

# Sui criteri di scelta delle terre in campo stradale

F.S. CAPALDO, T. ESPOSITO, R. GROSSI, R. MAURO\*

**SOMMARIO:** Nel lavoro si presentano alcune relazioni funzionali tra le caratteristiche di portanza e la suscettibilità all'acqua delle terre ed alcuni parametri di semplice e rapida determinazione, ricavate da una vasta sperimentazione su terreni di provenienza prevalentemente campana. I risultati, ottenuti con l'applicazione di metodi dell'analisi statistica multivariata, rappresentano i presupposti per una più razionale scelta dei terreni di utilizzo stradale - costruzione di rilevati e sottofondi - di quanto permetta l'attuale classifica C.N.R. Appare possibile, infatti, alla luce dei risultati ottenuti, accettare terre altrimenti rifiutate o da correggere, e ciò con evidenti riflessi nell'ambito delle risorse e dell'equilibrio dell'ambiente.

## 1. Premessa

I tecnici stradali hanno sempre sentito la necessità di avere a disposizione un criterio per stabilire abbastanza rapidamente se una terra possieda o meno requisiti tali da poter essere utilizzata agevolmente per la realizzazione di rilevati e sottofondi con caratteristiche di stabilità e di scarsa deformabilità durature nel tempo.

Dette caratteristiche sono essenzialmente legate alla natura della terra (composizione mineralogica, granulometria, sensibilità all'acqua e al gelo) ed al suo stato (principalmente contenuto di umidità).

Sono state, a tal fine, elaborate diverse classifiche ad uso specificamente stradale, che, con poche e semplici prove, raggruppano in poche categorie i numerosissimi tipi di terre reperibili in natura, così che terre appartenenti ad uno stesso gruppo abbiano proprietà e comportamenti analoghi riguardo agli scopi cui la classifica è finalizzata.

Tra le varie classifiche si citano quella granulometrica [1963], quella dell'indice di gruppo, quella ufficiale del CNR [1963] derivata senza sostanziali modifiche dalla classifica HIGHWAY RESEARCH BOARD, e la classifica LCPC-SETRA [1976] adottata ufficialmente in Francia ed alquanto più dettagliata delle altre.

Accade peraltro che terre dotate di ottime caratteristiche meccaniche e sufficientemente insensibili all'azione dell'acqua, in virtù dei parametri adoperati dalla classifica, vengano inserite nei gruppi di terreni da utilizzare con riserva o addirittura da scartare, specialmente per la realizzazione dei sottofondi.

Un esempio tipico è costituito dai terreni di origine vulcanica, largamente diffusi in Campania; essi

hanno in generale ottime caratteristiche meccaniche anche con forti contenuti di umidità [ESPOSITO, 1969; 1970] epperò, classificati normalmente nei gruppi A4 ed A5 della classifica CNR, dovrebbero essere rifiutati in base alle prescrizioni di molti Capitoli stradali. Tutto ciò ha degli evidenti riflessi negativi dal punto di vista economico e per quanto riguarda l'impatto ambientale.

Questa problematica è stata posta in luce anche da altri Autori e recentemente è stata proposta una classifica «ad hoc» per i materiali di origine vulcanica [PEZZAROSSA, 1986].

In considerazione di quanto sopra detto si è ritenuto utile approfondire il problema partendo dall'assunto che in definitiva l'esigenza del tecnico stradale è quella di assodare in modo semplice e rapido (possibilmente in cantiere) se una certa terra, convenientemente posta in opera, darà luogo ad una struttura che abbia una buona portanza e sia poco sensibile all'acqua e al gelo.

In questo spirito è stato condotto, presso il Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università di Napoli, uno studio sperimentale su un campione di ventotto terre con l'obiettivo di trovare delle relazioni analitiche tra due indici rappresentativi, rispettivamente, della portanza e della sensibilità all'acqua (indici che devono ritenersi quelli in base ai quali principalmente si giudica circa la possibilità o meno di utilizzare una terra) ed alcuni parametri di agevole e immediata determinazione.

Per la ricerca di dette relazioni si è fatto uso di alcuni metodi dell'analisi statistica multivariata, quali l'analisi in componenti principali, che ha consentito in ogni fase un'utile visualizzazione del problema, e la regressione multipla, con la quale si è giunti alle relazioni cercate.

## 2. La sperimentazione

Per lo svolgimento della ricerca sono state adoperate 28 terre in modo da coprire, con sufficiente uniformità, l'intero campo di variabilità previsto dalla classifica CNR; anche se, per difficoltà di re-

\* Dott. ing. FRANCESCO SAVERIO CAPALDO, Napoli; Prof. ing. TOMMASO ESPOSITO, Ordinario di Costruzioni di Strade, Ferrovie ed Aeroporti, Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, Napoli; Dott. ing. RODOLFO GROSSI, Ric. Conf., Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, Napoli; Dott. ing. RAFFAELE MAURO, Napoli.

perimento, un gruppo e qualche sottogruppo mancano completamente, si è ritenuto che il campione fosse significativo per gli obiettivi proposti.

Ciascuna terra è stata sottoposta ad una serie di prove, con le modalità che verranno indicate fra breve, onde ricavare i parametri da sottoporre ad analisi statistica.

Il criterio con cui sono stati scelti i parametri è quello adombrato in premessa: si è voluto rimanere nell'ambito delle prove usuali della geotecnica stradale, rinunciando, ad esempio, alla determinazione delle caratteristiche di resistenza a taglio o a prove di tipo chimico, che pur sarrebbero state significative per il problema in esame. Per quanto riguarda la individuazione della portanza e della sensibilità all'acqua si è fatto riferimento agli indici CBR determinati alla densità massima ed umidità ottima della AASHO modificata, prima e dopo immersione in acqua per quattro giorni, ed al loro rapporto.

Sono state, pertanto, eseguite le seguenti prove:

- analisi granulometrica;
- limiti di consistenza;
- peso specifico reale;
- equivalente in sabbia;
- prova AASHO modificata;
- prove CBR.

Ciascuna prova, condotta nel rispetto della normativa CNR, è stata eseguita almeno quattro volte e da esse si sono poi dedotti i parametri considerati nell'analisi.

Nella tabella 1 vi è il loro elenco completo, insieme alle corrispondenti abbreviazioni usate nel testo.

Si precisa che quasi tutti i parametri sono stati ottenuti come media aritmetica delle quattro determinazioni sperimentali; il LL è ottenuto mediante interpolazione lineare di dodici determinazioni spe-

TABELLA 1

N.	Parametri	Abbrev.
1	% passante allo staccio 0.075	(0.075)
2	% passante allo staccio 0.40	(0.4)
3	% passante allo staccio 2.0	(2.0)
4	Limite di liquidità	(LL)
5	Indice di plasticità	(IP)
6	Equivalente in sabbia	(ES)
7	Rigonfiamento percentuale (dopo immersione in acqua)	( $\Delta h$ )
8	Indice di gruppo	(IG)
9	Umidità ottima (AASHO modif.)	( $W_{ott}$ )
10	Densità massima (AASHO modif.)	( $\gamma_{dmax}$ )
11	Peso specifico reale	( $G_s$ )
12	Porosità (agdmax)	(n)
13	Rapporto dei vuoti (agdmax)	(e)
14	Grado di saturazione (agdmax)	(S)
15	Indice CBR	CBR
16	Indice CBR dopo imbibizione	CBRS
17	Rapporto CBR/CBRS	— CS

rimentali nel piano lgn, W. Infine, per la prova AASHO modificata, i venti punti di coordinate (W,  $\gamma_d$ ) sono stati interpolati con una parabola cubica, ricavando, quindi, per via analitica  $W_{opt}$  e  $\gamma_{dmax}$ ; in figura 1 è riportata, a titolo di esempio, una di tali determinazioni.

Nella tabella 2 sono riportati, per ciascuna delle ventotto terre tutti i valori dei parametri determinati come dinanzi detto; va osservato che il valore dell'indice plastico IP è stato assunto pari a zero per tutte le terre per le quali non è stato possibile determinare il limite plastico.

### 3. Analisi dei risultati sperimentali

Come accennato in premessa lo studio dei risultati sperimentali è stato condotto, in una prima fase, con l'analisi in componenti principali.

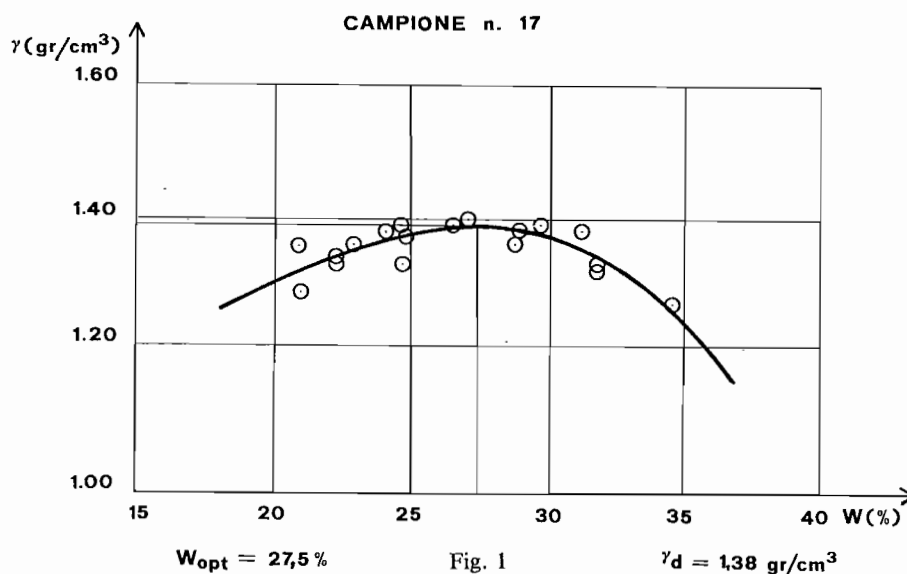


TABELLA 2

Terra	0.075	0.40	2.0	LL	IP	ES	$\Delta h$	IG	$W_{ott}$	$\gamma_{dmax}$	Gs	n	e	S	CBR	CBRS	CS	CNR
1	52.25	80.75	94.90	29	0	22.10	0.27	3.4	19.90	1.487	2.466	39.70	65.84	74.54	80	49	1.63	A4
2	15.05	28.70	77.00	17	0	70.00	0.00	0.0	11.93	1.998	2.782	28.18	39.24	84.58	168	134	1.25	A1
3	65.90	74.40	85.25	43	18	6.10	2.03	10.0	12.39	1.946	2.646	26.70	35.97	91.14	53	10	5.30	A7-6
4	88.25	91.50	93.55	49	22	1.41	3.84	14.4	11.05	1.959	2.714	27.70	38.54	77.81	2	2	24.50	A7-6
5	59.15	80.65	93.35	44	0	14.21	0.00	5.3	27.36	1.366	2.402	43.70	75.84	86.65	22	11	2.00	A5
6	34.40	57.93	87.70	24	0	30.70	0.68	0.0	15.03	1.752	2.604	32.70	48.63	80.48	103	64	1.61	A2-4
7	34.25	66.45	91.05	21	0	21.84	0.00	0.0	13.50	1.812	2.626	31.70	44.92	78.91	61	50	1.22	A2-4
8	12.13	38.47	83.27	16	0	56.02	0.00	0.0	12.10	1.927	2.646	27.70	37.30	85.80	100	83	1.20	A1b
9	33.10	60.70	87.05	36	0	49.00	0.00	0.0	19.00	1.420	2.475	42.63	74.30	63.29	144	49	1.17	A2-4
10	38.45	74.40	92.60	22	0	17.51	0.05	1.7	17.29	1.420	2.528	34.02	51.56	84.78	44	49	3.38	A4
11	45.40	72.80	91.40	42	34	29.30	1.33	2.2	25.00	1.668	2.447	50.14	100.00	60.83	75	49	2.27	A5
12	83.65	92.80	99.00	72	14	2.49	5.50	20.0	17.00	1.220	2.600	34.04	51.60	85.65	49	49	16.33	A4-5
13	41.55	67.10	94.55	41	0	12.56	0.07	2.3	19.00	1.715	2.594	37.93	61.12	80.64	13	49	2.17	A7-6
14	33.15	82.00	96.70	22	3	15.67	0.22	0.0	15.02	1.601	2.335	32.00	47.00	81.01	79	49	2.19	A2-4
15	40.70	90.55	98.75	25	2	10.63	0.11	1.1	11.50	1.725	2.584	25.00	33.47	88.78	33	49	1.74	A4
16	40.00	78.80	96.10	28	0	12.65	0.56	1.0	14.54	1.966	2.519	27.70	38.33	95.56	68	49	2.83	A4
17	45.70	70.65	92.10	49	0	15.43	0.80	2.6	27.50	1.821	2.367	40.60	48.50	94.68	71	49	1.97	A5
18	44.15	67.40	92.50	35	0	20.25	0.34	1.8	22.27	1.405	2.462	38.80	66.24	82.77	65	49	1.44	A4
19	24.80	38.60	84.60	35	0	40.23	0.00	0.0	17.12	1.481	2.562	35.60	57.56	76.20	108	49	1.83	A2-4
20	42.60	69.20	90.45	55	18	11.11	0.42	4.3	24.13	1.491	2.625	43.20	76.06	83.28	22	11	2.00	A7-5
21	47.35	75.35	95.65	37	0	27.20	0.27	2.5	17.60	1.360	2.454	44.50	80.40	53.69	99	62	1.60	A4
22	46.25	74.40	92.70	45	20	6.26	4.08	5.6	15.35	1.782	2.525	29.43	41.69	92.97	62	4	15.50	A7-6
23	32.75	65.85	91.05	29	0	20.94	0.25	0.0	6.48	2.124	2.533	16.15	19.26	85.24	50	35	1.43	A2-4
24	19.20	46.50	83.00	37	0	22.36	3.75	0.0	14.74	1.800	2.541	29.16	41.17	90.97	42	12	3.50	A1b
25	66.50	90.20	95.80	31	8	5.91	1.98	6.3	10.68	1.947	2.500	22.12	28.40	73.22	46	13	3.54	A4
26	35.35	83.75	98.50	28	0	23.47	0.44	0.1	18.57	1.551	2.388	35.05	53.97	82.17	69	57	1.21	A4
27	6.50	64.95	99.55	15	0	55.23	0.02	0.0	12.90	1.800	2.637	31.74	46.50	73.16	95	75	1.27	A3
28	48.43	75.33	93.20	37	0	27.78	0.19	2.7	23.50	1.280	2.449	47.73	91.33	63.01	100	84	1.31	A4

TABELLA 3

Terra	I	II	III
1	0.409	-1.018	-0.572
2	-3.526	1.664	-0.246
3	1.314	1.756	-0.508
4	3.368	0.742	-0.576
5	0.989	-0.274	-0.910
6	-1.455	0.228	-0.255
7	-1.070	-0.527	-0.095
8	-3.266	0.902	0.390
9	-1.039	0.645	-0.285
10	-0.564	-0.883	-0.218
11	0.164	0.042	-0.500
12	5.023	0.434	0.874
13	0.703	0.412	0.874
14	-0.225	-1.649	0.195
15	0.634	-1.854	0.167
16	0.138	-1.125	0.108
17	0.404	0.289	-0.410
18	-0.220	-0.201	-0.302
19	-2.172	1.492	0.100
20	1.220	1.554	0.780
21	0.418	-0.696	-0.256
22	1.376	0.876	0.890
23	-1.116	-0.502	-0.035
24	-2.108	1.500	0.049
25	1.621	-0.870	-0.581
26	0.240	-1.661	0.256
27	-1.542	-1.874	1.562
28	0.282	-0.402	-0.496

Tale metodo della statistica multivariata, applicato ad un insieme di punti (terre) dello spazio a  $p$  dimensioni ( $p$  = numero dei parametri), individua le direzioni di massima dispersione (componenti principali) dei punti attraverso una rotazione rigida del sistema di riferimento.

Se l'insieme è sufficientemente disperso lungo due o al massimo tre direzioni preferenziali, può essere rappresentato dalla proiezione dei punti nel piano o nello spazio a tre dimensioni individuato dalle prime componenti principali. La leggittimità della rappresentazione può essere valutata attraverso la percentuale della varianza totale che viene spiegata dalle componenti utilizzate.

Per una corretta applicazione dell'analisi conviene, in generale, operare con le variabili  $y_{ij}$  centrate e ridotte

$$y_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j$$

dove:

$i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  = numero dei campioni)

$j = 1, 2, \dots, p$  ( $p$  = numero dei parametri)

$x_{ij}$  = variabile originaria

$\bar{x}_j$  = media aritmetica delle  $x_{ij}$

$\sigma_j$  = deviazione standard delle  $x_{ij}$

In tal modo si elimina l'effetto distorcente delle unità di misura, l'insieme di punti si dispone intorno all'origine delle  $y_{ij}$  ( $\bar{y}_j = 0$ ) e le variabili hanno tutte varianza unitaria.

Detta  $\mathbf{R}$  la matrice delle variabili centrate e ridotte di dimensioni  $n \times p$  ed  $\mathbf{R}'$  la sua trasposta, la matrice  $\mathbf{S} = 1/n \mathbf{R}'\mathbf{R}$  di dimensioni  $p \times p$  è la matrice di correlazione fra le variabili  $y_j$ .

Il cambio di riferimento (rotazione) viene attuato mediante la trasformazione ortogonale

$$z_i = \mathbf{A}'y_i$$

con  $y_i$  vettore colonna della matrice  $\mathbf{R}'$  e  $\mathbf{A}'$  trasposta dalla matrice  $\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_p)$  degli autovettori, determinati mediante il sistema di equazioni lineari nelle incognite  $a_j$ :

$$(\mathbf{S} - \lambda_j \mathbf{I}) a_j = 0 \quad (1)$$

Nella (1)  $\lambda_j$  è l'autovalore di ordine  $j$  della matrice  $\mathbf{S}$ , ovvero lo scalare per il quale risulta  $(\mathbf{S} - \lambda_j \mathbf{I}) = \mathbf{0}$  ed  $\mathbf{I}$  è la matrice unitaria di ordine  $n$ . Attraverso la (1) e con l'aggiunta della condizione di ortogonalità  $a'_j a_j = 1$  vengono definite le componenti dei vettori unitari  $a_j$  (autovettori). Il primo di essi,  $a_1$  corrispondente al più grande degli autovalori, definisce il primo asse principale; l'autovettore  $a_2$ , corrispondente all'autovalore secondo, in grandezza, definisce il secondo asse principale e così via fino ad  $a_n$ .

La parte di varianza spiegata da ciascun asse principale è pari a  $\lambda_j / \sum \lambda_j$ ; la proiezione dell'insieme dei punti sul piano definito dai primi due assi principali ha una varianza, misurata attraverso la somma dei quadrati delle distanze dei punti fra loro, che è l'aliquota  $(\lambda_1 + \lambda_2) / \sum \lambda_j$  della varianza totale.

### 3.1 L'analisi in componenti principali applicata al campione di 28 terre

La metodologia esposta è stata ripetutamente utilizzata per studiare i risultati sperimentali ottenuti. Le diverse analisi sono state fatte scegliendo opportune combinazioni dei primi 14 parametri della tabella 1. I CBR ed il loro rapporto sono stati assunti come parametri «esterni» e non inseriti quindi nell'analisi.

Si riporta, in sintesi, il procedimento applicato a due particolari combinazioni di parametri.

#### 3.1.1 Analisi con 5 parametri (CNR) [(0.075), (0.4), (2.0), (LL), (IP)].

Determinata la matrice  $\mathbf{R}$  dei dati, in termini di variabili centrate e ridotte, la matrice di correlazione  $\mathbf{S}$  risulta:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{28} \mathbf{R}'\mathbf{R} = \begin{vmatrix} 1.000 & 0.757 & 0.390 & 0.710 & 0.669 \\ 0.757 & 1.000 & 0.826 & 0.373 & 0.406 \\ 0.390 & 0.826 & 1.000 & 0.163 & 0.184 \\ 0.710 & 0.373 & 0.163 & 1.000 & 0.733 \\ 0.699 & 0.406 & 0.184 & 0.733 & 1.000 \end{vmatrix}$$

Gli autovalori della matrice e le percentuali di varianza spiegata dai corrispondenti assi sono:

autovalore	asse	%var. spieg.	$\Sigma$ %var. spieg.
$\lambda_1 = 3.126$	I	62.5	62.5
$\lambda_2 = 1.258$	II	25.2	87.7
$\lambda_3 = 0.316$	III	6.3	94.0
$\lambda_4 = 0.260$	IV	5.2	99.2
$\lambda_5 = 0.041$	V	0.8	100.0

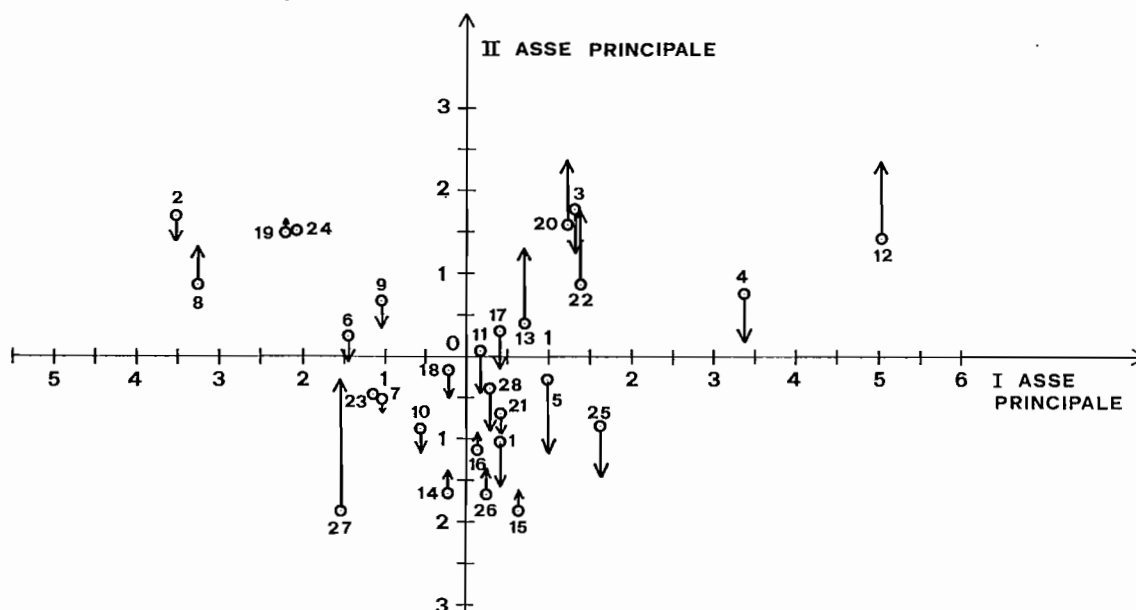


Fig. 2 - Rappresentazione delle terre mediante le prime tre componenti principali (analisi con cinque parametri).

La matrice  $A$  degli autovettori  $a_j$  è:

$$A = \begin{pmatrix} 0.518 & 0.104 & -0.629 & -0.223 & -0.525 \\ 0.480 & -0.434 & -0.210 & -0.171 & 0.713 \\ 0.352 & -0.644 & 0.448 & -0.271 & -0.432 \\ 0.434 & 0.455 & 0.020 & 0.758 & 0.172 \\ 0.435 & 0.423 & 0.599 & 0.523 & 0.016 \end{pmatrix}$$

Le coordinate  $z_i = A'y_i$  dei punti rappresentativi delle 28 terre, nello spazio delle prime tre componenti principali, risultano quelle della tabella n. 3.

In figura 2 è indicata la disposizione dei punti nel piano delle prime due componenti principali; in corrispondenza di ogni punto è stata disegnata una freccia di lunghezza uguale al valore della terza componente, orientata verso l'alto o il basso a seconda che quest'ultima sia positiva o negativa.

La suddivisione delle terre rispecchia abbastanza fedelmente la classifica del C.N.R.

Le terre ghiaio-sabbiose (A1-b, A2-4) sono caratterizzate da una prima componente negativa. Le terre del sottogruppo A1-b sono disposte a sinistra delle terre sottogruppo A2-4, ed hanno, in genere, la seconda componente di valore maggiore. A tali regole fa eccezione la sola terra 19.

Le terre dei gruppi A4 e A5 sono sufficientemente caratterizzate dalla prima componente maggiore di -1 e da una seconda componente minore di 0.30. Le A4 si distinguono dalle A5 per i valori generalmente minori della seconda componente. Le terre 14 e 5 costituiscono delle eccezioni indicative, forse, della necessità di trovare una più corretta definizione delle terre A4. Per varie ragioni, tra cui l'incerta significatività dei campioni costituiti dalle terre di un solo gruppo, non si è ritenuto opportuno procedere in tal senso.

Le argille (A7-5, A7-6) sono caratterizzate da prima e seconda componente principale positiva. Tranne che per la n. 13 la prima componente è sempre maggiore dell'unità, mentre per tutte la seconda è maggiore di 0.3.

Se, inoltre, si associano ai gruppi le indicazioni della classifica del C.N.R. sulle qualità portanti dei terreni quali sottofondi stradali, si riscontra un peggioramento della portanza coll'aumentare della prima componente principale.

Lungo il secondo asse principale si ha un comportamento discordante tra le terre del semipiano

$I < 0$  e le terre del semipiano  $I > 0$ ; le prime migliorano le loro qualità all'aumentare della seconda componente, mentre le seconde si orientano in modo inverso.

### 3.1.2 Analisi con quattordici parametri

Procedendo come in precedenza, ma utilizzando come parametri quelli numerati da 1 a 14 nella tabella 1, si sono ottenuti gli autovalori della matrice di correlazione  $S = 1/28 R'R$ :

autovalore	asse	%var. spieg.	$\Sigma$ %var. spieg.
$\lambda_1 = 5.122$	I	36.6	36.6
$\lambda_2 = 4.724$	II	33.7	70.3
$\lambda_3 = 1.822$	III	13.0	83.3
$\lambda_4 = 1.031$	IV	7.4	90.7
$\lambda_5 = 0.459$	V	3.3	94.0
$\lambda_6 = 0.373$	VI	2.7	96.7
$\lambda_7 = 0.199$	VII	1.4	98.1
$\lambda_8 = 0.127$	VIII	0.9	99.0

Non si riportano i dati relativi ai rimanenti sei autovalori perché i contributi di varianza sono trascurabili.

Per brevità si riportano solo i primi tre autovettori attraverso i quali si ricavano le prime tre componenti principali dei punti:

	I	II	III
1	0.404	0.040	-0.017
2	0.340	0.003	-0.424
3	0.231	-0.064	-0.528
4	0.377	-0.067	0.305
5	0.339	0.198	0.253
6	-0.358	-0.084	0.249
7	0.022	0.262	-0.028
8	0.296	0.202	0.226
9	0.382	0.141	0.193
10	0.129	-0.395	0.118
11	-0.099	0.444	-0.060
12	-0.076	0.293	0.396
13	0.090	-0.431	0.177
14	0.087	-0.434	0.167

Le coordinate  $z_i = A'y_i$ , dei punti rappresentati-

vi dei 28 campioni, relative ai primi tre assi principali, risultano:

Campione	I	II	III
1	0.476	-1.687	-0.872
2	-4.621	2.061	2.676
3	1.789	3.067	1.187
4	4.034	3.315	0.795
5	1.643	-2.748	-0.370
6	-1.744	0.468	0.447
7	-1.566	0.824	-0.462
8	-4.055	1.652	1.336
9	-1.386	-2.624	1.064
10	-0.655	-0.107	-0.945
11	0.820	-4.294	0.901
12	6.600	2.120	1.628
13	0.646	-0.467	0.333
14	-0.500	-0.327	-2.518
15	-0.158	2.000	-2.341
16	-0.215	1.338	-1.668
17	1.119	-2.287	-0.074
18	0.045	-1.688	-0.209
19	-2.341	-0.700	1.676
20	1.673	-1.362	1.754
21	0.406	-3.034	-0.335
22	2.119	1.996	0.443
23	-2.038	3.268	-1.575
24	-1.390	1.450	1.468
25	1.502	2.331	-1.740
26	-0.061	-1.127	-1.981
27	-2.740	0.361	-0.801
28	0.597	-3.800	0.181

La restituzione grafica della tabella è contenuta in fig. 3.

Il confronto dei risultati delle analisi evidenzia che l'aggiunta di ben nove parametri non ha prodotto sostanziali variazioni nella discriminazione delle diverse terre rispetto ai raggruppamenti della classifica C.N.R..

Ciò potrebbe molto probabilmente ottenersi ricorrendo a parametri rappresentativi di caratteristiche meccaniche fra cui gli indici CBR. Non si è ritenuto di seguire tale via dal momento che lo scopo di questo lavoro è, in definitiva, quello di individuare un criterio semplice e rapido per decidere sulla possibilità o meno di utilizzare una terra (eventualmente previa opportuna correzione). A tal fine, ritenuti senz'altro gli indici CBR ed il loro rapporto i più efficaci indicatori per decidere circa l'utilizzazione della terra per la costruzione di rilevanti e sottofondi, si sono ricercate tre relazioni tra tali indici ed i parametri determinati in precedenza che sono di uso corrente nella tecnica stradale. Nella ricerca di tali relazioni è stata peraltro di grande ausilio l'analisi in componenti principali per le utili indicazioni che fornisce sulle correlazioni fra i parametri stessi e sul « peso » relativo che ciascuno di essi assume nel determinare le cercate relazioni.

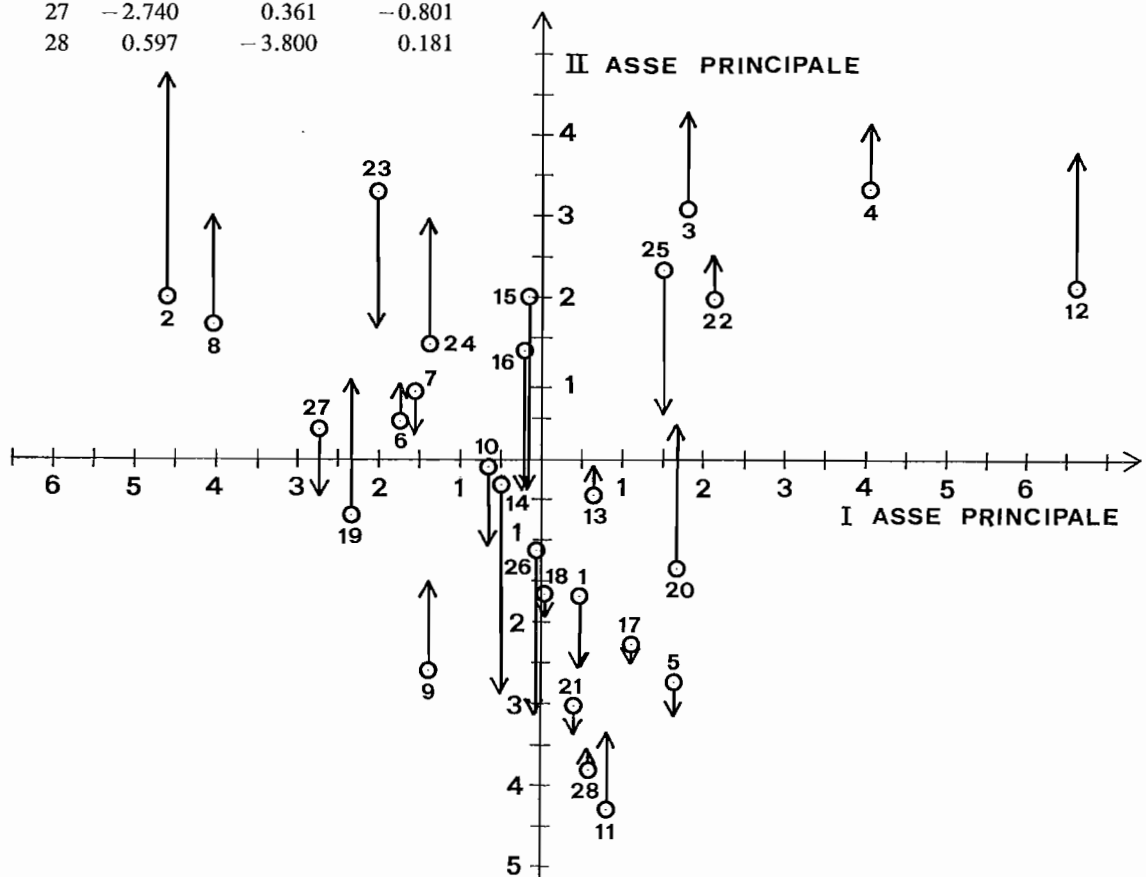


Fig. 3 - Rappresentazione delle terre mediante le prime tre componenti principali (analisi con quattordici parametri).

### 3.2 La ricerca delle relazioni tra CBR, CBRS e CS, ed i parametri di base

Si è visto in precedenza che sui primi tre assi principali viene spiegata la maggior parte della varianza totale; si è ritenuto pertanto sufficiente determinare le regressioni lineari multiple fra CBR, CBRS e CS, e le prime tre componenti principali a loro volta combinazione lineare di tutti i parametri originari.

Con riferimento all'analisi fatta con i cinque parametri della classifica CNR, indicati con I, II, III i valori delle prime tre componenti principali, si è ottenuto:

$$\begin{aligned} \text{CBR} &= 70.70 - 11.10 \text{ (I)} + 3.22 \text{ (II)} - 7.48 \text{ (III)} \\ \text{CBRS} &= 41.33 - 13.09 \text{ (I)} - 0.14 \text{ (II)} - 5.02 \text{ (III)} \\ \text{CS} &= 3.80 + 1.96 \text{ (I)} + 1.52 \text{ (II)} + 0.92 \text{ (III)} \end{aligned}$$

Il coefficiente di correlazione multipla  $r$  e l'errore standard della stima  $s^{(1)}$  sono risultati per le tre regressioni:

$$\begin{array}{ll} r = 0.580 & s = 28.60 \\ r = 0.673 & s = 25.65 \\ r = 0.729 & s = 3.66 \end{array}$$

Con l'analisi eseguita impiegando tutti i 14 parametri si è invece avuto:

$$\begin{aligned} \text{CBR} &= 70.72 - 8.60 \text{ (I)} - 3.12 \text{ (II)} + 7.76 \text{ (III)} \quad r = 0.660 \quad s = 26.39 \\ \text{CBRS} &= 41.35 - 10.50 \text{ (I)} - 4.45 \text{ (II)} + 5.73 \text{ (III)} \quad r = 0.773 \quad s = 21.98 \\ \text{CS} &= 3.80 + 1.55 \text{ (I)} + 1.12 \text{ (II)} + 0.88 \text{ (III)} \quad r = 0.830 \quad s = 2.98 \end{aligned}$$

L'introduzione dei nuovi parametri ha comportato un certo beneficio, soprattutto per la determinazione del rapporto dei CBR. Tuttavia i risultati non sono del tutto soddisfacenti, sia per le prime due coppie di valori di  $r$  ed  $s$ , che per la scarsa praticità di dover operare con un numero troppo elevato di misure.

Daltronde, la causa di una regressione non buona può essere ricercata nell'eccessivo numero di parametri. Per tale ragione si è pensato di eliminarne inizialmente sei, scegliendoli tra i meno influenti nelle relazioni di correlazione.

I successivi tentativi sono stati fatti eliminando e reintroducendo parametri, non essendo possibile stabilire a priori quale fosse la combinazione migliore.

Per brevità si riportano, in sintesi i risultati dei passi più significativi del procedimento. Ogni passo è contraddistinto con il simbolo  $28 \times j$  ( $j$  = numero dei parametri); tra parentesi sono inoltre indicati i parametri adoperati nell'analisi:

$$\begin{array}{llll} 28 \times 8 & \text{CBR} = F \text{ (I,II,III)} & r = 0.763 & s = 22.69 \\ \text{(CNR,ES,S,\Delta h)} & \text{CBRS} = F \text{ (I,II,III)} & r = 0.848 & s = 18.37 \\ \text{(\textsuperscript{2})} & \text{CS} = F \text{ (I,II,III)} & r = 0.786 & s = 3.31 \end{array}$$

$28 \times 7$ (CNR,ES,S)	CBR = F (I,II,III) CBRS = F (I,II,III) CS = F (I,II,III)	$r = 0.768$ $r = 0.847$ $r = 0.717$	$s = 22.48$ $s = 18.43$ $s = 3.72$
$28 \times 7$ (CNR,ES,S,\Delta h)	CBR = F (I,II,III) CBRS = F (I,II,III) CS = F (I,II,III)	$r = 0.646$ $r = 0.750$ $r = 0.839$	$s = 26.81$ $s = 22.93$ $s = 2.91^{(\textsuperscript{3})}$
$28 \times 6$ (CNR,ES)	CBR = F (I,II,III) CBRS = F (I,II,III) CS = F (I,II,III)	$r = 0.661$ $r = 0.764$ $r = 0.725$	$s = 26.35$ $s = 22.38$ $s = 3.69$
$28 \times 5$ (GRAN,LL,SS)	CBR = F (I,II,III) CBRS = F (I,II,III) CS = F (I,II,III)	$r = 0.674$ $r = 0.777$ $r = 0.633$	$s = 25.94$ $s = 21.81$ $s = 4.14$
$28 \times 5$ (GRAN,ES,\Delta h) ( <sup>4</sup> )	CBR = F (I,II,III) CBRS = F (I,II,III) CS = F (I,II,III)	$r = 0.648$ $r = 0.766$ $r = 0.832$	$s = 26.74$ $s = 22.27$ $s = 2.97$
$28 \times 5$ (GRAN,ES,S)	CBR = F (I,II,III) CBRS = F (I,II,III) CS = F (I,II,III)	$r = 0.772$ $r = 0.847$ $r = 0.633$	$s = 22.30$ $s = 18.40$ $s = 4.14$
$28 \times 4$ (GRAN,ES)	CBR = F (I,II,III) CBRS = F (I,II,III) CS = F (I,II,III)	$r = 0.859$ $r = 0.917$ $r = 0.641$	$s = 17.99$ $s = 13.82$ $s = 4.10$

Per quanto riguarda i due CBR, le migliori correlazioni sono scaturite dall'analisi  $28 \times 4$ . Buoni risultati fornisce pure l'analisi  $28 \times 5$  con i parametri (GRAN, ES, S).

In entrambi i casi, come era prevedibile per il basso numero di variabili impiegate, la percentuale di varianza spiegata dai primi tre assi principali è molto alta, rispettivamente 98,6% e 96,1%. Inoltre i parametri di base sono espressi tramite percentuali, non vi è quindi da temere, in una regressione multipla, l'effetto distorcente dovuto a misure aventi grandezza molto diversa.

Queste osservazioni hanno notevole rilevanza pratica poiché si evidenzia la possibilità di scrivere le equazioni di regressione in termini di variabili originarie, cioè non centrate e ridotte, e di svincolarsi dalle componenti principali.

### 3.3 Le regressioni lineari multiple sui parametri di base

#### 3.3.1 Parametri di base: (0,075), (0,4), (2,0), (ES), (S)

Esprese tutte le variabili indipendenti in percentuale, le equazioni di regressione, i coefficienti di correlazione e gli errori standard di stima risultano:

(<sup>1</sup>) La quantità  $s$  è l'errore medio di regressione il cui significato è analogo a quello dello scarto quadratico medio di una curva normale. Esso è stato calcolato tramite la:

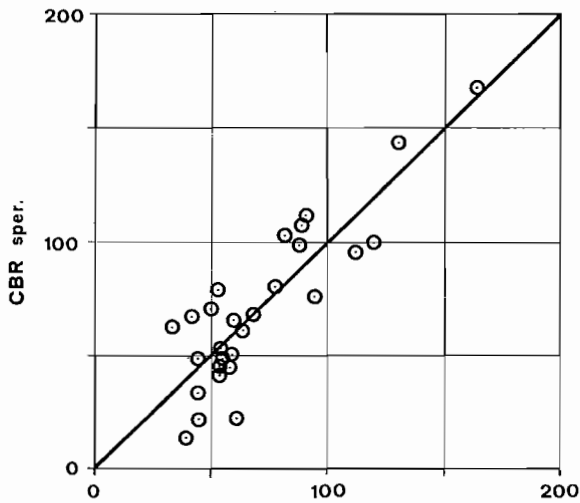
$$s = \text{sqr} [\Sigma(y_i - y_i^*)^2 / k]$$

in cui  $y_i$  è il valore misurato,  $y_i^*$  è quello teorico di regressione e  $k$  è il numero delle misure effettuate.

(<sup>2</sup>) CNR = (0,075), (0,4), (2,0), (LL), (IP).

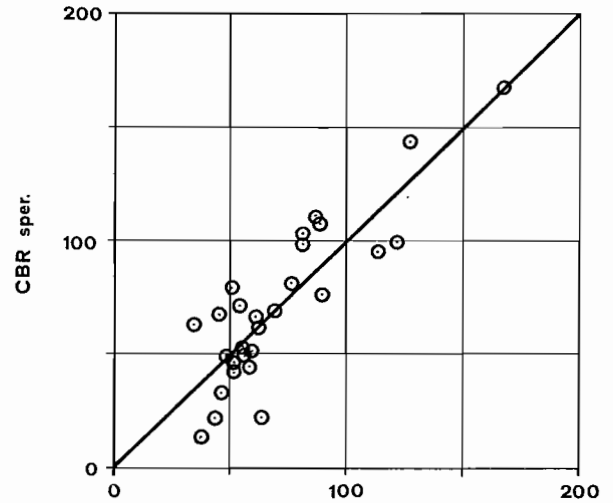
(<sup>3</sup>) I valori di  $r$  ed  $s$  migliorano, rispetto a questi, solo nella regressione non lineare del rapporto dei CBR sull'equivalente in sabbia.

(<sup>4</sup>) GRAN = (0,075), (0,4), (2,0).



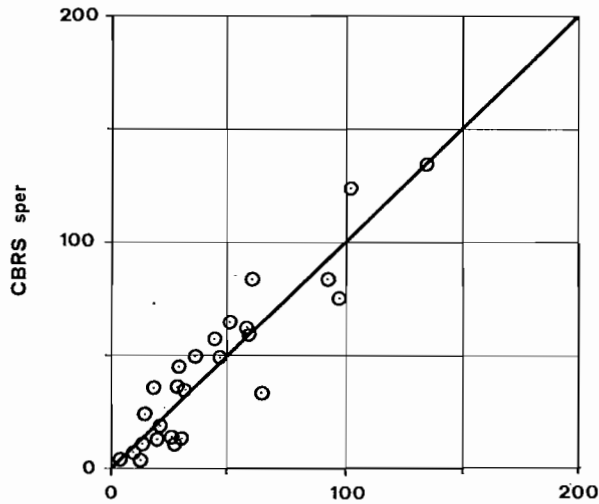
CBR calc.=F(GRAN, ES, S)

Fig. 4 - Confronto tra CBR sperimentali e CBR calcolati.



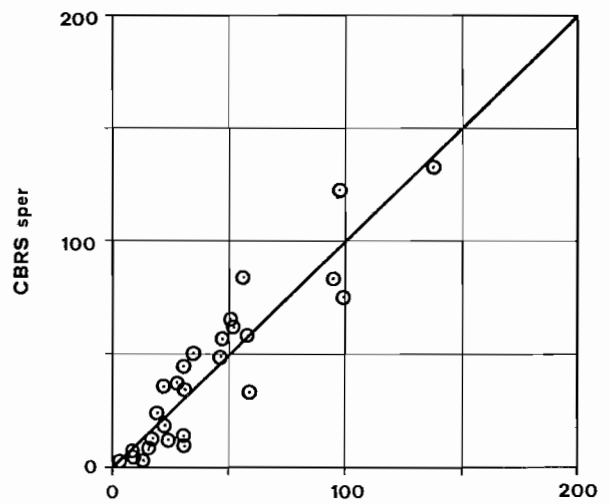
CBR calc.=F(GRAN, ES)

Fig. 6 - Confronto tra CBR sperimentali e CBR calcolati.



CBRS calc.=F(GRAN, ES, S)

Fig. 5 - Confronto tra CBRS sperimentali e CBRS calcolati.



CBRS calc.=F(GRAN, ES)

Fig. 7 - Confronto tra CBRS sperimentali e CBRS calcolati.

$$\begin{aligned} \text{CBR} &= 144.62 + 0.34(0.075) + 0.89(0.4) - 1.90(2.0) + 2.19(\text{ES}) - 0.33(\text{S}) \\ r &= 0.865 \\ s &= 17.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CBRS} &= 96.55 - 0.05(0.075) + 1.05(0.4) - 1.60(2.0) + 2.17(\text{ES}) - 0.38(\text{S}) \\ r &= 0.927 \\ s &= 13.04 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CS} &= -35.79 + 0.30(0.075) - 0.15(0.4) + 0.26(2.0) + 0.07(\text{ES}) + 0.15(\text{S}) \\ r &= 0.698 \\ s &= 3.83 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CBRS} &= 23.42 + 0.10(0.075) + 0.99(0.4) - 1.22(2.0) + 2.40(\text{ES}) \\ r &= 0.923 \\ s &= 13.38 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CS} &= -6.28 + 0.24(0.075) - 0.13(0.4) + 0.11(2.0) - 0.02(\text{ES}) \\ r &= 0.660 \\ s &= 4.01 \end{aligned}$$

Per il confronto tra valori sperimentali e calcolati si vedano le figure 6 e 7.

Nelle figure 4 e 5 vengono messi a confronto i valori dei CBR sperimentali con quelli calcolati mediante le equazioni di regressione.

### 3.3.2 Parametri di base: (0.075), (0.4), (2.0), (ES)

$$\begin{aligned} \text{CBR} &= 80.26 + 0.47(0.075) - 0.84(0.4) - 1.57(2.0) + 2.39(\text{ES}) \\ r &= 0.862 \\ s &= 17.8 \end{aligned}$$

### 3.4 La correlazione semplice con l'equivalente in sabbia

In tutte le regressioni che danno luogo a buone correlazioni compaiono sia l'equivalente in sabbia che le tre granulometrie.

Questo fatto ha spinto ad analizzare le correlazioni semplici tra i parametri di portanza ed i quattro parametri di base presi singolarmente.



L'equivalente in sabbia si è rivelato particolarmente efficace per spiegare le variazioni del CBRS ed ha fornito, attraverso una relazione non lineare, la migliore correlazione efficace per spiegare le variazioni del CBRS ed ha fornito, attraverso una relazione non lineare, la migliore correlazione con il rapporto dei CBR tra tutte quelle fin qui esaminate.

Le equazioni di regressione sono:

$$\begin{aligned} \text{CBR} &= 31.47 + 1.69(\text{ES}) \quad r = 0.860 \quad s = 2.73 \\ \text{CBRS} &= -1.45 + 1.85(\text{ES}) \quad r = 0.897 \quad s = 15.30 \\ \text{CS} &= 21.63(\text{ES})^{-0.78} \quad r = 0.860 \quad s = 2.73 \end{aligned}$$

Le corrispondenti regressioni sono rappresentate nelle figure nn. 8, 9, 10.

#### 4. Conclusioni

Attraverso l'applicazione ripetuta dell'analisi in componenti principali e della regressione multipla sono state ricavate delle relazioni che legano gli indici CBR ed il loro rapporto con pochi parametri di semplice determinazione, in uso corrente nella tecnica stradale.

Più precisamente, l'indice di portanza di una terra costipata alla densità ottima della prova AA-SHO modificata si può ritenere, con buona approssimazione, dipendente dai cinque parametri (0.075), (0.4), (2.0), (ES), (S).

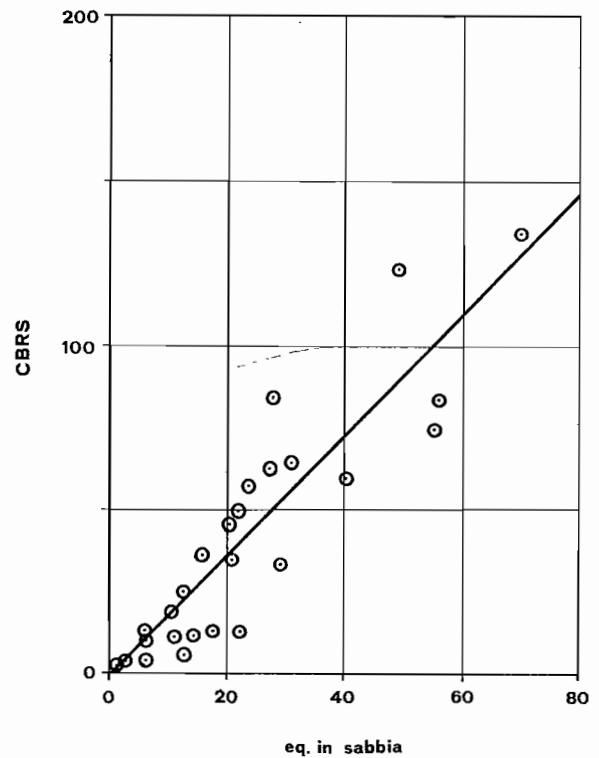


Fig. 9 - Regressione lineare del CBRS su ES.

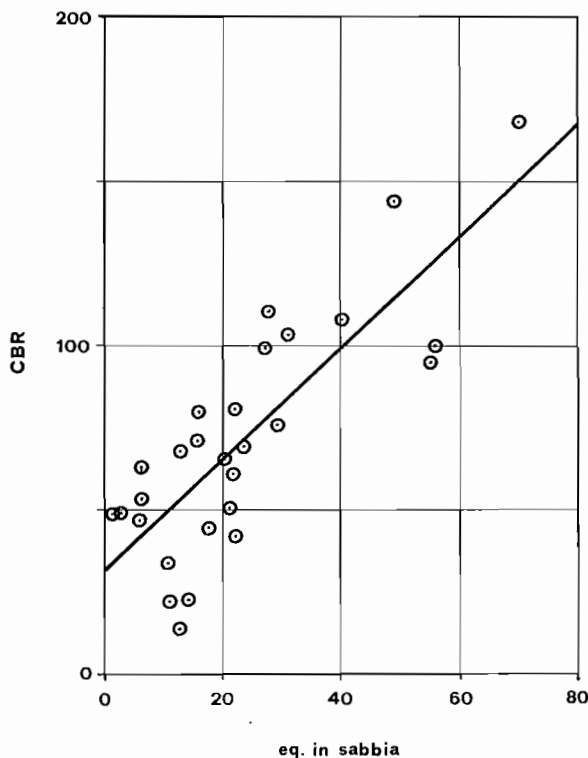


Fig. 8 - Regressione lineare del CBR su ES.

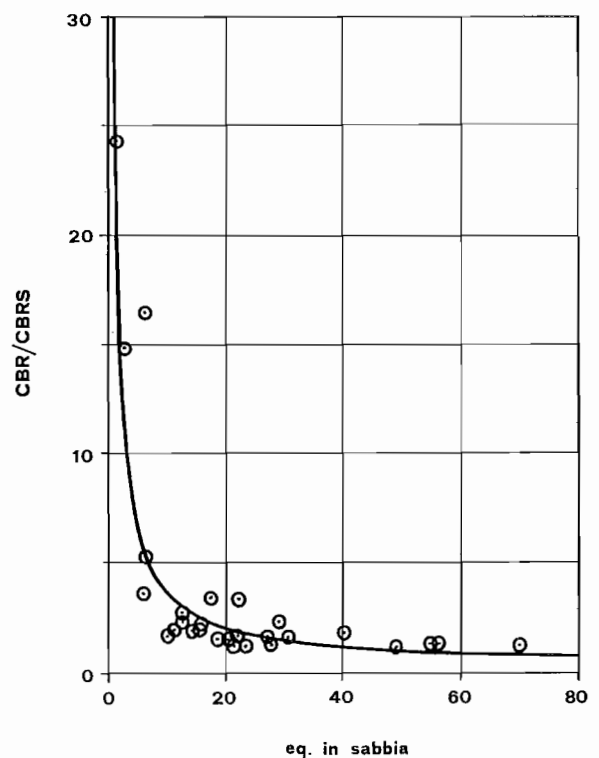


Fig. 10 - Regressione esponenziale del rapporto CS su ES.

Con una approssimazione solo di poco inferiore si può procedere alla stima dei valori del CBR attraverso i primi quattro parametri.

Questa seconda procedura risulta particolarmente vantaggiosa per determinazioni celeri: il quinto parametro, cioè il grado di saturazione, richiede, infatti, la determinazione dell'umidità ottima e della densità massima AASHO allungando sensibilmente i tempi.

La valutazione della variazione di portanza in presenza di acqua può essere fatta agevolmente, anche se con una certa approssimazione, attraverso l'equivalente in sabbia.

Una certa cautela nell'applicazione dei risultati deve derivare dal fatto che la sperimentazione, per la sua notevole laboriosità, è stata circoscritta ad un campione di 28 terre.

Date, però, le caratteristiche di eterogeneità delle terre scelte è lecito pensare che i parametri di base individuati abbiano validità generale per la determinazione della portanza di una terra.

Alla luce delle relazioni trovate, appare possibile esprimersi in modo più razionale circa l'utilizzazione, nelle costruzioni stradali, di terreni altrimenti giudicati inadatti dalla vigente classifica del CNR che inserisce, infatti, per i parametri in essa adoperati, terre di ottime caratteristiche meccaniche e di scarsa suscettibilità all'acqua, in gruppi di terreni da scartare o da adoperare con riserva. Esempio tipico di questa situazione, e ben noto ai tecnici stradali, così come già detto in premessa, è il caso dei terreni campani di origine vulcanica che, pur avendo in genere ottime caratteristiche meccaniche anche in presenza di forti contenuti di umidità, vengono relegati dalla classifica CNR nei gruppi A4 ed A5 e, per questo, rifiutati dalle prescrizioni di molti capitolati di appalto.

Le relazioni qui riportate tra indici CBR, da una parte, e granulometria, equivalente in sabbia e grado di saturazione dall'altra, appaiono, quindi, un contributo non solo ad una più rapida valutazione delle capacità portanti dei terreni stradali, ma anche ad un loro più corretto inquadramento in più realistici criteri di classifica.

Si vuole, infine, segnalare come l'accettazione di terreni altrimenti rifiutati è di immediata ricaduta economica nei casi in cui permette l'uso di terreni di scavo o rinvenibili in sito e evita il ricorso a cave di prestito di materiali aventi migliori caratteristiche, con l'ulteriore beneficio di un migliore impatto sull'ambiente.

#### BIBLIOGRAFIA

BAKER R.F., (1975) - *Handbook of Highway Engineering*. Van Nostrand Reynold, N.Y.  
CNR-UNI (1963) - *Tecnica di impiego delle terre nelle costruzioni stradali*, Roma.

D'ORSI R., ESPOSITO T., GROSSI R., MONTELLA G., (1977) *Analisi in componenti principali applicata a problemi stradali con caratteristiche multidimensionali*. Quaderno n. 4 dell'Istituto di Costruzioni di strade, ferrovie ed aeroporti dell'Università di Napoli.

ESPOSITO T., TOCCHETTI A. (1969) - *Determinazione sperimentale dei parametri di resistenza a taglio fra pozzolane e alcuni materiali da costruzione*. (I parte) La rivista della Strada n. 338, Milano.

ESPOSITO T., TOCCHETTI A. (1970) - *Determinazione sperimentale dei parametri di resistenza a taglio fra pozzolane e alcuni materiali da costruzione*. (II parte) La rivista della Strada n. 345, Milano.

GIANNATTASIO P. (1981) - *Il progetto delle pavimentazioni aeroportuali*. Lithorapid, Napoli.

KOSTORIS A. (1981) - *Elementi di analisi statistica multivariata*. F. Angeli Editore, Milano.

LEBART L., FENOLON J.P. (1973) - *Statistique et informatique appliquées*. Donond, Paris.

NOIRET Y. (1973) - *Complements sur l'analyse en composantes principales appliqués aux sols*. Bull. Liaison des lab. des ponts et chaussées Maj-Juin 1973.

PELLEGRINO A. (1967) - *Proprietà fisico-meccaniche dei terreni vulcanici del napoletano*. Atti dell'VIII convegno di Geotecnica, Cagliari 1967.

PEZZAROSSA R. (1986) - *Classificazione delle vulcaniti ad uso stradale*. Atti del XX° Convegno Nazionale Stradale, Cagliari.

ROMAN ALBA R. (1972) - *Propositions pour une nouvelle classification*. Bull. Liaison des lab. des ponts et chaussées, maj-Juin 1973.

S.E.T.R.A., L.C.P.C. (1976) - *Recommandations pour les terrassements routiers*. Paris.

TORRENS IBERN J. (1972) - *Modèles et méthodes de l'analyse factorielle*. Dunod, Paris.

#### SUMMARY

##### Criteria of soil choice in the field of road construction

This work deals with some functional relations between load bearing capacity, water susceptibility of soils, and some simple and easily determined parameters.

They are the result of a broad experimentation conducted on soils, most of which came from the Campania region.

The research study was carried out so as to get round the difficulties stemming from the soil classification which is presently enforced in Italy - the CNR classification -. Actually, it happens that soils presenting excellent mechanical characteristics and being sufficiently insensitive to water action, are refused as road building materials by many specifications of contracts, on the basis of the classification itself.

An example is the case of the soils of the Campania region, generally included among A4 and A5 soils.

The experiments were carried out on sample of 28 soils, for which road utilization parameters were measured, without making chemical and mineralogical tests nor shearing strength tests.

The parameters are listed in section 2. In particular, we indicated the capacity bearing ratio, the optimum water content and at the maximum dry density of the modified AASHO test, the same index after imbibition of the test pieces and their ratio by CBR, CBRS and CS respectively. Because of the elevated number of parameters (14), the experimental results were analysed with Principal Components Analysis which, together with the regression analysis, allowed to determine some relations between bearing capacity (CBR and CBRS) and water sensitivity indexes (CS = CBR/CBRS) and some parameters, normally used in road construction.

The principal components analysis was especially utilized for studying experimental results first by considering the CNR classification parameters (0.075, 0.4, 2.0, LL, IP), then by including the parameters from 1 to 14 in tab. 1, and finally choosing the appropriate combinations.

In the first case (see 3.3.1), the resulting soil classification is quite similar to that of CNR.

In all the cases the first three principal axes explain most of the total variance therefore deemed it sufficient to determine the multiple linear regression between CBR, CBRS and CS and the first three components, which are in turn the linear combinations of the original parameters.

We indicated by I, II, III the values of the first three principal components, and by successive trials, we obtained the best correlation utilizing the sieve passing percentage 0.075, 0.4, 2.0, the equivalent in sand and the saturation degree (see 3.2), as basic parameters.

Having observed that these parameters are inherently dimensionless and therefore it is not necessary to proceed with standardized variables, finally the following regression equations were obtained:

$$\begin{aligned} \text{CBR} &= 144.62 + 0.34(0.075) + 0.89(0.4) - 1.90(2.0) + 2.19(\text{ES}) - 0.33(\text{S}) \\ \text{CBRS} &= 95.55 - 0.05(0.075) + 1.05(0.4) - 1.60(2.0) + 2.17(\text{ES}) - 0.38(\text{S}) \\ \text{CS} &= -35.79 + 0.30(0.075) - 0.15(0.4) + 2.26(2.0) + 0.07(\text{ES}) + 0.15(\text{S}) \end{aligned}$$

The equivalent in sand proved particularly effective in explaining the CBRS variations, and gave, through a non linear relation,

the best correlation with the CBR ratio among those so far examined.

The following regression equations were obtained:

$$\text{CBR} = 31.47 + 1.69(\text{ES})$$

$$\text{CBRS} = -1.45 + 1.85(\text{ES})$$

$$\text{CS} = 21.63(\text{ES})^{-0.78}$$

The results are to be applied cautiously, since the experiments were limited to a sample of 28 soils.

Nevertheless, given the heterogeneity of the soils that were chosen, the detected basic parameter are very likely to be generally useful in determining the load bearing capacity of a given soil.

In the light of the relations are found, it seems therefore possible utilizing soil classified as «non suitable» according to the enforced CNR classification, in road construction.

The criterion has an immediate economic fallout, in as much as it allows the use of soils which can be often found on site, reducing the need of resorting to lending quarries, and also having very good consequences on environmental protection.