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_1}
 \end{cases}
 \quad \text{per la risega esterna}$$

$$\begin{cases}
 s_{2r} = r' \cdot l_2 \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_2} + d \\
 A f_{2r} = t' \cdot l_2 \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_2}
 \end{cases}
 \quad \text{per la risega interna}$$

3.7. Determinazione dello spessore della fondazione.

La necessità di assegnare spessore costante alla piastra di base ha portato a considerare per s_r il valore più elevato tra i due determinati: questo è

stato confrontato con il valore fittizio s_{10} assunto in prima approssimazione in 3.4. e sostituito ad esso, se $s_i \neq s_{10}$, come nuovo valore virtuale.

Si è così rieseguita la sequenza di calcolo a partire da 3.4., e dopo una serie di iterazioni si è pervenuti ad una convergenza dei due valori in un unico dato finale, con l'approssimazione di ± 5 cm.

3.8. Programmazione del problema sul calcolatore.

Come accennato in premessa, la sequenza delle operazioni illustrate è stata programmata su un calcolatore secondo il diagramma di flusso schematicamente illustrato nella fig. 3.

3.9. Risultati finali.

Per ogni valore di h , preso in considerazione, e per ogni combinazione dei parametri esposti nella premessa, il calcolatore ha fornito una serie di dati finali, dei quali i più significativi risultano essere i seguenti:

- a) spessore del paramento verticale s_m
- b) armatura del medesimo A_{1m}
- c) larghezza della piastra di fondazione l
- d) spessore della piastra di fondazione s_f
- e) armatura della piastra di fondazione A_{1f}
- f) sollecitazione massima di compressione del terreno σ_{max}
- g) volume di calcestruzzo necessario per metro lineare di muro V_1
- h) peso del ferro occorrente per metro lineare di muro P_1
- i) incidenza dell'armatura sull'unità di volume di calcestruzzo P_1/V_1 .

4. ESEMPLIFICAZIONE PRATICA

4.1. Considerazioni preliminari.

Per meglio chiarire quanto finora esposto, si illustrano i risultati dei calcoli effettuati per la combinazione dei seguenti parametri:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 1700 && \text{kg/m}^3 \\ \varphi &= 30^\circ \\ h &= 6,00 && \text{m} \\ h_1 &= 2,04 && \text{m} \quad (\text{altezza di uno strato equipesante di terreno} \\ &&& \text{corrispondente al sovraccarico prodotto da un} \\ &&& \text{rullo compressore di 18 t}) \end{aligned}$$

l_1 variabile da 0 a 2,20 m (con intervallo costante di 0,20 m).

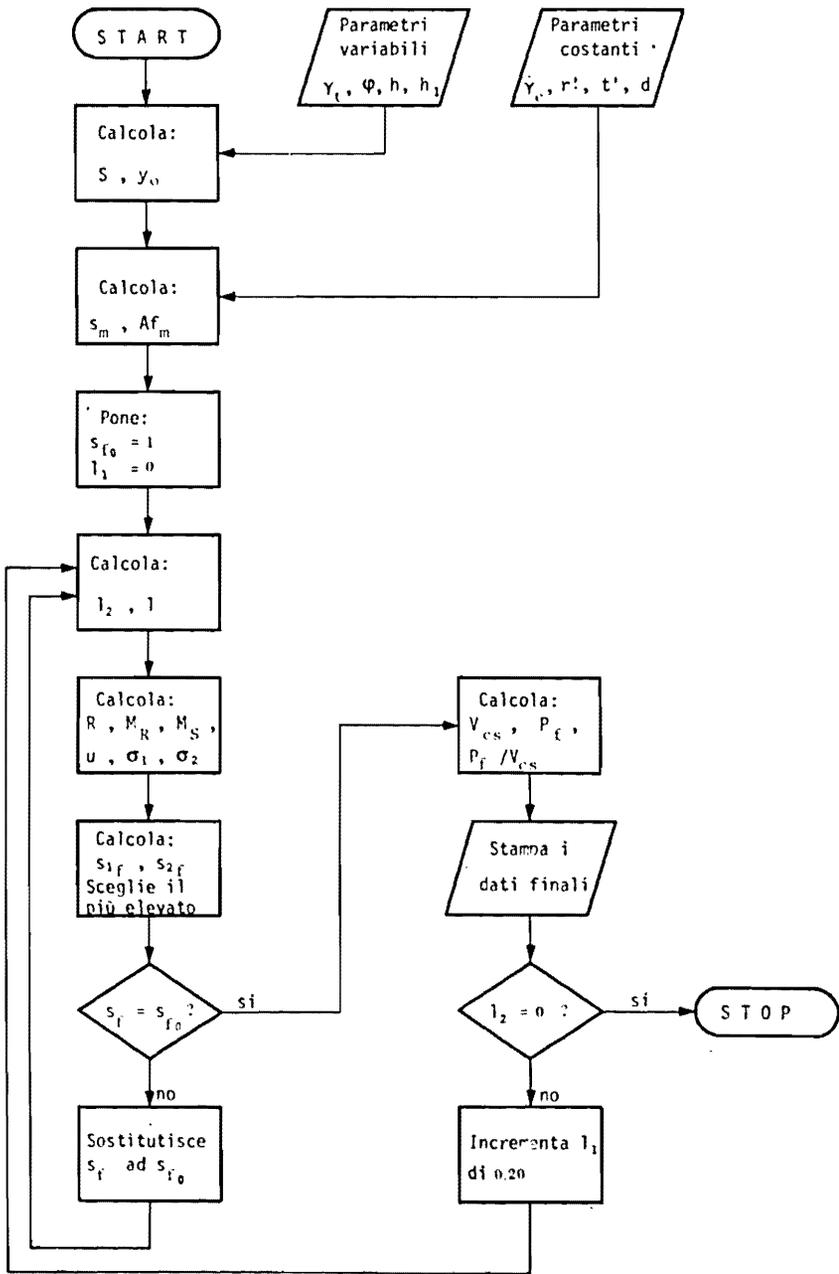


Fig. 3 - Diagramma di flusso del programma di calcolo.
Flow diagramma of the calculation program.

4.2. Risultati.

I dati risultanti dall'elaborazione analitica (1), ordinati nella tabella 1, esprimono sinteticamente le dimensioni e le quantità dei materiali da impiegarsi, in dipendenza dei parametri iniziali assunti.

Tab. 1 - Caratteristiche costruttive e dimensionali del muro di sostegno in funzione di diversi valori di l_1 .

Dimensional and building features of the retaining wall in function of different values of l_1 .

Si assume:

$h = 6,00$ m altezza del muro
 $h_1 = 2,04$ m altezza del sovraccarico

Si determina:

$S = 17130$ kg spinta orizzontale del terreno
 $s_m = 0,55$ m spessore della parete verticale
 $Af_m = 45$ cm² armatura relativa

l_1 m	l_2 m	l m	s_r m	Af_r cm ²	$V_{c,c}$ m ³	P_r kg	$P_r/V_{c,c}$ kg/m ³	σ_{max} kg/cm ²
0,00	2,80	3,35	1,10	90	7,0	975	139,3	6,4
0,20	2,55	3,30	0,90	71	6,3	856	135,9	5,6
0,40	2,30	3,25	0,70	55	5,6	754	134,6	5,0
0,60	2,10	3,25	0,55	43	5,1	683	133,9	4,2
0,80	1,90	3,25	0,45	33	4,8	625	130,2	3,7
1,00	1,75	3,30	0,40	28	4,6	598	130,0	3,2
1,20	1,60	3,35	0,40	32	4,6	621	135,0	2,9
1,40	1,50	3,45	0,45	35	4,9	646	131,8	2,6
1,60	1,35	3,50	0,50	40	5,0	680	136,0	2,4
1,80	1,25	3,60	0,55	43	5,3	706	133,2	2,3
2,00	1,15	3,70	0,60	46	5,5	735	133,5	2,2
2,20	1,05	3,80	0,60	48	5,6	753	134,5	2,0

(1) Per ragioni pratiche, le dimensioni lineari e le sezioni dell'armatura sono state approssimate rispettivamente ai 5 cm e al cm² immediatamente più elevati.

4.3. *Analisi dei risultati.*

Con i valori di cui al punto 4.2. precedente si è predisposto il grafico 1, in cui viene espresso l'andamento delle sollecitazioni sul terreno (σ_{max}) e delle quantità di materiali (volume di calcestruzzo V_{cs} e peso dell'armatura P_I) in funzione delle diverse posizioni fissate per il paramento verticale del muro rispetto alla piastra di fondazione.

Si osserva anzitutto che la pressione massima prodotta sul terreno ha un andamento costantemente decrescente, mentre le quantità dei materiali

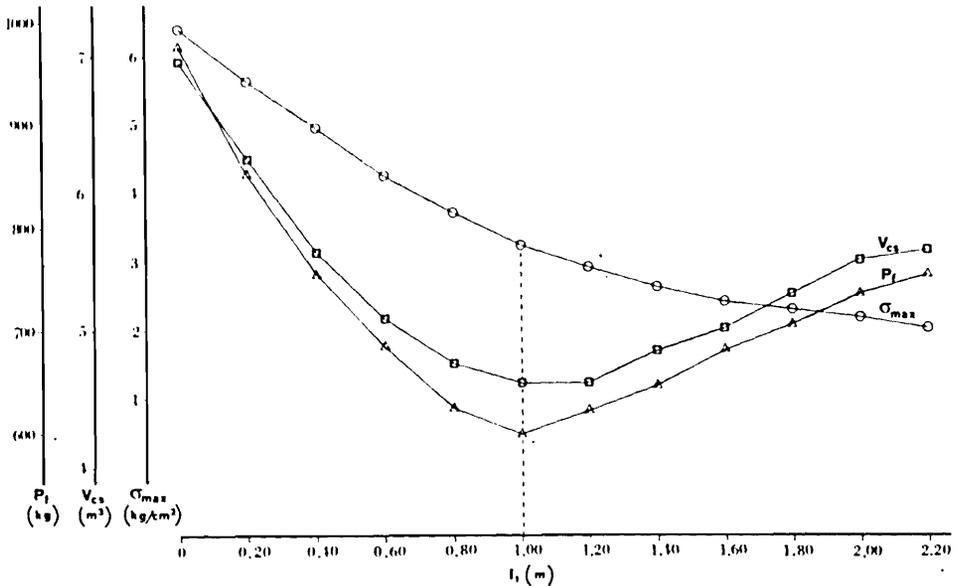


Grafico 1 - Andamento dei valori della tensione massima sul terreno (σ_{max}), e delle quantità di calcestruzzo (V_{cs}) e di ferro (P_I) per metro lineare di muro, in funzione di diversi valori di l_1 .

State of maximal strain values induced on the ground (σ_{max}), of concrete quantities (V_{cs}) and of iron (P_I) for running meter of wall, in function of different values of l_1 .

(e quindi i costi) presentano prima un decremento, mentre successivamente tendono a risalire. Se ne deduce che al costo minimo non corrisponde il minor carico ottenibile sul terreno.

Pertanto il progettista che voglia conciliare la pressione massima di volta in volta ammissibile sul terreno con il minimo costo, dovrà prima

ricercare sulla curva delle tensioni σ_{max} il valore prescelto e successivamente individuare il corrispondente valore di l_1 (e quindi di l_2 ed l).

Viceversa, potrà determinare quale tensione sul terreno corrisponde alle minime e pertanto ottimali quantità di materiali da impiegare.

A titolo di esempio, ad una σ_{max} ammissibile sul terreno di 3 kg/cm^2 , corrispondono valori di l_1 pari a $1,20 \text{ m}$, una cubatura di calcestruzzo di $4,6 \text{ m}^3$ ed un peso di armatura uguale a 621 kg .

Così alle condizioni di costo minimo ($V_{cs} = 4,6 \text{ m}^3$ e $P_t = 598 \text{ kg}$) per $l_1 = 100 \text{ cm}$, fa riscontro una tensione sul terreno di $3,2 \text{ kg/cm}^2$.

Inoltre, se si analizzano globalmente i risultati delle possibili combinazioni dei parametri variabili, si osserva che, in generale, il costo minimo del muro (cioè il minimo impiego di materiali) si realizza quando il rapporto l_1/l_2 è compreso tra $0,5$ e $0,6$. Da ciò si desume che il rapporto dimensionale ottimale ai fini economici della piastra di fondazione si ha quando la risega esterna è pari, o leggermente superiore, alla metà della risega interna.

Un'altra interessante considerazione è possibile effettuare esaminando i dati riportati nella colonna 8 della citata tabella, ove sono indicati i valori del rapporto P_t/V_{cs} . Sul grafico n. 2 relativo si osserva come al costo mi-

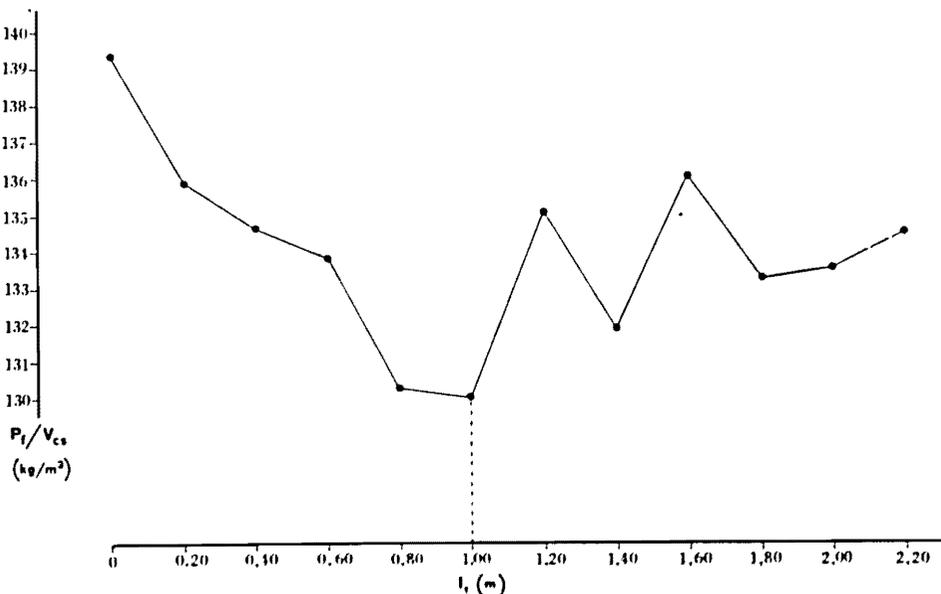


Grafico 2 - Andamento del rapporto P_t/V_{cs} (incidenza di ferro per unità di volume di calcestruzzo) in funzione di l_1 .
State of the relation P_t/V_{cs} (incidence of iron for unity of volume of concrete) in function of l_1 .

nimo (per $l_1 = 100$ cm) corrisponde anche la migliore utilizzazione dei materiali, cioè la minima incidenza di armatura per metro cubo di calcestruzzo.

5. CONCLUSIONI.

I risultati del presente lavoro (di prossima pubblicazione in edizione più estesa ed articolata), offrono al progettista (per il dimensionamento con formule di calcolo diretto rappresenta un momento critico una vasta gamma di combinazioni dimensionali per uno stesso caso di muro di sostegno, tra le quali, con immediata possibilità di confronto, può scegliere la più rispondente alle specifiche esigenze.

RÉSUMÉ

Les auteurs expliquent la méthodologie employée pour étudier le procédé des frais de construction et de la compression du terrain causée par un mur de soutènement en béton armé, lorsque on change la position de l'appareil porteur vertical par rapport à la semelle. Les auteurs mentionnent, en outre, un cas concret avec l'analyse des données élaborées et les relatives considérations pratiques.

SUMMARY

The authors illustrate a methodology employed to study the state of building costs and of the pressure that reinforced concrete retaining walls induced on the ground at the change of position of vertical supporting structure as to the foundation.

The authors relate also about the analysis of the data elaborates for a actual case, with relative practice considerations.

BIBLIOGRAFIA

- CESTELLI GUIDI C., 1964 — Meccanica del terreno. Fondazioni. Opere in terra. 5^a ed., HOEPLI Milano.
 INDELLICATI F., 1965 — Tavole di massima economia della flessione in relazione alla spesa del calcestruzzo e del ferro. (Dispense).
 LEONHARDT F. e MÖNNING E., 1978 — C.A. & C.A.P.: Calcolo di progetto e tecniche costruttive. Voll. 1, 2 e 3, 2^a ed., Edizioni tecniche ET, Milano.
 MARSON L., 1980 — Il calcolo dei muri di sostegno in zone sismiche. (Non-seismic design of retaining walls). L'industria delle costruzioni, 104, 105/106, 107.