



**INDAGINI SPERIMENTALI RIGUARDANTI
L'INTRODUZIONE DELLA PRESSA A TAGLIO
GIRATORIO NELLE NORME TECNICHE DI
CAPITOLATO**

Marco Bassani

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
Tel: +39 011.5645635 - Fax: +39.011.5645614
E-mail: bassani@polito.it

Ezio Santagata

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
Tel: +39 011.5645633 - Fax: +39.011.5645614
E-mail: santagata@polito.it

INDAGINI SPERIMENTALI RIGUARDANTI L'INTRODUZIONE DELLA PRESSA A TAGLIO GIRATORIO NELLE NORME TECNICHE DI CAPITOLATO

MARCO BASSANI – D.I.T.I.C. – Politecnico di Torino
EZIO SANTAGATA – D.I.T.I.C. – Politecnico di Torino

SOMMARIO

L'impiego della pressa giratoria per il costipamento dei conglomerati bituminosi è attualmente prevista nelle più avanzate Norme Tecniche di Capitolato per lavori stradali. Per fornire un contributo alla diffusione di questa attrezzatura anche in Italia, nella presente memoria gli Autori espongono i risultati ottenuti operando su una serie di miscele prelevate in vari cantieri di lavori di costruzione e manutenzione di pavimentazioni. Le indagini sono state strutturate in modo tale da prendere in considerazione una serie di fattori che influenzano sia la curva di lavorabilità delle miscele, sia le caratteristiche volumetriche dei campioni al termine della compattazione: tipo di miscela (per base, binder o usura); tipo di bitume (modificato oppure no); temperatura di costipamento; diametro della fustella (100 o 150 mm); modalità di costipamento (a numero di giri o ad altezza imposta). A titolo comparativo sono stati inoltre preparati campioni con la tradizionale procedura Marshall cui attualmente fanno riferimento molti capitolati d'appalto.

Sulla base dei risultati sperimentali rilevati vengono fornite delle indicazioni per potere introdurre in maniera incisiva le misure effettuate con l'ausilio della pressa giratoria all'interno di norme tecniche di nuova generazione pur mantenendo una certa congruenza e continuità con i criteri precedentemente in uso.

ABSTRACT

The use of the gyratory shear compactor for the preparation of cylindrical samples of bituminous mixtures is currently prescribed by the most advanced technical specifications for road works. In order to contribute to the widespread diffusion of this kind of equipment in Italy, in this paper the Authors show the results they obtained on a number of bituminous mixtures which were sampled in different sites during pavement construction and maintenance operations. The investigations were structured in such a way to take into account a number of factors which influence both the compaction curves and the final volumetric characteristics of the gyratory specimens: type of mixture (for base, binder and wearing course layer), type of binder (modified and unmodified), compaction temperature, mould diameter (100 and 150 mm), compaction mode (with an imposed number of gyrations or with a given final height). For comparative purposes specimens were also prepared with the Marshall equipment and procedure which are currently prescribed in a number of technical specification systems.

Based on the obtained experimental results, guidelines are given in order to introduce the use of the gyratory compactor in technical specifications, guaranteeing a satisfactory consistence and continuity with previously used acceptance criteria.

1. INTRODUZIONE

La continua e rapida crescita del traffico stradale spinge oggi i progettisti a prescrivere l'impiego di materiali per pavimentazioni sempre più resistenti e durevoli in grado di garantire, per periodi di tempo sempre più elevati, un soddisfacente livello di sicurezza per l'utenza. A tale scopo, i documenti progettuali, ed in particolare le Norme Tecniche di Capitolato, devono necessariamente fare riferimento all'impiego di metodi e strumenti che forniscano risultati sempre più legati alle effettive prestazioni in opera dei materiali. Ad esempio, nel caso dei conglomerati bituminosi è indispensabile che i controlli da effettuarsi durante la fase di studio delle miscele (mix design) in corso d'opera ed a lavori ultimati, siano basati sull'impiego della pressa a taglio girevole per il costipamento in laboratorio e sulla misura delle corrispondenti proprietà volumetriche e meccaniche delle miscele nello stato addensato.

La pressa a taglio girevole consente infatti di superare le limitazioni proprie della metodologia di costipamento Marshall [Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1973] che attualmente è la più utilizzata nel settore stradale ed è indicata nella maggior parte delle Norme Tecniche di Capitolato. Quest'ultima, di tipo impulsivo unidirezionale, conduce alla creazione, all'interno dei campioni di prova, di strutture differenti rispetto a quelle che effettivamente si realizzano nei vari strati delle pavimentazioni a seguito del passaggio dei mezzi di costipamento di cantiere. Sotto l'azione del maglio battente gli aggregati lapidei, che costituiscono lo scheletro portante del conglomerato nello stato compattato, vengono spostati prevalentemente nella direzione verticale, con limitate possibilità di ruotare in modo da raggiungere le configurazioni di massima densità. Nel caso della pressa a taglio girevole viene invece consentita la riorganizzazione dei granuli grazie alla applicazione di una azione combinata di sollecitazioni normali e tangenziali che mutano continuamente di direzione a causa della rotazione eccentrica della fustella contenente il materiale e che simulano quindi più fedelmente le azioni dei rulli (Figura 1).

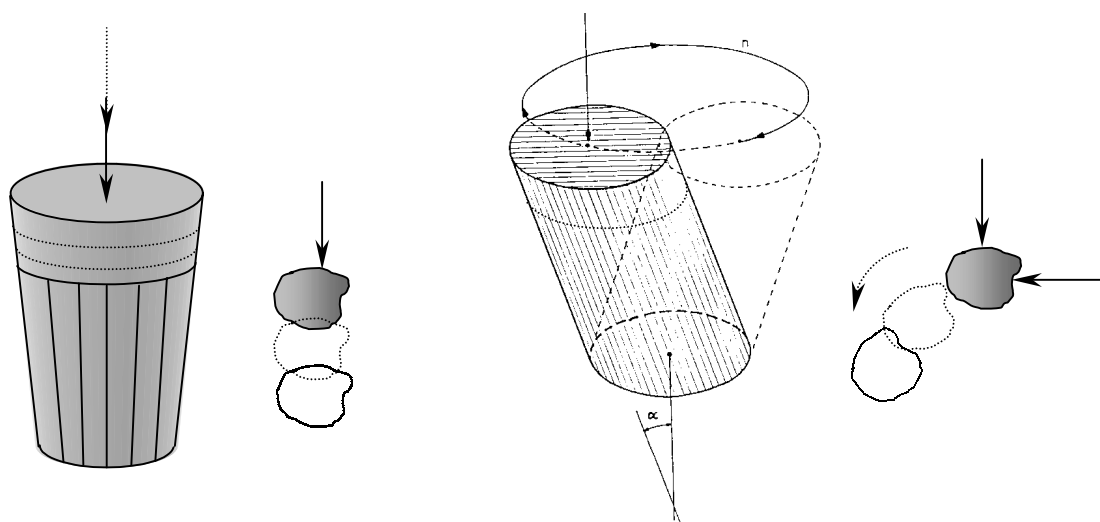


Figura 1. Metodologie di costipamento impulsiva e giratoria

Affinché la pressa a taglio giratorio venga introdotta all'interno delle Norme Tecniche di Capitolato in Italia così come già avvenuto negli Stati Uniti [Cominsky et al., 1994] ed in alcuni Paesi europei [Moutier, 1982], è però indispensabile che si effettuino esperienze sufficienti per consentire la definizione delle esatte ed ottimali procedure di prova da seguire e delle verifiche da imporre, per l'accettazione dei materiali, ai risultati sperimentali ottenuti. Attualmente l'impiego di tale apparecchiatura è infatti prevista dalle sole Norme Tecniche della Società Autostrade ed in forma sperimentale all'interno di quelle preparate dal Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale [CIRS, 2001] per conto del Ministero dei Lavori Pubblici, ora Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Con la presente memoria gli Autori intendono pertanto fornire un contributo alla diffusione di questo metodo di costipamento in Italia attraverso l'analisi critica dei risultati ottenuti su una serie di miscele prelevate in cantiere. In particolare vengono presentati dei modelli matematici che consentono di tenere conto l'influenza sulle caratteristiche di lavorabilità di una serie di fattori quali il tipo di miscela, la sua composizione e la temperatura di costipamento. Inoltre, per potere fornire indicazioni ai tecnici del settore che mantengano una certa continuità con la loro esperienza passata, le proprietà volumetriche rilevate sui materiali addensati con la pressa giratoria vengono messe a confronto con quelle ottenute con l'impiego del metodo di costipamento Marshall.

2. NORME DI RIFERIMENTO

L'impiego della pressa a taglio giratoria è allo stato attuale previsto sia negli Stati Uniti, ove sono in corso di utilizzazione tutti i prodotti derivanti dal programma SHRP, sia in Europa, ove sono in corso di elaborazione le norme CEN relative ai conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali.

Per una maggior chiarezza di analisi nella Tabella 1 sono riportate le caratteristiche salienti dei protocolli sperimentali descritti nella norma SHRP M-002 e nella norma provvisoria prEN 12697-31 del CEN. La prima è mirata all'applicazione del metodo SUPERPAVE ed è quindi improntata ad un uso dedicato al mix-design delle miscele bituminose. Poiché l'obiettivo del progetto volumetrico SHRP (Level 1) prevede il raggiungimento di un contenuto di vuoti ottimale del 4%, i parametri di funzionamento e di controllo della Pressa Giratoria sono stati definiti in modo piuttosto ristretto. La seconda, attualmente in corso di definizione, è invece improntata ad un uso più flessibile dovuto in parte all'esigenza di uniformarne l'uso nei diversi paesi dell'Unione ed in parte alla volontà di estenderne l'impiego non solo al mix-design ma anche al controllo di qualità dei materiali nelle fasi di posa in opera delle miscele.

I due sistemi normativi hanno diversi elementi in comune per ciò che riguarda i parametri considerati ed i modi di utilizzo della pressa. Per quanto concerne le temperature di riferimento per la miscelazione ed il costipamento, le norme americane sono basate sugli stessi criteri di scelta previsti nel caso del tradizionale metodo Marshall, e definiscono pertanto un intervallo di viscosità in cui deve trovarsi il legante bituminoso all'atto della miscelazione e del successivo costipamento. La norma CEN si limita invece a stabilire un intervallo di variazione della temperatura ammesso durante il costipamento ($\pm 10^{\circ}\text{C}$), in attesa che la prEN 12697-35, attualmente in corso di

elaborazione, definisca più precisamente le modalità con le quali individuare la temperatura di costipamento.

Per quel che riguarda le dimensioni dei campioni, le norme SHRP e CEN fissano solamente il diametro delle fustelle, mentre non indicano né il quantitativo di materiale da utilizzare per la formazione di ciascun campione, né la sua altezza finale. I diametri previsti sono pari a 100 e 150 mm, con la conseguente possibilità di analizzare senza complicazioni anche miscele al cui interno si trovino aggregati di dimensioni superiori ai 25 mm che, sino ad oggi, dovevano essere eliminati prima del costipamento con attrezzatura Marshall. Inoltre, la norma CEN ammette anche che si utilizzino fustelle del diametro di 160 mm, così come previsto nelle vigenti normative tecniche francesi NF P98-252 del 1991.

Alcune differenze emergono nell'analisi delle modalità di inserimento del campione sciolto nella fustella. Secondo la norma SHRP esso deve essere eseguito introducendo il materiale in tre strati successivi, ognuno dei quali deve essere opportunamente assestato mediante cinque colpi di spatola. La norma CEN prevede invece l'inserimento del materiale in un'unica soluzione mediante un imbuto posto sul collo della fustella.

Le maggiori differenze tra i due sistemi si registrano comunque nelle condizioni di costipamento vero e proprio. Per quanto concerne la velocità di rotazione della fustella durante il costipamento, le norme americane fanno riferimento ad una unica velocità, pari a 30 giri al minuto, mentre la norma CEN lascia un più ampio margine di libertà, necessario per potere comprendere al suo interno le modalità operative già previste in varie normative nazionali, con velocità comprese tra i 6 ed i 32 giri al minuto. Ancor più distanti sono i dettami relativi all'angolo di rotazione della fustella: per le norme americane esso viene definito come valore costante pari a $1,25^\circ$, mentre le norme europee al riguardo richiedono di valutare l'angolo di funzionamento della singola apparecchiatura sulla base del grado di costipamento raggiunto mediante l'uso di tre miscele di riferimento in corrispondenza di un numero di giri pari a 10, 80 e 200.

Parametro	SHRP	CEN
Codice della norma	M-002	PrEN 12697-31
Temperature di costipamento	-	prEN 12697-35 (*)
Viscosità cinematica del legante al costipamento	$280 \pm 30 \text{ mm}^2/\text{s}$	-
Viscosità cinematica del legante alla miscelazione	$170 \pm 20 \text{ mm}^2/\text{s}$	-
Diametro nominale massimo dell'aggregato	Vedi Level 1	16 mm
Diametro delle fustelle	100 mm 150 mm	$100 \pm 0,1 \text{ mm}$ $150-160 \pm 0,1 \text{ mm}$
Altezza dei campioni	-	-
Sensibilità del sistema di misura dell'altezza	-	0,1 mm
Velocità di rotazione (giri al minuto)	$30 \pm 0,5$	$6-32 \pm 10\%$
Angolo di rotazione della fustella	$1.25 \pm 0,02^\circ$	$Y \pm 0,02^\circ (**)$
Pressione di costipamento	$600 \pm 10 \text{ kPa}$	$600 \pm 25 \text{ kPa}$
COV oltre $n_G = 20$	-	1,5%

Tabella 1. Prescrizioni sull'uso della Pressa Giratoria

(*) Per la prEN 12697-35 non esiste ancora un documento di riferimento

(**) Il valore Y viene determinato eseguendo un'analisi di sensibilità dell'angolo di rotazione su tre miscele di riferimento imposte dalla norma

La pressione di costipamento dei campioni risulta essere in entrambi i sistemi normativi pari a 600 kPa, con un più ampio intervallo di variazione ammesso nel sistema CEN rispetto a quello indicato nelle norme SHRP. Si segnala infine che nelle norme CEN viene stabilito il numero minimo di campioni, pari a 3, necessario per la valutazione delle caratteristiche della generica miscela. Viene inoltre indicato il limite di accettazione del coefficiente di variazione delle altezze misurate che deve risultare inferiore ad 1,5%.

3. SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione, condotta nel Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, è stata effettuata prendendo in considerazione sette miscele di conglomerato bituminoso prelevate in forma sciolta nel corso del 2000 direttamente da alcuni cantieri di stesa. In particolare, come illustrato nella Tabella 2, sono state reperite due miscele presso cantieri autostradali (Usura 1 e Base 2), tre miscele presso cantieri operanti su strade statali (Usura 2 e 3, Binder), una miscela presso un cantiere per la costruzione di un piazzale di movimento merci (Base 1), ed infine un'ultima miscela presso un cantiere operante su una strada urbana a forte traffico (Usura 4).

Codice miscela	Spessore finale	Capitolato di riferimento
Usura 1	4 cm	Autostrada TO-MI
Usura 2	4 cm	ANAS Torino
Usura 3	3 cm	ANAS Torino
Usura 4	3 cm	Comune di Torino
Binder	7 cm	ANAS Torino
Base 1	12 cm	ANAS Torino
Base 2	10 cm	SITAF

Tabella 2. Provenienza delle miscele

3.1 Materiali

Le caratteristiche salienti dei conglomerati bituminosi presi in esame sono riportate nella Tabella 3. A seguito delle abituali operazioni preliminari di estrazione del legante sono state valutate le percentuali di bitume totale presente nella miscela ($m_{B,TOT}$) e le curve granulometriche degli aggregati estratti (Figura 2). Da queste ultime sono stati inoltre determinati il contenuto di filler (m_F), dato dal passante al setaccio da 0,075 mm, ed il contenuto di sabbia (m_S), definito come la differenza tra i passanti al setaccio da 2 mm e quello al setaccio da 0,075 mm.

Altre indagini hanno permesso di determinare, in accordo con quanto indicato nelle norme del Consiglio Nazionale delle Ricerche, le masse volumiche degli aggregati (γ_A) e dei bitumi (γ_B) estratti. È stata inoltre valutata, operando secondo il metodo descritto dalla norma ASTM D2041, la massima densità teorica delle miscele, denominata TMD (*Theoretical Maximum Density*), che è stata quindi utilizzata per determinare la quantità di bitume effettivamente presente nella miscela e non assorbito dai pori superficiali dell'aggregato ($m_{B,EFF}$). Tale grandezza è stata anche inclusa nella procedura prevista dalle norme SHRP richiamate in precedenza per la determinazione della curva di addensamento effettiva ottenuta dall'impiego della pressa giratoria.

Codice miscela	Tipo di miscela	Tipo di bitume	m_S	m_F	$m_{B,TOT}$	$m_{B,EFF}$	γ_A	γ_B	TMD
			(%)	(%)	(%)	(%)	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
Usura 1	Trad.	Mod.	28,9	5,53	5,36	4,59	2,730	1,027	2,564
Usura 2	Antiskid	Mod.	20,8	4,19	5,25	4,77	2,745	1,025	2,563
Usura 3	Trad.	80-100	27,8	5,83	5,83	5,64	2,642	1,045	2,447
Usura 4	Antiskid	Mod.	11,4	8,24	4,94	4,69	2,709	1,025	2,530
Binder	Trad.	Mod.	24,2	3,60	4,54	4,07	2,771	1,027	2,610
Base 1	Misto bit.	Mod.	10,9	3,63	2,76	2,60	2,701	1,027	2,598
Base 2	Trad.	80-100	20,9	4,32	3,96	3,84	2,721	1,035	2,570

Tabella 3. Caratteristiche, composizione e masse volumiche delle miscele analizzate

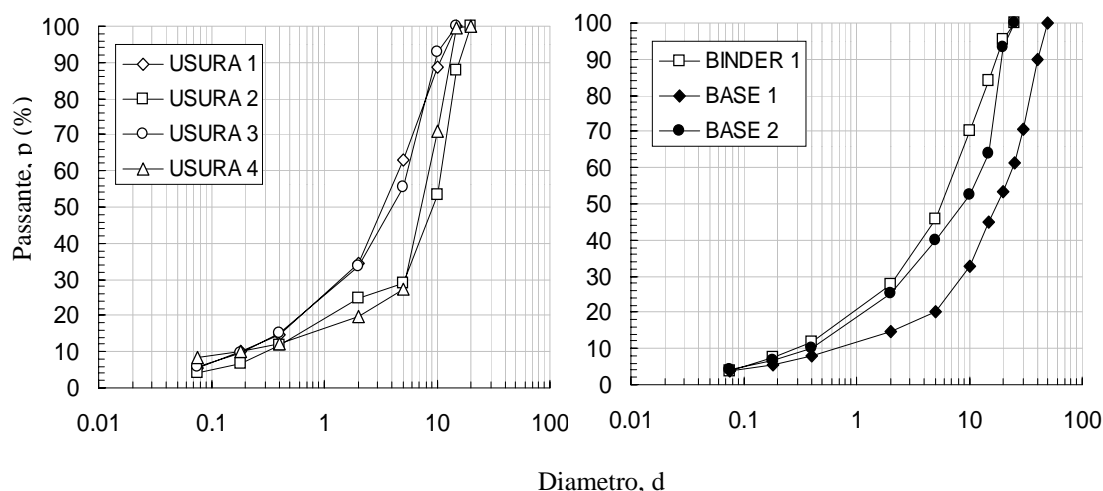


Figura 2. Curve granulometriche delle miscele

3.2 Programma sperimentale

Nella Tabella 4 è riportata una sintesi del programma sperimentale sviluppato. Per la preparazione dei campioni eseguita con metodo Marshall si è fatto riferimento alla metodologia descritta nella norma CNR n.30 che prevede la costituzione di quattro campioni per miscela. Per la compattazione con metodologia giratoria ci si è riferiti, sia per quanto riguarda il diametro della fustella, sia per quanto concerne la pressione e la velocità di rotazione, alla norma SHRP M-002. In questo caso, per ciascuna miscela e per ciascuna condizione di compattazione, derivante dalla combinazione di tipo di fustella, numero di giri e temperatura di costipamento, sono stati realizzati tre campioni nominalmente identici.

Durante l'impiego della pressa giratoria sono state realizzate serie di campioni utilizzando entrambi le fustelle (da 100 e 150 mm di diametro) previste dalle norme SHRP e CEN. I campioni da 100 mm sono stati confezionati allo scopo di ottenere le geometrie più diffusamente utilizzate nel controllo di qualità dei conglomerati, in analogia a quanto sino ad oggi fatto con i campioni di tipo Marshall. Inoltre, i campioni di tale geometria possono essere facilmente sottoposti, con carichi relativamente contenuti, alle prove necessarie per la determinazione del modulo elastico sotto l'effetto di sollecitazioni impulsive. I campioni da 150 mm sono stati invece prodotti per valutare gli effetti sulle caratteristiche di addensamento legati alla sola composizione, limitando il più possibile, con la scelta di questa geometria, l'effetto perturbante delle pareti laterali e delle teste di carico durante il costipamento. In questo caso è stato

previsto un unico valore dell'altezza finale pari a 150 mm, introducendo un quantitativo calcolato di materiale che potesse fornire un'altezza teorica di 150 mm a 300 giri.

Tipo di costipamento	Diametro della fustella	Temperatura di costipamento	Condizioni di costipamento	Numero campioni	Altezza finale
Impulsivo	101,7 mm	Stesa	75 colpi per lato	4	63,5 mm
Giratorio	100 mm	Stesa	20 giri	3	70 mm
			100 giri		
			180 giri		
	150 mm	Tipica	20 giri	3	70 mm
			100 giri		
			180 giri		
	150 mm	Stesa	300 giri	3	150 mm

Tabella 4. Sintesi del programma sperimentale

Sono state quindi stabilite due temperature di compattazione: la prima, indicata come temperatura di stesa (T_S), è stata stabilita in base alla effettiva temperatura rilevata nel corso del costipamento in cantiere operato dai rulli; la seconda temperatura, indicata come temperatura tipica (T_T), è stata invece individuata sulla base delle indicazioni fornite dalla norma CNR n.30 che mette in relazione la temperatura di costipamento con il tipo di bitume presente nella miscela. Per quanto concerne le miscele contenenti bitumi modificati, poiché essi non sono menzionati nella citata norma CNR, la temperatura tipica di costipamento è stata assunta pari a 175°C.

Nella Tabella 5 sono quindi indicate le due temperature di riferimento utilizzate nel corso della sperimentazione. Si segnala a questo proposito che per la miscela denominata Usura 2, confezionata mediante l'uso di un bitume modificato, è stata individuata un'unica temperatura di costipamento pari a 175°C.

Codice miscela	Temperatura di stesa (T_S)	Temperatura tipica (T_T)
	[°C]	[°C]
Usura 1	155	175
Usura 2	175	175
Usura 3	155	150
Usura 4	170	175
Binder	165	175
Base 1	165	175
Base 2	170	150

Tabella 5. Temperature di costipamento delle miscele

I campioni aventi diametro pari a 150 mm, così come quelli Marshall, sono stati preparati unicamente alla temperatura di stesa. Quelli di diametro pari a 100 mm sono stati invece preparati ad entrambe le temperature ed a tre diversi livelli di addensamento corrispondenti all'applicazione di 20, 100 e 180 giri nella pressa giratoria.

Una volta misurate le proprietà volumetriche dei provini confezionati, sono state eseguite ulteriori prove per la valutazione delle loro caratteristiche meccaniche. In particolare, sui campioni di piccolo diametro (Marshall e campioni da 100 mm) è stato

dapprima misurato il modulo elastico mediante l'esecuzione di prove di trazione indiretta a carico ripetuto impulsivo così come previsto dalla norma BSI DD213. Successivamente, operando su tutti i campioni a disposizione si è quindi valutata la resistenza a trazione indiretta in accordo con quanto previsto dalla norma CNR. In entrambi i casi le misure sono state effettuate alla temperatura di 20°C dopo un preliminare condizionamento in cella climatica.

4. ANALISI DATI

4.1 Proprietà volumetriche

Il quadro dei risultati riguardanti le masse volumiche medie misurate sui campioni appartenenti alle varie serie è presentato nella Tabella 6. Essa contiene dati che consentono di tradurre in termini quantitativi gli attesi effetti dell'incremento del numero di giri della pressa giratoria e della temperatura di costipamento, che determinano un aumento della massa volumica. Viene inoltre rilevato che, a parità di temperatura di costipamento, la massa volumica dei campioni Marshall risulta inferiore a quella dei campioni prodotti con 180 giri in fustella da 100 mm o con 300 giri in fustella da 150 mm.

Diametro	Masse volumiche [g/cm ³]							
	100 mm						150 mm	101.7 mm
	PG 20 giri		PG 100 giri		PG 180 giri		PG 300 giri	Marshall
Metodo	stesa	tipica	stesa	tipica	stesa	tipica	stesa	stesa
Usura 1	2,240	2,219	2,350	2,320	2,378	2,367	2,438	2,337
Usura 2	2,325	2,325	2,446	2,446	2,472	2,472	2,502	2,470
Usura 3	2,156	2,161	2,290	2,290	2,338	2,338	2,365	2,288
Usura 4	2,249	2,270	2,352	2,379	2,409	2,429	2,464	2,339
Binder	2,262	2,258	2,359	2,353	2,405	2,400	2,483	2,394
Base 1	2,335	2,331	2,438	2,408	2,453	2,474	2,529	2,437
Base 2	2,246	2,240	2,361	2,372	2,410	2,382	2,458	2,361

Tabella 6. Masse volumiche medie dei campioni

Per effettuare un più approfondito confronto tra la volumetria dei campioni prodotti mediante le due metodologie si è fatto riferimento alle seguenti grandezze volumetriche relative:

$$\overline{VMA}_{i,PG} = \frac{VMA_{i,PG}}{VMA_M} \quad (\text{eq.1})$$

$$\overline{\%v}_{i,PG} = \frac{\%v_{i,PG}}{\%v_M} \quad (\text{eq.2})$$

$$\overline{VFA}_{i,PG} = \frac{VFA_{i,PG}}{VFA_M} \quad (\text{eq.3})$$

ove la generica grandezza con indice (i,PG) è quella relativa a campioni ottenuti dall'applicazione di un numero di giri pari ad i della pressa giratoria, quella con indice (M) è relativa ai campioni Marshall, quella con indice (i,PG) e soprasssegnata è relativa a

campioni ottenuti dall'applicazione di un numero di giri pari ad i della pressa giratoria ma normalizzata rispetto alla corrispondente grandezza dei campioni Marshall.

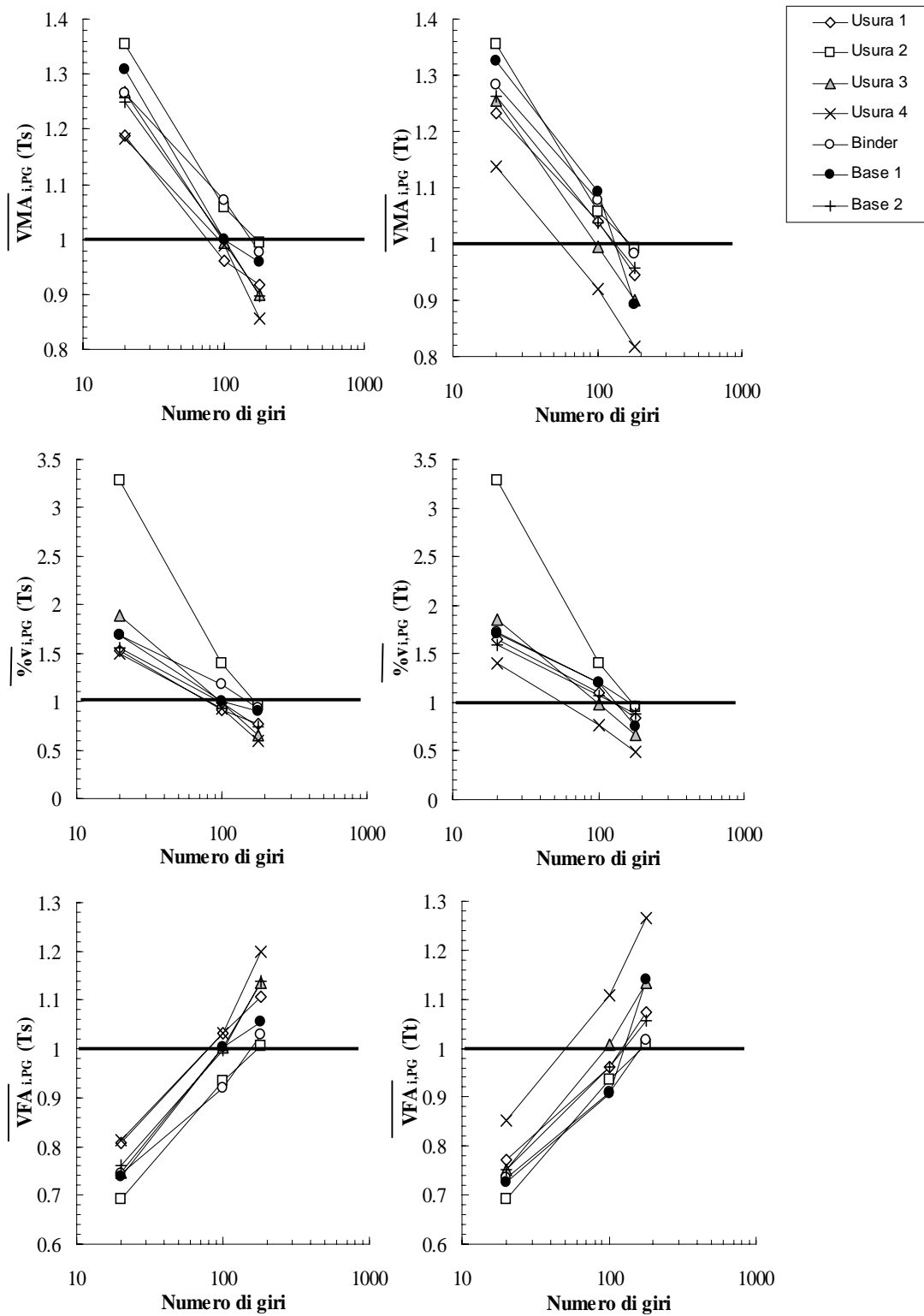


Figura 3. Relazione tra le grandezze volumetriche normalizzate ed il numero di giri della pressa giratoria

Nella Figura 3 sono presentati i tre gruppi di grafici derivanti dall'applicazione delle eq. 1, 2 e 3 ai risultati ottenuti sui campioni considerati nel piano sperimentale (Tabella 4). Per ciascun parametro volumetrico considerato sono stati individuati due grafici, uno relativo ai campioni prodotti alla temperatura di stesa (T_S) e l'altro a quella tipica (T_T). Dalla loro analisi si osserva, per tutte e sette le miscele considerate, una variazione pressoché lineare delle caratteristiche volumetriche nel piano semilogaritmico ove in ascisse si riporti il numero di giri ed in ordinate il valore della grandezza normalizzata presa in esame.

Le grandezze normalizzate assumono valori unitari in corrispondenza di un numero di giri che è variabile a seconda della miscela presa in esame. I valori assunti da questo numero di giri n_G caratteristico, calcolati al variare della dimensione della fustella (100 e 150 mm) e della temperatura di costipamento (di stesa T_S e tipica T_T), sono riportati nella Tabella 7. Si può così osservare che passando dalla T_S alla T_T si ha in media un aumento del numero di giri caratteristico. Si rileva inoltre che l'utilizzo di fustelle di maggiore diametro comporta, a parità di ogni altra condizione, un aumento del numero di giri caratteristico per effetto del maggior volume di materiale da portare nelle condizioni di riferimento fissate dai risultati del costipamento Marshall.

Diametro	Temperatura	Usura 1	Usura 2	Usura 3	Usura 4	Binder	Base 1	Base 2	Media
100 mm	Stesa	89	160	98	74	160	118	96	113,5
	Tipica	121	160	97	54	175	121	110	119,5
150 mm	Stesa	93	196	122	94	99	103	97	113,5

Tabella 7. Numero di giri (n_G) di equivalenza tra la metodologia giratoria e quella impulsiva

Le considerazioni su esposte devono essere debitamente tenute in conto nell'elaborazione delle Norme Tecniche nelle quali, pur richiedendo esplicitamente l'impiego della pressa giratoria, può essere utile riferirsi a livelli di addensamento analoghi a quelli ottenuti con il metodo Marshall.

A tale scopo, i valori del numero di giri riportati in Tabella 7 sono stati messi in relazione con le caratteristiche di composizione delle miscele. Ciò è stato fatto ricercando una relazione lineare con le percentuali di bitume effettivo ($m_{B,EFF}$) e di filler (m_F), che determinano la composizione del mastice legante, con la percentuale di sabbia (m_S), che verosimilmente influenza la lavorabilità della miscela, con il diametro massimo degli aggregati (D_{MAX}) e con la temperatura di costipamento (T).

Prendendo a riferimento i campioni prodotti ad esempio con fustelle da 100 mm alla sola temperatura tipica T_T , dalle operazioni di regressione effettuate sui dati disponibili si sono ottenuti i risultati sintetizzati nella seguente relazione lineare:

$$n_G = 42,582 + 1,306T_T - 28,958 \cdot m_F + 11,820 \cdot m_{B,EFF} - 0,704 \cdot m_S - 1,560 \cdot D_{MAX} \quad (\text{eq.4})$$

la quale, come illustrato nel grafico di Figura 4, rappresenta in modo soddisfacente i dati riportati nella Tabella 7, con un coefficiente di correlazione (R^2) che risulta pari a 0,982 e con un corrispondente errore medio pari al 3%.

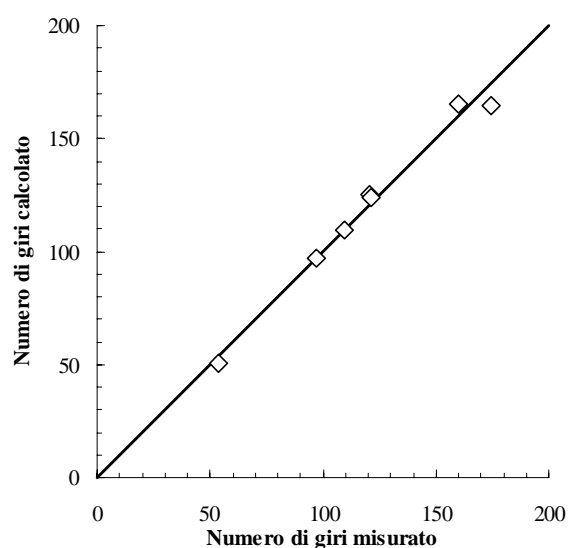


Figura 4. Risultati dell'analisi di regressione per la definizione del numero di giri corrispondenti alla stessa volumetria dei campioni Marshall alla temperatura tipica

4.2 Lavorabilità

La pressa giratoria, così come concepita, permette di descrivere in maniera approfondita i processi di addensamento dei conglomerati bituminosi in quanto è data la possibilità, giro dopo giro, di conoscere l'altezza raggiunta dal generico provino. Ciò consente di ricavare, sulla base della corrispondenza tra geometria teorica ed effettiva del campione valutate al termine del processo, le leggi matematiche che legano le proprietà volumetriche delle miscele con il numero di giri della pressa e che traducono in termini quantitativi la loro lavorabilità.

Facendo riferimento al grado di compattazione C , ossia al complemento a 100 della percentuale dei vuoti, è possibile ricavare le cosiddette curve di addensamento o di compattazione delle miscele nelle quali tale grandezza viene rappresentata graficamente in funzione del numero di giri. Adottando una scala di rappresentazione semi-logaritmica, tali curve possono assumere un andamento che, come evidenziato in Figura 5, risulta entro certi limiti pressoché rettilineo. Esse possono essere pertanto descritte in maniera semplificata da equazioni del tipo seguente:

$$C = C_1 + K \cdot \log(n_G) \quad (\text{eq.5})$$

ove K è un parametro che rappresenta la lavorabilità della miscela mentre il parametro C_1 definisce le sue caratteristiche di autoaddensamento, ossia individua il grado di compattazione posseduto dal provino in corrispondenza del primo giro eseguito dalla pressa.

In verità, come chiaramente visibile dai grafici di Figura 6, l'andamento delle curve di addensamento tende a discostarsi da quello rettilineo, con curvature che risultano non trascurabili soprattutto in corrispondenza dei primi giri, ove può essere del tutto casuale la riorganizzazione di singoli grani di aggregato, e nella fase di addensamento avanzato, ove può insorgere nel materiale uno stato di sovraddensamento. Per entrare nel merito

della valutazione di tali fenomeni si dovrebbe pertanto fare riferimento, anziché ad una lavorabilità media definita mediante regressione in un dominio piuttosto ampio di numero di giri, ad un parametro di lavorabilità valutato in intervalli più modesti. Ciò viene mostrato, a titolo di esempio, nella Figura 7, ove sono stati presi in considerazione i valori medi delle lavorabilità dei campioni da 100 e da 150 mm della miscela Binder, alla temperatura T_S .

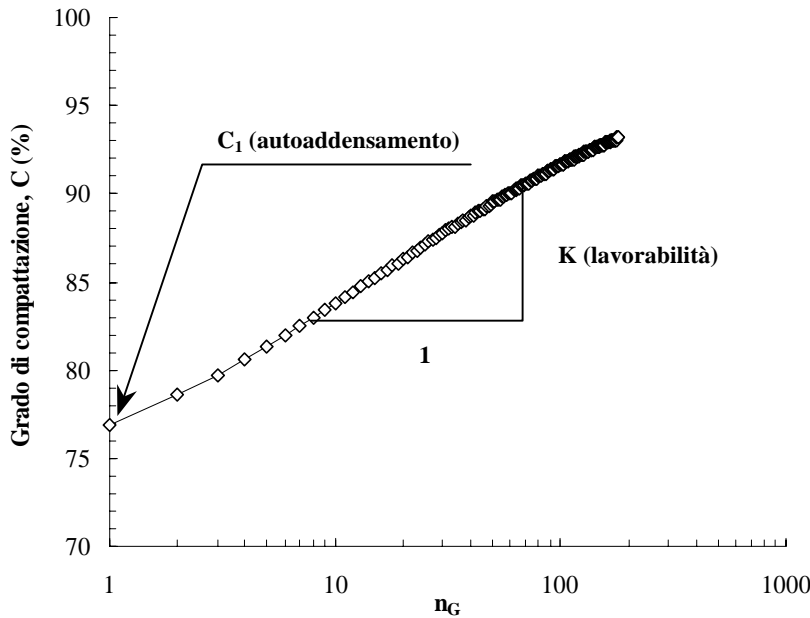


Figura 5. Tipica curva di addensamento ottenuta dall'impiego della pressa giratoria

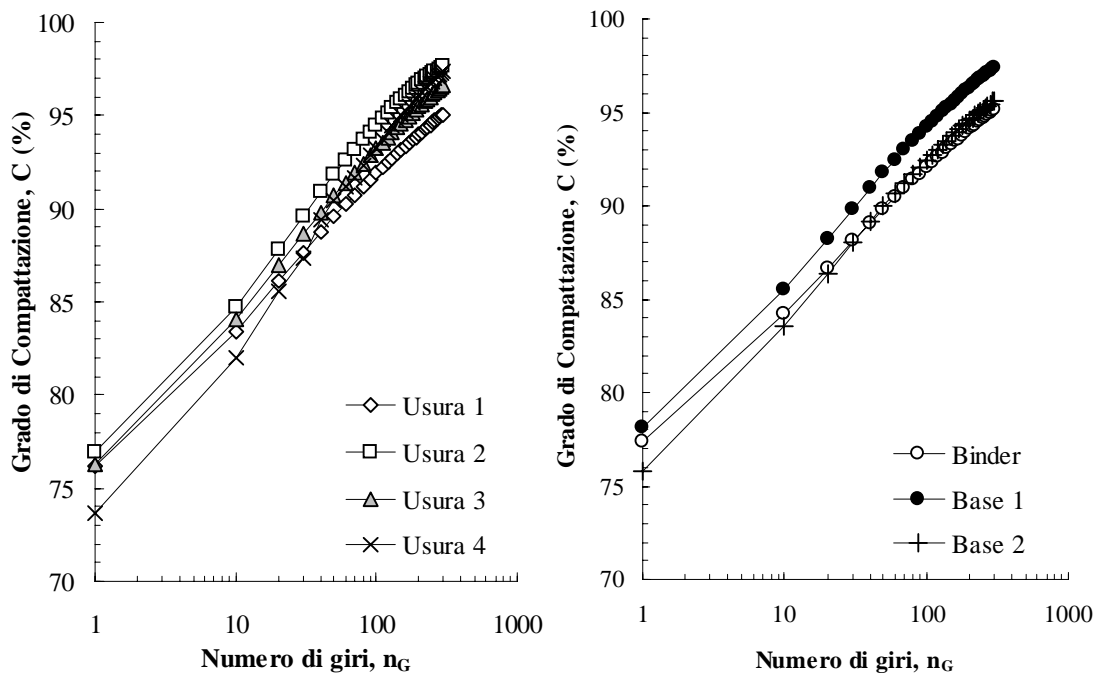


Figura 6. Curve di lavorabilità dei campioni di altezza e diametro pari a 150 mm

Il grafico di Figura 7 dimostra come si possa presentare un andamento fortemente altalenante della lavorabilità media valutata su intervalli di 10 giri per entrambe le tipologie di fustella. Ciò deriva dal fatto che durante il processo di addensamento con azione giratoria la lavorabilità può variare continuamente a seconda di come la miscela riesce a risolvere localmente le resistenze legate alla forma e alla rugosità superficiale degli aggregati. Ciò dipende anche dal grado di confinamento prodotto dalle pareti delle fustelle che limitano i piccoli spostamenti dei granuli durante l'azione di costipamento: nello specifico caso rappresentato in Figura 7 si evidenzia come l'effetto parete sia minore nel caso di impiego di fustella da 150 mm, con valori di K sempre superiori a quelli relativi a campioni preparati con fustella da 100 mm. È evidente pure che superato un determinato numero di giri, nella fattispecie 280, la miscela diventa sempre meno lavorabile in quanto diventa via via maggiore il grado di mutuo incastro raggiunto dalla struttura granulare.

Sebbene la micromeccanica dell'addensamento possa essere di interesse per una approfondita comprensione della struttura del conglomerato bituminoso e sia rilevante nel caso di materiali di tipo non tradizionale, per una descrizione d'insieme delle caratteristiche di lavorabilità di una miscela è bene prescindere dalle analisi di dettaglio esemplificate in Figura 7. È invece opportuno fare riferimento alla modellazione semplificata dell'eq.4, ponendo tuttavia una certa cura nella selezione dei dati sui quali basare la regressione lineare. In tal senso, nell'ambito dell'indagine descritta nella presente memoria, gli Autori hanno adottato l'accorgimento di basare l'elaborazione di ciascuna curva di addensamento sui dati rilevati in corrispondenza di punti distribuiti con passo costante nella scala logaritmica del numero di giri. Un esempio dei dati così ottenuti è fornito nella Tabella 8, ove sono riportati i valori medi del parametro K per ciascuna serie di campioni presi in esame. Essi consentono di evidenziare come la lavorabilità sia dipendente, oltre che dalla temperatura di costipamento e dal diametro della fustella, dal numero di giri finali.

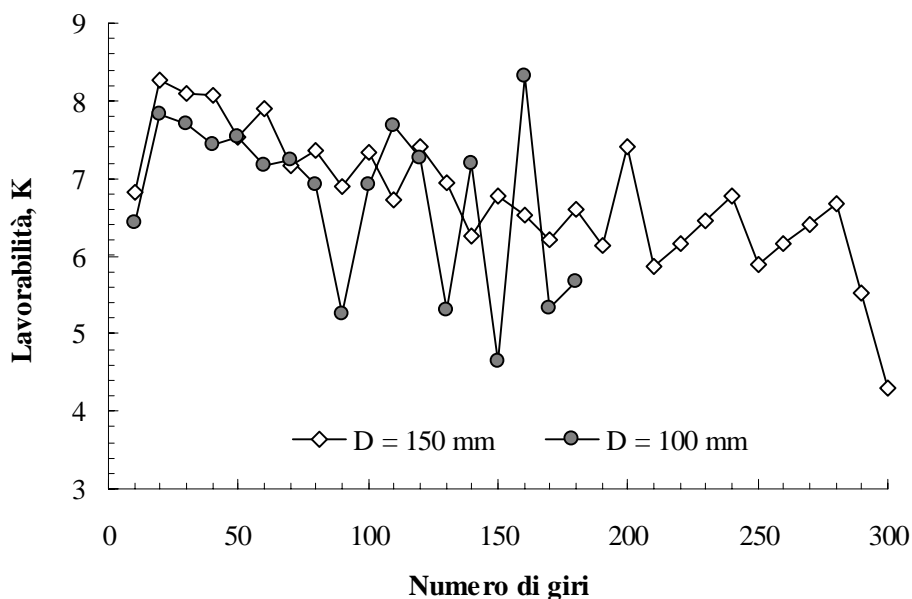


Figura 7. Andamento della lavorabilità in funzione del diametro della fustella per la miscela Binder

Diametro	100 mm						150 mm
	20		100		180		300
Temperatura	stesa	tipica	stesa	tipica	stesa	tipica	stesa
Usura 1	7,88	7,59	8,03	7,67	7,49	7,35	7,68
Usura 2	8,91	8,91	9,48	9,48	8,98	8,98	8,60
Usura 3	8,31	8,28	8,54	8,59	8,50	8,41	8,30
Usura 4	9,97	9,53	10,1	10,2	10,1	10,5	10,2
Binder	7,20	7,08	7,23	7,32	7,18	6,91	7,26
Base 1	8,44	8,00	8,52	8,28	8,09	8,02	7,85
Base 2	8,16	8,21	8,24	8,11	8,14	7,88	7,95

Tabella 8. Valori medi della lavorabilità

Al fine di includere nelle Norme Tecniche prescrizioni relative alla volumetria della miscela in corrispondenza di vari numeri di giri è opportuno verificare che le composizioni prescritte siano compatibili con le caratteristiche di lavorabilità che sono implicitamente richieste al materiale. A tal fine, tenendo in considerazione proprio il fatto che la lavorabilità media di un materiale dipende anche dal numero di giri raggiunti al termine del costipamento, e considerati altri fattori che influiscono sulla stessa lavorabilità (composizione e temperatura di costipamento), è stata eseguita una ulteriore analisi numerica mirata alla determinazione di un legame funzionale tra la lavorabilità (K) e le variabili richiamate. L'espressione determinata per le sette miscele indagate è pertanto la seguente:

$$K = a \cdot m_{B,EFF} + b \cdot m_F + c \cdot m_S + d \quad (\text{eq.6})$$

in cui le costanti a , b , c e d assumono i valori indicati nella Tabella 9 in funzione delle specifiche condizioni di costipamento (diametro delle fustelle, numero di giri impressi e temperatura di riferimento).

Diametro	Giri	Temperatura	a	B	c	d	R ²
100 mm	20	Stesa	0,251	0,281	-0,042	7,395	0,932
		Tipica	0,489	0,194	-0,051	7,285	0,881
	100	Stesa	0,521	0,248	-0,052	6,695	0,971
		Tipica	0,463	0,166	-0,044	6,946	0,897
	180	Stesa	0,663	0,181	-0,060	6,849	0,963
		Tipica	0,558	0,341	-0,061	6,300	0,982
150 mm	300	Stesa	0,341	0,356	-0,040	6,407	0,990

Tabella 9. Risultati dell'analisi di regressione per la lavorabilità

4.3 Caratteristiche meccaniche

Nella Tabella 10 sono riportati i valori di rigidità medi misurati mediante prove impulsive di trazione indiretta sui campioni Marshall e su quelli da 100 mm provenienti dalla pressa giratoria. Anche in questo caso per effettuare un confronto tra le rigidità dei campioni prodotti mediante le due metodologie, si è fatto riferimento ad una grandezza relativa, data dal rapporto tra la rigidità dei campioni ricostruiti con la pressa giratoria (E_{PG}) e quella dei corrispondenti campioni Marshall (E_M). Nella Figura 8 i valori assunti da tale grandezza, distinti a seconda della miscela bituminosa e della temperatura di costipamento, sono stati diagrammati in funzione del numero di giri della pressa giratoria a cui tale rapporto si riferisce.

Dall'analisi dei risultati si osserva che solo oltre i 100 giri una parte delle miscele ricostruite alla pressa giratoria è in grado di assumere una rigidità superiore rispetto a quella dei corrispondenti campioni Marshall. Le varie miscele, inoltre, sembrano distribuirsi in misura pressappoco equa a cavallo della linea di uguaglianza riportata in entrambi i grafici. Ciò indica che in corrispondenza dei 100 giri si ha una equivalenza media tra le rigidità misurate sui campioni prodotti con le due metodologie di costipamento considerate.

Numero di giri	20		100		180		Marshall
Temperatura	stesa	tipica	stesa	tipica	stesa	tipica	tipica
Usura 1	4020	5286	7079	10621	8147	11410	7838
Usura 2	4642		7961		8387		8640
Usura 3	2415	2798	4624	4127	4865	4476	4796
Usura 4	3689	3955	6085	5623	6030	6307	4962
Binder	4459	6169	6825	9240	8247	9654	10118
Base 1	5620	8067	7887	11660	14238	10789	8979
Base 2	4599	3899	8455	6102	10451	6428	8007

Tabella 10. Quadro delle rigidità in MPa

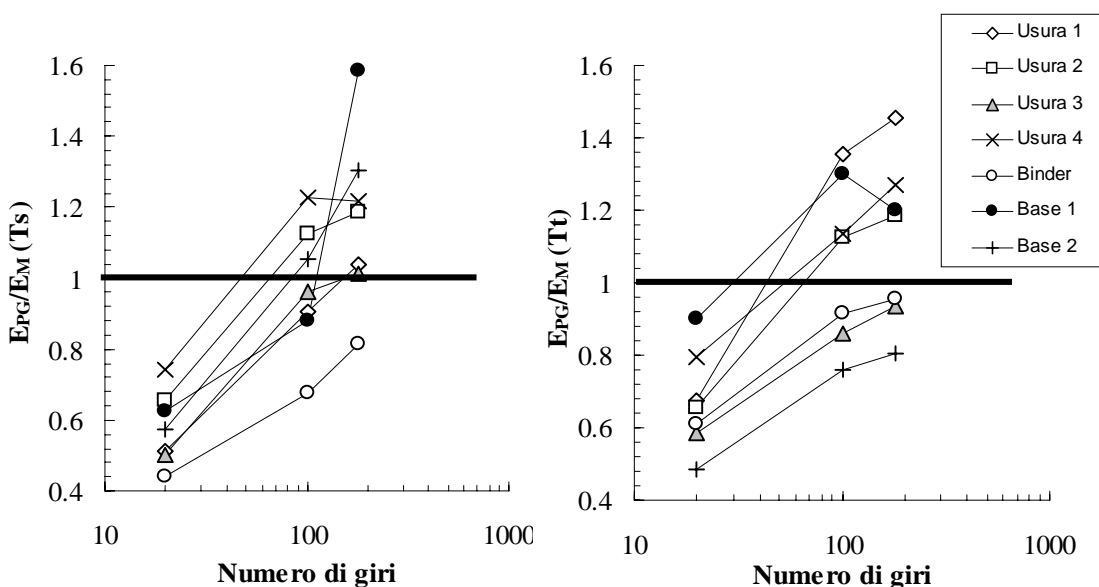


Figura 8. Rapporti tra le rigidità dei campioni alla pressa giratoria e quelle dei corrispondenti campioni Marshall al variare del numero di giri (n_G)

Per quanto concerne il confronto basato sui risultati delle prove di rottura a trazione indiretta, si osserva un'evoluzione che non risulta in linea con quanto osservato nei casi precedenti (Tabella 11). Per alcune delle miscele prese in esame (Usura 1 e 3, Binder e Base 1) la resistenza alla trazione indiretta misurata sui campioni prodotti per vari numeri di giri risulta inferiore ai rispettivi campioni Marshall. In altri due casi, precisamente per le miscele Usura 2 e Base 2, i valori misurati sui campioni prodotti a 180 giri sono di poco superiori ai rispettivi campioni Marshall.

In conclusione, considerando le proprietà meccaniche nel loro complesso, non è possibile individuare una chiave di lettura univoca degli effetti prodotti dalle varie

metodologie di compattazione. Ciò è verosimilmente dovuto al fatto che la struttura interna delle miscele gioca un ruolo differente a seconda del tipo di prova presa in esame (non distruttiva oppure a rottura) e che vi è oltretutto una grande variabilità di tali strutture interne al variare delle caratteristiche compositive delle miscele prese in esame. Se per la rigidità elastica può essere individuato, seppur con qualche margine di errore, un livello di equivalenza Marshall-Giratoria in corrispondenza dei 100 giri, per quanto concerne la resistenza alla rottura per trazione tale livello si sposta, per la maggioranza delle miscele, verso i 180 giri.

Numero di giri	20		100		180		Marshall
	stesa	tipica	stesa	tipica	stesa	tipica	tipica
Usura 1	1142	1159	1748	1620	1971	1883	1985
Usura 2	1235		1819		2142		2108
Usura 3	1062	1038	1486	1457	1569	1584	1662
Usura 4	1168	1206	1653	1778	2030	2122	1609
Binder	834	935	1443	1335	1488	1561	2017
Base 1	887	814	1124	1280	1622	1549	1792
Base 2	1137	940	1964	1571	1841	1691	1909

Tabella 11. Misure della tensione di rottura a trazione in kPa

5 CONCLUSIONI

Con la presente memoria gli Autori ritengono di avere fornito un contributo scientifico alla comprensione delle potenzialità che l'impiego della pressa a taglio giratorio offre nel contesto delle Norme Tecniche di Capitolato per lavori stradali.

Uno dei problemi che si dovranno affrontare quando si procederà al progressivo abbandono delle vecchie Norme Tecniche, sarà quello di definire il numero di giri a cui raggiungere il livello di addensamento sino a quel momento considerato come accettabile e riferito a condizioni ottenute in laboratorio con metodo di costipamento impulsivo standard (Marshall). A tale scopo, nel presente documento, sono stati presentati una serie di modelli matematici che legano i parametri del costipamento giratorio a quelli del sistema di costipamento Marshall. Inoltre, sono state definite altre relazioni matematiche che consentono di tenere conto dell'influenza di una serie di fattori quali il tipo di miscela, la sua composizione e la temperatura di costipamento sulle caratteristiche di lavorabilità delle miscele considerate.

6 BIBLIOGRAFIA

ASTM D 2726 – 88, “Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens”; Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1988.

ASTM D 2041-78, “Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures”; Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1978.

CEN, “Gyratory Compactor”, *European Standard*, European Committee for Standardization, CEN TC 227, sept. 1996.

CIRS, *Norme Tecniche per la Disciplina della Costruzione e Manutenzione delle Infrastrutture Stradali e Norme Tecniche di tipo Prestazionale per Capitolati Speciali d'Appalto*, Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale, Ancona, 2001.

Cominsky, R., Leahy, R. B., Harrigan, E., T., *Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning*, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-408, National Research Council, Washington, D.C., 1994.

Cominsky, R.J., *The SUPERPAVE Mix Design Manual for New Construction and Overlays*, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-407, National Research Council, Washington, D.C., 1994.

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Serie di Bollettini Ufficiali.

De Palma, C., Santagata, E., Bassani, M., “Indagine Sperimentale sull’impiego della Pressa a Taglio Giratoria”, Atti del Convegno SIIV, La Sicurezza Stradale, Pisa 1997.

Harrigan, E.T., Leahy, R.B., Youtcheff, J.S., “Preparation of Compacted Specimens of Modified and Unmodified Hot Mix Asphalt by Means of the SHRP Gyratory Compactor”, *The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices SHRP-A-379*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, SHRP M-002, pp. 95-102.

Moutier, F., “Prévision de la Compactabilité des Enrobés Bitumineux à l’Aide de la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)”, *Bulletin de Liaison de Laboratoire des Ponts et Chaussées*, n.121, sept.-oct. 1982, ref. 2472, pp.29-40.

Santagata, E., Bassani, M., “Improved Use of the Repeated Load Indirect Tensile Test”, *Proceedings of the 3rd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilised Composites*, Leeds, U.K., 1999.

Santagata, E., Bassani, M., “A Model for the Prediction of the Elastic Stiffness of Bituminous Mixtures Under Pulse Loading”, Submitted for publication to *The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology*, November 2001.

SHRP, “Preparation of compacted specimens of modified and unmodified hot mix asphalt by means of the SHRP Gyratory Compactor”; SHRP Designation M-002.