

L'interpretazione statistica dell'analisi granulometrica in un'esperienza interlaboratori internazionale

P. GIANNATTASIO *

SOMMARIO: Nell'ambito di una sperimentazione interlaboratori tesa a paragonare l'accuratezza di vari metodi di determinazione della percentuale di legante nelle miscele bituminose (a cui hanno partecipato sedici organizzazioni di undici Paesi tra cui il Laboratorio di Costruzioni stradali dell'Università di Napoli) è stato correlativamente effettuata l'analisi granulometrica su numerosi provini, teoricamente identici, ottenendosi una copiosa messe di dati che l'Autore ha ritenuto molto utili per valutare la fedeltà della prova e sviluppare alcune considerazioni al riguardo.

In particolare, sono stati sottoposti i dati disponibili a un'analisi statistica per determinare la « ripetibilità » e « riproducibilità » della prova granulometrica

Constatato che questi parametri variano con la percentuale di materiale passante, è stato ricercato e individuato un possibile legame funzionale espresso mediante una specifica relazione analitica.

Sono state infine svolte alcune considerazioni sull'influenza dell'intrinseca eterogeneità del materiale nella variabilità dei risultati e sui riflessi che tale variabilità dovrebbe avere nella redazione dei capitolati.

1. Premessa

L'accordo fra i risultati ottenuti in uno o più laboratori che eseguono l'analisi granulometrica su una « stessa » miscela di inerti, cioè su provini ottenuti per suddivisione di un unico campione o formati mediante l'apporto, nelle medesime proporzioni, di più componenti, dipende dalle seguenti cause:

— eterogeneità del materiale, ossia dei provini, connessa alle operazioni per la loro formazione;

— errore casuale introdotto dall'operatore nella ripetizione della prova;

— eventuali mutamenti delle condizioni di prova: operatore, apparecchiatura, laboratorio, tempo (epoca di esecuzione) e specifica della procedura di prova (quando non sia unificata).

La valutazione di tale accordo o, in altri termini, della fedeltà della prova, viene effettuata generalmente, mediante la « ripetibilità » e la « riproducibilità ».

La ripetibilità tiene conto solo delle prime due cause di variazione, mentre la riproducibilità di tutte e tre le cause elencate (1).

In una indagine effettuata alcuni anni orsono presso il Laboratorio dell'Istituto di Costruzioni di Strade, Ferrovie ed Aeroporti dell'Università di Napoli [D'ORSI e GIANNATTASIO, 1981] era stata determinata la ripetibilità della prova

(relativamente ai trattenuti a vari setacci) per una data miscela.

Ora una recente sperimentazione interlaboratori [P.I.A.R.C., 1983 e GOODSALL, 1983] alla quale hanno partecipato sedici organizzazioni di undici diversi Paesi, tra cui l'anzidetto Laboratorio dell'Università di Napoli, e che aveva come principale obiettivo quello di paragonare l'accuratezza di vari metodi di determinazione della percentuale di legante nelle miscele bituminose (ma nel corso della quale sono state anche ripetute numerose analisi granulometriche), consente di procedere a una più completa valutazione della fedeltà della prova attraverso la determinazione sia della ripetibilità che della riproducibilità.

2. Analisi dei risultati dell'esperienza interlaboratori internazionale

I dati di cui si dispone [P.I.A.R.C., 1983] per valutare la fedeltà dell'analisi granulometrica consistono in diciotto serie di risultati ottenuti dai vari laboratori (2) eseguendo la prova secon-

(1) Si noti che generalmente la ripetibilità e la riproducibilità « misurano » la fedeltà di un metodo di prova per il quale è ben determinata la specifica della procedura da utilizzare. Sopra, invece, si è considerata la possibilità della mancanza di una procedura strettamente unificata (come si è verificato nel caso dell'esperienza interlaboratori oggetto del presente studio), dando quindi un significato estensivo alla « riproducibilità ».

(2) Come si è accennato, i laboratori partecipanti all'indagine sono stati in numero di 16, ma poiché qualcuno di essi ha effettuato le prove, in condizioni mutate, su due serie di campioni, si dispone di 18 serie di risultati utilizzabili ai fini della valutazione della ripetibilità e della riproducibilità.

Nel seguito si considereranno le 18 serie come afferenti ad altrettanti « laboratori ».

* Prof. Ing. Pietro GIANNATTASIO, Associato in Teoria e Tecnica delle Sovrastrutture Stradali e Ferroviarie, Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli.

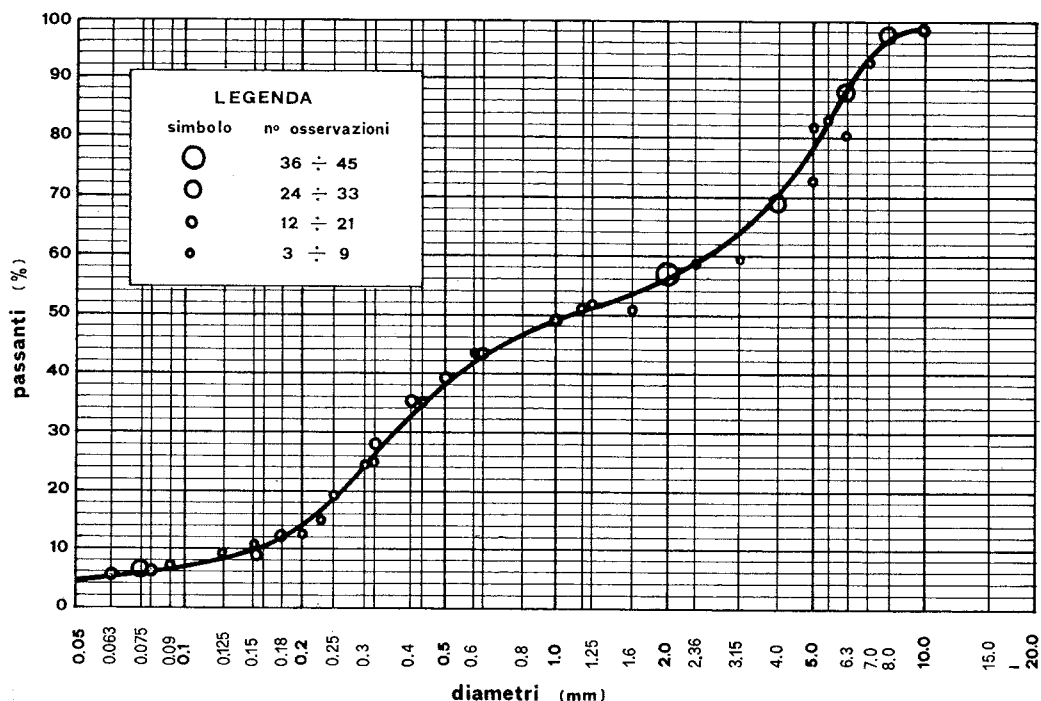


Fig. 1. - Curva granulometrica rappresentativa del materiale adoperato nell'esperienza interlaboratori internazionale.

do la loro normale procedura (come accennato, non strettamente unificata per quanto riguarda modalità e tempi di setacciatura).

Ogni laboratorio partecipante all'indagine aveva ricevuto tre provini di una miscela appositamente confezionata, differenti tra loro per i contenuti di bitume (6 - 5,5 - 5%) e di filler (6 - 6,5 - 7%).

Per ciascun tipo, i provini possono ritenersi formati dallo « stesso » materiale essendo stati preparati tutti dal Transport and Road Research Laboratory, ciascuno individualmente mediante l'apporto nelle medesime proporzioni di tre componenti (aggregato granitico passante al setaccio da 10 mm, aggregato di sabbia fine silicea, filler calcareo).

Ogni laboratorio ha utilizzato, per eseguire l'analisi granulometrica un certo numero di setacci e crivelli ⁽³⁾ (di apertura diversa da un laboratorio all'altro) per cui si dispone di un totale di 426 valori di passanti (%) su 35 setacci. Tali passanti sono riportati in Appendice (Tab. IA) insieme ai valori che ci si attendeva di ottenere secondo le risultanze di indagini preliminari.

A causa del diverso quantitativo di filler utilizzato per la formazione dei tre provini, tali valori sono leggermente diversi tra loro. Pertanto, al fine di valutare la ripetibilità della prova, è stata effettuata un'opportuna omogeneizzazione dei valori previsti.

Indicando con p_{i1} , p_{i2} , p_{i3} i valori dei passanti

ad un dato setaccio ottenuti nel laboratorio i^{mo} sui tre provini e con p_1^* , p_2^* e p_3^* i corrispondenti valori previsti, si sono calcolati i « passanti corretti » (omogeneizzati rispetto a p_{i2}):

$$p'_{i1} = p_{i1} \frac{p_2^*}{p_1^*}, \quad p'_{i2} = p_{i2}, \quad p'_{i3} = p_{i3} \frac{p_2^*}{p_3^*}$$

I valori dei passanti così corretti, per tutti i setacci e per tutti i laboratori, sono riportati in Appendice (Tab. IIA), insieme con le loro medie. Queste ultime sono state rappresentate in Fig. 1 contrassegnandole con un cerchietto la cui dimensione è indicativa del numero di misure ad esse afferenti e, quindi, del « peso » di tali medie. Tenendo conto approssimativamente di tali pesi è stata tracciata la curva granulometrica rappresentativa del materiale in questione.

Sui valori dei passanti corretti è stata eseguita l'analisi della varianza.

Strutturato il risultato di una prova in relazione agli errori in esso presenti, mediante un modello matematico di tipo lineare del tipo:

$$p'_{ik} = m + l_i + e_{ik} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, q \\ k = 1, 2, 3 \end{cases}$$

⁽³⁾ Nel seguito verrà adoperata la dizione « setacci » sia per i setacci propriamente detti, cioè i vagli a maglia quadrata, che per i crivelli, cioè quelli con fori circolari.

in cui:

p'_{ik} è il risultato (passante « corretto », ad un dato setaccio che sia stato utilizzato da q laboratori) ottenuto dal laboratorio i^{mo} alla replicazione k^{ma} della prova,

m è il valore vero convenzionale,

l_i è l'errore sistematico introdotto dal laboratorio i^{mo} ($i = 1, 2, \dots, q$),

e_{ik} è l'errore aleatorio introdotto nel risultato

all'atto della ripetizione k^{ma} della prova nel laboratorio i^{mo} ($k = 1, 2, 3$),

sono state ricavate le stime delle varianze di ripetibilità e di riproducibilità [D'ORSI e GIANNATTASIO, 1978]:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^3 (p'_{ik} - p'_{i.})^2}{2q} \quad (1)$$

$$s_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^q (p'_{i.} - p'.)^2}{q-1} + \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^3 (p'_{ik} - p'_{i.})^2}{3q} \quad (2)$$

in cui si è indicato con $p'_{i.}$ la media dei risultati nel laboratorio i^{mo} e con $p'.$ la media di tutti i risultati.

Dalle (1) e (2) sono state dedotte la *ripetibilità* r e la *riproducibilità* R , che rappresentano il limite al disopra del quale è situato con una probabilità del 5% il valore assoluto della differenza fra due risultati (passanti, in percentuale, ad un dato setaccio) ottenuti su un materiale identico sottoposto a prova rispettivamente nelle medesime condizioni (stesso laboratorio e operatore, stessa apparecchiatura e procedura, stessa epoca) e in condizioni differenti (laboratori e/o operatori e/o procedura e/o epoche, diversi):

$$r = 1,96 \sqrt{2} s_r \quad (3)$$

$$R = 1,96 \sqrt{2} s_R \quad (4)$$

I valori di r ed R sono riportati nella tabella I.

L'analisi statistica effettuata presuppone che per ciascun laboratorio l'errore aleatorio (errore intralaboratorio) abbia distribuzione normale con varianza σ_r^2 (varianza di ripetibilità) identica per tutti i laboratori (omoscedasticità) e che l'errore sistematico introdotto dai laboratori (errore interlaboratori) abbia pure distribuzione normale (4).

La prima ipotesi, ossia quella di normalità degli errori intralaboratori non si è potuta verificare nel caso in questione in quanto il numero dei risultati disponibili per un dato setaccio e per uno stesso laboratorio era in ogni caso insufficiente; essa però è risultata accettabile nella precedente indagine (5) di cui si è fatto cenno innanzi, effettuata presso il Laboratorio dell'Istituto di Costruzioni di Strade, Ferrovie ed Aeroporti dell'Università di Napoli.

L'ipotesi di omoscedasticità è stata preliminarmente verificata col test di Cochran; non sono risultate in nessun caso deviazioni significative al livello dell'1%.

L'ipotesi di normalità dell'errore interlaboratori, verificata mediante il test di Shapiro-Wilk applicato alle medie ($p'_{i.}$) ottenute nei vari laboratori, è risultata accettabile al livello di confidenza del 5%.

Come si può constatare osservando la Tab. I, la ripetibilità (r) e la riproducibilità (R), innanzi stimate, variano con l'apertura del setaccio, ovvero con la corrispondente percentuale media di passante (p). Pertanto si sono ricercate le più opportune relazioni fra le r , R e i valori p , al fine di una migliore conoscenza delle leggi di variazione della ripetibilità e della riproducibilità con il passante medio.

Sono state cercate, cioè delle curve che fornissero una buona interpolazione dei valori stimati di r ed R nell'ambito della regressione polinomiale, tenendo anche presente che, ovviamente, per $p = 0$ e $p = 100\%$ è $r = R = 0$.

All'uopo si sono suddivisi i passanti in otto classi e sono state trovate per ciascuna di esse le coppie di valori (r, p) e (R, p) rappresentative di quella classe. Precisamente, sono stati mediati i valori della ripetibilità, della riproducibilità e dei corrispondenti passanti ricadenti in ciascuna classe, attribuendo ad ogni valore un peso proporzionale al numero di misure ad esso afferenti ($3q$, essendo q il numero di laboratori che hanno contribuito alla determinazione di tale valore).

(4) Va peraltro ricordato che l'analisi della varianza è notoriamente robusta a deviazioni dalla condizione di normalità.

(5) L'accettabilità dell'ipotesi di normalità è stata verificata, al livello di confidenza del 5%, col testo di Shapiro-Wilk.

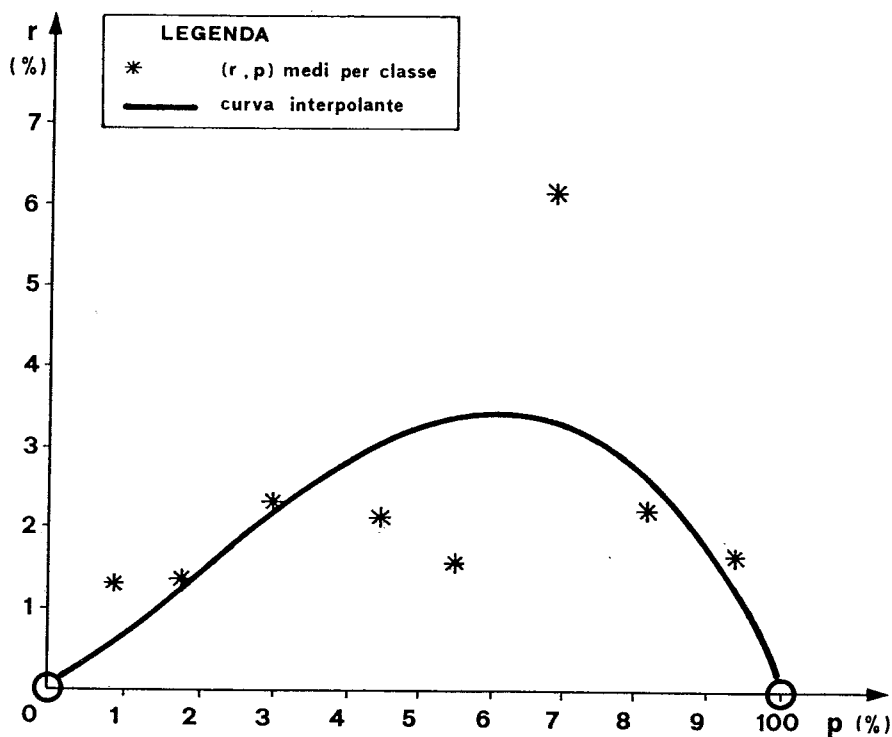


Fig. 2. - Legge di variazione della ripetibilità (r) in funzione del passante (p).

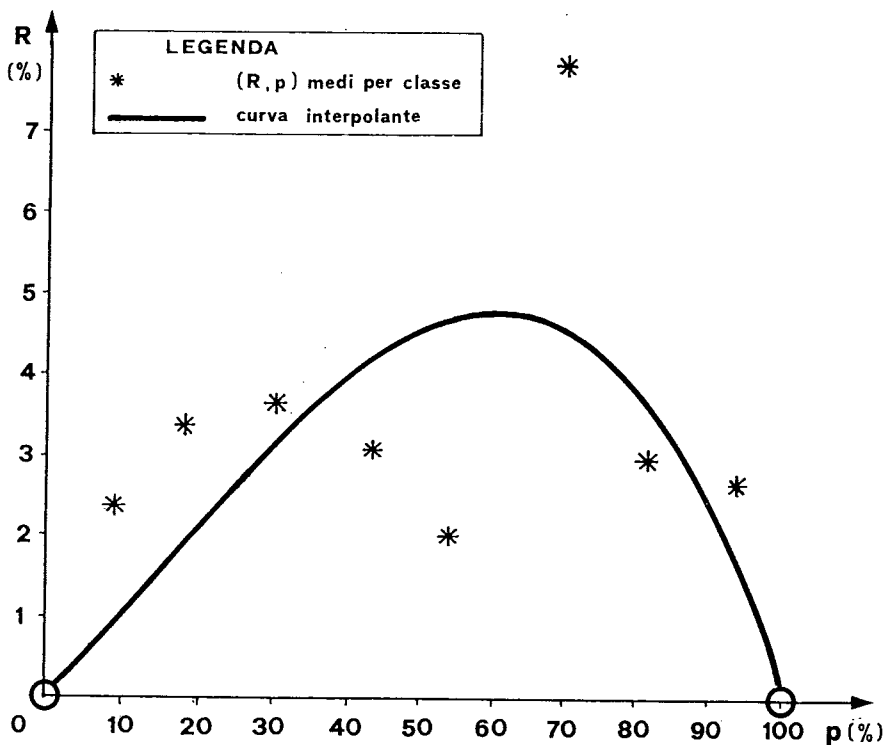


Fig. 3. - Legge di variazione della riproducibilità (R) in funzione del passante (p).

Questa operazione si è resa necessaria per evitare che la distribuzione non uniforme del numero di misure disponibili nel campo di variazione ($0 \div 100$) dei passanti, condizionasse

in modo disomogeneo l'andamento delle curve interpolanti.

I risultati di tale operazione (\bar{p} , \bar{r} , \bar{R}) sono riportati nella già citata Tab. I.

Tab. 1 - Media, ripetibilità e riproducibilità dei passanti (%) nell'esperienza interlaboratori internazionale.

Classe	Setaccio (mm)	Numero risultati	Media p (%)	Ripetibilità r (%)	Riproducibilità R (%)
87,5 ÷ 100	10.0	15	98.35	1.10	1.14
	8.0	30	97.33	1.92	3.06
	7.1	6	92.25	1.56	2.73
	6.3	27	87.60	1.87	3.13
		N = 78	$\bar{p} = 93.77$	$\bar{r} = 1.72$	$\bar{R} = 2.69$
75 ÷ 87,5	5.6	6	82.70	2.42	4.04
	6.3	6	80.25	1.92	1.92
	5.0	3	81.16	2.69	-
		N = 15	$\bar{p} = 81.41$	$\bar{r} = 2.27$	$\bar{R} = 2.98$
62,5 ÷ 75	5.0	9	72.46	7.40	10.55
	4.0	33	69.23	5.92	7.24
		N = 42	$\bar{p} = 69.92$	$\bar{r} = 6.24$	$\bar{R} = 7.95$
50 ÷ 62,5	3.15	6	59.37	0.81	0.93
	2.36	3	58.57	0.16	-
	2.0	45	56.87	1.52	1.83
	1.6	6	50.75	2.60	2.60
	1.25	9	51.82	1.94	2.51
	1.18	3	50.63	1.68	-
		N = 72	$\bar{p} = 55.75$	$\bar{r} = 1.55$	$\bar{R} = 1.91$
37,5 ÷ 50	1.0	21	49.29	3.46	3.46
	0.63	18	43.43	1.70	2.86
	0.60	6	43.17	0.95	2.11
	0.50	12	39.68	0.75	2.72
		N = 57	$\bar{p} = 44.77$	$\bar{r} = 2.07$	$\bar{R} = 2.97$
25 ÷ 37,5	0.425	3	35.04	0.96	-
	0.40	15	35.18	2.26	3.14
	0.32	6	25.17	1.88	1.88
	0.315	12	26.48	2.98	5.19
		N = 36	$\bar{p} = 30.60$	$\bar{r} = 2.33$	$\bar{R} = 3.65$
12,5 ÷ 25	0.30	3	24.33	0.85	-
	0.25	9	19.70	1.28	4.04
	0.212	6	14.78	0.79	2.38
	0.20	3	12.85	2.72	-
		N = 21	$\bar{p} = 17.98$	$\bar{r} = 1.29$	$\bar{R} = 3.38$
p = 0 ÷ 12,5	0.18	18	12.19	1.84	2.45
	0.16	12	8.39	1.18	2.09
	0.15	3	10.72	2.55	-
	0.125	9	9.34	2.65	2.65
	0.09	6	7.19	1.91	4.06
	0.08	12	6.00	0.82	1.97
	0.075	33	6.74	0.91	2.38
	0.063	12	5.47	0.99	2.77
		N = 105	$\bar{p} = 7.99$	$\bar{r} = 1.35$	$\bar{R} = 2.48$

Partendo da tali valori si è eseguita l'analisi della regressione polinomiale usando, tra i vari tipi di curve prese in considerazione, quella espressa dalla relazione:

$$y = a + b p \ln p + cp^3$$

che ha dato la migliore interpolazione e i cui coefficienti sono stati stimati applicando il metodo dei minimi quadrati.

Imponendo che per $p \approx 0$ fosse $r \approx R \approx 0$ e per $p = 100$, $r \approx R \approx 0$, è risultato:

$$r = 0,125 + 0,0230 p \ln p - 0,0000105 p^3 \quad (5)$$

con coefficiente di determinazione $R^2 = 0,70$ ed:

$$R = 0,286 + 0,0313 p \ln p - 0,0000145 p^3 \quad (6)$$

con coefficiente di determinazione $R^2 = 0,69$.

Le relazioni trovate sono rappresentate graficamente nelle figure 2 e 3.

Per completezza sono anche stati esaminati i « trattenuti » (%) su alcuni setacci, ricavati per differenza dai passanti corretti (v. Tab. IIIA in Appendice).

Su tali trattenuti è stata eseguita l'analisi della varianza seguendo lo stesso criterio esposto a proposito dei passanti ⁽⁶⁾ e pervenendo alle stime della ripetibilità e della riproducibilità riportate in Tab. II.

Tab. II - Media, ripetibilità e riproducibilità dei trattenuti (%) nell'esperienza interlaboratori internazionale.

Setaccio	Numero risultati	Media \bar{t} (%)	Ripetibilità r (%)	Riproducibilità R (%)
8,0	30	2,67	1,92	3,08
6,3	18	9,59	1,91	2,99
4,0	24	18,57	6,06	6,98
2,0	33	12,51	5,69	6,97
0,4	15	21,88	1,81	3,20
0,18	15	23,13	2,57	3,84
0,075	15	4,88	1,11	2,29
Fondo	33	6,74	0,91	2,38

Infine, allo scopo di eseguire dei confronti con le tolleranze comunemente ammesse dai ca-

pitolati stradali nei contenuti di aggregato grosso, sabbia e filler per i conglomerati bituminosi, è stata determinata la variabilità di tali contenuti nell'esperimento interlaboratori.

Precisamente, calcolate (mediante differenze di passanti corretti - vedi Tab. VA in Appendice) per i vari provini esaminati nei diversi laboratori:

a) le percentuali di materiale trattenuto al setaccio da 2 mm (*aggregato grosso*),

b) le percentuali di materiale passante al setaccio da 2 mm e trattenuto a quello da 0,075 (*sabbia*),

c) le percentuali di materiale passante al setaccio da 0,075 mm (*filler*),

è stata eseguita su tali percentuali l'analisi della varianza ⁽⁷⁾ (previa verifica delle consuete ipotesi di normalità e omoscedasticità), pervenendo ai risultati riportati in Tab. III.

3. Confronto con una precedente esperienza

I risultati dell'esperienza interlaboratori internazionale sono stati confrontati con quelli dell'esperienza eseguita a suo tempo presso il Laboratorio di costruzioni stradali dell'Università di Napoli di cui innanzi si è fatto cenno e della quale si è riferito in una precedente memoria [D'ORSI e GIANNATTASIO, 1981].

L'analisi granulometrica fu ripetuta 32 volte su altrettanti provini ricavati in laboratorio per riduzione ⁽⁸⁾ di un campione, ottenendosi — per i passanti — i valori medi, le stime delle varianze di ripetibilità e le ripetibilità riportate in Tab. IV.

Il confronto delle varianze di ripetibilità sti-

⁽⁶⁾ Anche in questo caso l'ipotesi di normalità degli errori intralaboratori è stata ritenuta accettabile in quanto verificata nella precedente indagine [D'ORSI e GIANNATTASIO, 1981]. L'ipotesi di omoscedasticità, verificata col test di Cochran è risultata accettabile al livello di confidenza del 5% circa, così come quella di normalità dell'errore interlaboratori verificata mediante il test di Shapiro-Wilk.

Si noti che è stato necessario eseguire tali test, già svolti per i passanti, anche per i trattenuti, pur essendo essi differenze delle variabili aleatorie « passanti », in quanto queste ultime non sono mutuamente indipendenti.

⁽⁷⁾ Per il trattenuto al setaccio da 2 mm (complementare a 100 del passante) e per il passante al setaccio da 0,075 mm, cfr. anche Tab. I.

⁽⁸⁾ La suddivisione del campione in provini fu effettuata mediante un apposito apparecchio, lo « splitter ».

Tab. III - *Media, scarto-tipo di ripetibilità (s_r), scarto-tipo di riproducibilità (s_R), ripetibilità (r), riproducibilità (R) e intervallo di variazione (±2s_R) per i contenuti di aggregato grosso, sabbia e filler, nell'esperienza interlaboratori internazionale.*

Inerte	Numero risultati	Media (%)	s _r (%)	s _R (%)	r (%)	R (%)	±2 s _R (%)
AGGREGATO GROSSO (tratt. a 2 mm)	45	43,13	0,55	0,66	1,52	1,83	±1,3
SABBIA (pass. a 2 mm tratt. a 0,075 mm)	30	50,18	0,62	0,98	1,73	2,71	±2,0
FILLER (pass. a 0,075 mm)	33	6,74	0,33	0,86	0,91	2,38	±1,9

Tab. IV - *Media, varianza di ripetibilità e ripetibilità dei passanti, nell'esperienza svolta nel Laboratorio dell'Università di Napoli.*

Setaccio (mm)	Media p (%)	Varianza di ripetibilità s _r (%)	Ripetibilità r (%)
40	100,00	0	0
25	81,55	4,49	5,88
15	67,70	5,11	6,26
10	53,08	3,65	5,29
5	35,03	1,85	3,77
2	23,24	0,88	2,61
0,40	10,63	0,20	1,25
0,18	7,48	0,12	0,94
0,075	6,15	0,09	0,83

mate nell'esperienza internazionale con quelle stimate nell'esperienza del Laboratorio di Napoli ha confermato le risultanze dell'analisi innanzi svolta.

Difatti, applicato il test di Bartlett, di omogeneità della varianza, ai passanti per i quali le medie ottenute nel Laboratorio di Napoli e in quelli partecipanti all'indagine internazionale erano pressoché coincidenti (vedi Tab. VA in Appendice), non sono risultate deviazioni significative al livello di confidenza del 5% e quindi si è potuto concludere che, per ciascun passante, i valori della varianza ottenuti nelle due sperimentazioni possono ritenersi « stime » diverse della medesima « varianza di ripetibilità » σ_r^2 . Altrettanto può dirsi, ovviamente, per i valori della ripetibilità riscontrati nelle due esperienze che possono quindi ritenersi, pure essi, « stime » diverse della medesima ripetibilità $r = 1,96 \sqrt{2} \sigma_r$.

Sui valori della ripetibilità ottenuti nell'esperienza del laboratorio di Napoli è stata inoltre eseguita l'analisi della regressione usando una curva dello stesso tipo considerato innanzi ($y = a + b \times \ln x + cx$), ottenendosi un elevato coefficiente di determinazione ($R^2 = 0,97$) che

conferma l'idoneità del tipo di curva prescelto a rappresentare la funzione (r, p) ⁽⁹⁾.

4. Considerazioni e conclusioni

L'analisi statistica effettuata consente le seguenti conclusioni e considerazioni:

— La ripetibilità (r) e la riproducibilità (R) dell'analisi granulometrica, valutate con riferimento alla percentuale di materiale passante (p), variano con l'entità di tale percentuale. Una stima di esse, basata su risultati ottenuti in un'indagine interlaboratori internazionale, è fornita dalle relazioni:

$$r = 0,13 + 0,023 p \ln p - 0,000011 p^3$$

$$R = 0,29 + 0,031 p \ln p - 0,000015 p^3$$

rappresentate nelle Figg. 2 e 3.

L'esame dei risultati di una sperimentazione svolta anni addietro presso il Laboratorio di Costruzioni stradali dell'Università di Napoli ha confermato la validità della relazione fra la ripetibilità ed il passante innanzi indicata, principalmente per quanto riguarda la sua struttura, ossia il tipo di legame funzionale fra r e p.

Per quanto riguarda i coefficienti delle relazioni (r, p) ed (R, p) va osservato che ad essi non può essere attribuito un significato deterministico, rappresentando dei parametri di cui i valori indicati sono solo delle stime.

— Il confronto delle curve espresse dalle relazioni sopra riportate mostra che il rapporto fra la riproducibilità (R) e la ripetibilità (r) presenta, generalmente, un ordine di grandezza

⁽⁹⁾ Nell'esperienza del Laboratorio di Costruzioni stradali di Napoli è risultato:

$$r = 0,094 + 0,041 p \ln p - 0,000019 p^3$$

di circa 1,4; sarà anche, allora, $s_R/s_T \approx 1,4$ e quindi $s_R^2/s_T^2 \approx 2$, e ricordando che la « varianza di riproducibilità » s_R^2 è somma della « varianza di laboratorio » s_L^2 e della « varianza di ripetibilità » s_T^2 , si deduce che s_L^2 ed s_T^2 sono circa uguali.

Può quindi concludersi che la variabilità è imputabile pressoché in egual misura al fattore « laboratorio » (errori sistematici introdotti dai laboratori) e agli errori aleatori introdotti nella ripetizione della prova in uno stesso laboratorio; questi ultimi dipendono, come è stato dimostrato in una precedente memoria [D'ORSI e GIANNATTASIO, 1981], principalmente dalla variabilità nella composizione granulometrica dei provini.

— Per quanto attiene l'impiego nei conglomerati bituminosi, si osserva — completando e precisando un concetto già accennato nella accennata precedente memoria — che i capitolati generalmente prevedono una tolleranza del contenuto di aggregato grosso di ± 5 (sulla percen-

tuale corrispondente alla curva granulometrica prescelta), di ± 3 per la sabbia e di $\pm 1,5$ per il filler. Ora, l'intervallo di variazione di tali contenuti (al di fuori del quale un risultato può ricadere col 5% di probabilità) è risultato (cfr. Tab. III), nella prova interlaboratori, molto vicino per la sabbia, e addirittura superiore per il filler, alla tolleranza anzidetta e ciò senza contare la intrinseca variabilità del materiale in sito.

Appare quindi evidente che o si riesce a diminuire in maniera sensibile, in sito e in laboratorio, la variabilità nella composizione granulometrica del materiale, nonché a ridurre gli errori sistematici introdotti dai laboratori, mediante un'indicazione stretta ed unificata della procedura di prova, o si deve realisticamente prenderne atto nei capitolati ampliando la tolleranza.

La quantificazione di questa \bar{r} richiederebbe, naturalmente, un approfondito esame statistico dell'intrinseca variabilità del materiale generalmente riscontrabile in sito.

Appendice

Tab. II A - Passanti « corretti »

APERTURA SETACCIO (MM)	PASSANTE PREVISTO (%)	SERIE																		MEDIA P (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
10,0 ^φ	98,2	-	-	98,20 98,50 98,90	99,20 98,30 97,80	-	-	-	-	-	-	-	-	98,00 97,80 97,90	98,20 98,50 98,60	98,20 98,80 98,30	-	-	98,347	
8,0	95,5	-	-	-	96,60 97,20 96,20	98,20 98,90 98,70	97,00 99,00 97,40	97,50 96,50 97,40	96,20 96,80 96,20	97,90 98,00 97,10	-	98,00 97,00 95,90	97,60 98,20 98,10	-	-	-	95,50 96,60 94,70	98,30 99,30 97,90	97,330	
7,1	90,7	93,40 93,00 92,20	91,20 92,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92,250
6,3	86,2	89,51 88,20 89,39	86,50 86,30 86,60	-	-	87,40 87,60 86,80	87,70 89,00 88,30	88,20 87,50 87,80	89,11 87,50 86,70	85,80 85,90 86,10	88,10 87,00 86,80	-	-	-	-	-	-	-	-	87,604
5,6	82,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83,10 81,50 80,80	83,50 84,00 83,30	82,700
6,3 ^φ	81,0	-	-	80,50 79,70 79,70	81,30 79,60 80,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80,250
5,0	78,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80,10 82,00 81,39	-	-	-	-	-	-	81,163
5,0 ^φ	75,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	69,29 72,70 68,92	66,79 74,80 71,51	75,20 77,00 75,90	-	-	-	72,457
4,0	70,9	73,11 69,90 74,49	65,68 66,30 66,71	-	-	67,89 72,10 69,70	67,28 66,50 66,81	69,29 67,50 71,80	67,49 73,90 72,30	72,81 70,00 67,21	68,29 69,00 65,81	-	-	-	-	-	71,40 66,50 67,11	69,69 73,70 69,60	69,226	
3,15 ^φ	60,7	-	-	59,40 59,10 59,11	59,70 59,10 59,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59,368
2,36	58,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,60 58,50 58,60	-	-	-	-	-	-	-	58,567
2,0	55,9	56,60 56,00 56,89	56,60 56,50 56,60	-	-	57,21 57,70 57,09	56,30 56,00 56,70	56,30 56,50 56,70	56,91 56,80 57,09	57,21 56,80 57,19	57,31 57,00 56,70	56,91 57,20 56,80	56,50 57,60 56,60	58,41 56,40 56,99	58,31 57,30 58,59	58,31 56,40 56,89	56,60 56,90 56,99	56,60 56,40 56,89	56,874	
1,6 ^φ	51,5	-	-	51,40 49,50 50,50	52,10 50,50 50,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,750
1,25	50,1	-	51,72 50,20 51,59	-	-	-	51,51 51,00 52,68	52,52 52,50 52,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51,822
1,18	49,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51,21 50,00 50,69	-	-	-	-	-	-	-	50,633
1,0	48,0	48,60 47,70 50,88	-	-	50,52 47,70 49,89	50,42 48,70 49,29	-	-	49,91 48,30 50,58	50,31 48,10 50,29	-	48,40 49,30 48,89	-	-	-	-	-	-	48,50 48,00 50,70	49,285

0,60	41,6	-	-	-	-	-	-	-	-	43,30	43,00	-	-	-	-	-	-	-	-	43,167			
0,50	39,2	-	-	-	-	-	-	-	-	43,98	42,69	-	-	-	-	-	-	-	-	39,91	40,31	40,31	39,676
0,425	35,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39,40	40,40	41,00	39,676
0,40	34,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,00	34,71	34,71	35,179
0,32	26,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,00	34,71	34,71	25,170
0,315	26,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,72	36,33	34,71	26,475
0,30	25,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36,80	34,70	34,60	24,330
0,25	19,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36,38	34,69	36,18	19,699
0,212	14,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24,38	24,00	24,61	14,783
0,20	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,90	12,70	11,95	12,850
0,18	12,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,06	10,54	10,54	12,191
0,16	10,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,10	11,80	12,10	8,393
0,15	10,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,68	11,81	12,29	10,723
0,125	8,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,41	10,00	11,76	9,340
0,09	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,06	6,00	5,63	7,185
0,08	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,11	6,36	6,50	6,004
0,075	6,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,43	6,15	6,15	6,735
0,063	5,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,70	7,44	7,44	5,465
		-	-	-	-	-	-	-	-	6,70	7,44	7,44	7,44	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,49	6,91	6,91	6,735
		-	-	-	-	-	-	-	-	6,80	7,00	7,00	7,00	7,10	7,30	7,70	7,70	7,70	7,70	7,10	7,30	7,70	6,735
		-	-	-	-	-	-	-	-	6,42	7,55	7,55	7,55	7,45	7,17	8,12	8,12	8,12	8,12	7,45	7,17	8,12	6,735
		-	-	-	-	-	-	-	-	6,44	6,44	6,44	6,44	6,22	6,22	6,22	6,22	6,22	6,22	6,22	6,22	6,22	5,465
		-	-	-	-	-	-	-	-	6,00	6,00	6,00	6,00	6,80	6,80	6,80	6,80	6,80	6,80	6,00	6,80	6,80	5,465
		-	-	-	-	-	-	-	-	4,68	4,68	4,68	4,68	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62	5,62	4,68	5,62	5,62	5,465

Tab. III A - *Trattenuti « corretti » ad alcuni setacci*

SETACCIO	L A B O R A T O R I O																		MEDIA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
8,0	-	-	-	-	3,40 2,80 3,80	1,80 1,10 1,30	3,00 1,00 2,60	2,50 3,50 2,60	3,80 3,20 3,80	2,10 2,00 2,90	-	2,00 3,00 4,10	2,40 1,80 1,90	-	-	-	4,50 3,40 5,30	1,70 0,70 2,10	2,670
6,3	-	-	-	-	10,80 11,30 11,90	9,30 10,00 9,10	9,30 9,00 9,60	7,09 9,30 9,50	8,69 9,20 9,61	-	9,90 10,00 9,10	-	-	-	-	-	-	-	9,594
4,0	16,40 18,30 14,90	20,82 20,00 19,89	-	-	-	19,51 15,50 17,10	20,42 22,50 21,49	18,91 20,00 16,00	21,62 13,60 14,40	16,40 18,80 20,28	-	19,81 18,00 20,99	-	-	-	-	-	-	18,568
2,0	16,51 13,90 17,60	9,08 9,80 10,11	-	-	10,28 13,20 13,11	10,68 14,40 12,61	10,98 10,50 10,11	12,99 11,00 15,10	10,58 17,10 15,21	15,60 13,20 10,02	-	10,98 12,00 9,11	-	-	-	14,19 10,10 10,22	13,09 16,80 12,61	12,508	
0,40	21,89 20,60 21,01	23,92 22,40 22,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,78 20,80 20,02	22,08 21,70 22,30	23,60 22,70 22,41	-	-	21,881
0,18	21,78 22,50 22,24	21,10 21,60 22,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24,66 24,70 23,90	25,79 22,90 22,88	24,17 22,50 23,89	-	-	23,128
0,075	5,80 5,70 6,37	4,88 5,50 5,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,57 5,00 5,23	3,63 4,50 4,64	3,63 4,40 4,17	-	-	4,876
Fondo	7,13 7,20 7,27	6,70 7,00 7,17	-	-	-	5,42 5,40 5,66	5,85 6,00 5,66	4,79 5,50 5,66	-	-	6,70 6,80 6,42	7,44 7,00 7,55	-	6,49 7,10 7,45	6,91 7,30 7,17	6,91 7,70 8,12	-	7,44 7,90 7,45	6,735

Tab. IV A - Contenuti di aggregato grosso, sabbia e filler: risultati della prova interlaboratori internazionale (« corretti. »)

I N E R T E	L A B O R A T O R I O																		M E D I A
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Aggregato grosso (tratt. a 2 mm)	43,40	43,40	-	-	42,69	42,79	43,70	43,70	43,09	42,79	-	42,69	43,09	43,50	43,59	41,69	42,79	43,40	
	44,00	43,50	-	-	45,30	42,30	44,00	43,50	43,20	43,20	-	43,00	42,80	42,40	43,60	42,70	43,60	43,10	
	43,11	43,40	-	-	44,00	42,91	43,30	43,30	42,91	42,81	-	43,30	43,20	43,40	43,01	41,41	43,11	43,01	
Sabbia	49,47	49,90	-	-	51,79	50,45	51,51	-	-	-	-	49,87	-	50,01	51,50	51,40	-	49,16	
pass. a 2 mm	48,80	49,50	-	-	52,30	50,00	51,00	-	-	-	-	50,00	-	50,50	49,10	49,60	-	49,00	
tratt. a 0,075mm	49,62	49,43	-	-	51,43	51,04	51,04	-	-	-	-	49,15	-	49,15	49,82	50,47	-	49,54	
Filler	7,13	6,70	-	-	5,42	5,85	4,79	-	-	-	6,70	7,44	-	6,49	6,91	6,91	-	7,44	
(pass. a 0,075mm)	7,20	7,00	-	-	5,40	6,00	5,50	-	-	-	6,80	7,00	-	7,10	7,30	7,70	-	7,90	
	7,27	7,17	-	-	5,66	5,66	5,66	-	-	-	6,42	7,55	-	7,45	7,17	8,12	-	7,45	

Tab. V A - Varianze di ripetibilità dei passanti, stimate per i vari laboratori (per l'applicazione del Test di Bartlett)

LIVELLO (%)	MEDIA " NA INTERN. (%)	NUMERO LAB.	Lab NA (1) n = 32	V A R I A N Z A s ² _F										
				Laboratori esperienza internazionale n = 3(2)										
80	81,55 82,70	3	4,49	1,39	0,16									
70	67,70 69,23	12	5,11	5,55	0,27	0,65	4,46	0,15	4,67	11,13	7,84	2,81	7,13	6,06
50	53,08 50,75	3	3,65	0,90	0,85									
35	35,03 35,18	6	1,85	0,35	0,99	0,33	0,89	0,78						
25	23,24 26,48	5	0,88	1,05	2,90	0,24	0,44							
10	10,63 12,19	7	0,20	0,18	0,23	0,67	0,53	0,92	0,11					
7	7,48 7,19	3	0,12	0,40	0,55									
6	6,15 6,74	12	0,09	0,01	0,06	0,02	0,03	0,21	0,04	0,08	0,24	0,04	0,38	0,07

(1) Numero di ripetizioni per ciascun livello: 32

(2) Numero di ripetizioni per ogni laboratorio e per ciascun livello: 3

BIBLIOGRAFIA

- D'ORSI R. e GIANNATTASIO P. (1978) - *La ripetibilità e la riproducibilità di un metodo di prova*. Atti del XVIII Convegno Nazionale Stradale, Taormina, 1978.
- D'ORSI R. e GIANNATTASIO P. (1981) - *Affidabilità della campionatura per l'analisi granulometrica nel laboratorio stradale*. Rivista Italiana di Geotecnica, n. 3/1981.
- P.I.A.R.C. (1983) - *Analysis of Specially Prepared Bituminous Materials*. Documento del « PIARC Technical Committee on Testing Road Materials (Bituminous Materials Working Group) », a cura di G. D. Goodsall, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorn, May 1983.
- GOODSALL G. D. (1983) - « *Results of Analysis on Bituminous Mixtures - Examination of the Report of the Technical Committee on the Testing of Road Materials* ». Report for the XVII World Road Congress, Sydney, October 1983.

SUMMARY

A statistical analysis of the particle-size test on the basis of an international interlaboratory testing.

In the context of an interlaboratory testing, arranged by the TRRL and carried out by sixteen boards of eleven coun-

tries (among them the Laboratory of Roads Construction of the University of Naples), and aimed to compare the accuracy of various methods for measuring the binder content of bituminous mixtures, the sieve-analysis on several specimens, theoretically the same, was made (fig. 1). The large amount of available data (tab. IA) have been actually used by the Author for evaluating the precision of the particle-size test with a few related remarks.

Namely a statistical analysis was carried out in order to evaluate the « repeatability » r and the « reproducibility » R which were found susceptible to change with the percentage of the passing material p (tab. 1); consequently a functional relationship has been searched and found (see equations 5 and 6).

The suitability of the chosen type of equation (r , p) has also been confirmed by the examination of the results (tab. IV) of a previous test carried out, at the said Laboratory of Naples University, on 32 specimens (see D'ORSI and GIANNATTASIO, 1981).

Among the findings of the present study it seems more remarkable that the actual ranges (see tab. III) of the smaller fractions (outside which a result has 5% probability to lie) are very close or even larger than those commonly allowed by the specifications; taking also into account the intrinsic variability of the material, a revision of the specifications should be considered for a more realistic approach to the problem.