

Macchine per il costipamento: tipologie e criteri per il loro utilizzo

Asphalt mix compactors: types and criteria for their use



MARIANO CUPO PAGANO

già Professore, Università di Roma "La Sapienza"

Riassunto

La scelta di mezzi idonei per il costipamento dei materiali stradali (terre e conglomerati bituminosi) è di fondamentale importanza, al fine di ottenere l'addensamento prescritto dal Capitolato Speciale d'Appalto, con il minimo dispendio di energia.

La scelta deve essere fatta tenendo conto del tipo di materiali da costipare, in quanto gli effetti indotti dalle macchine (ad azione statica o ad azione dinamica) possono risultare benefici, inutili o addirittura nocivi, in dipendenza delle caratteristiche costitutive del materiale dello strato da costipare. È stato richiamato il meccanismo con cui, dalle macchine vibranti, viene indotto l'effetto dinamico nel materiale da costipare.

Notoriamente il beneficio nell'addensamento si otterrà soltanto per un materiale di particolari caratteristiche compositive di assortimento granulometrico, con assenza di frazioni coesive. Nel conglomerato bituminoso, il beneficio di tali macchine si ottiene esclusivamente sul conglomerato caldo, immediatamente dietro la finitrice, quando il legante, fluido alla temperatura di stesa, agisce addirittura da lubrificante, riduce l'attrito tra le superfici dei grani a contatto, e agevola il loro scorrimento e addensamento.

Summary

The choice of suitable equipment for the compaction of road materials (soils and bituminous mixtures) is very important in order to obtain the packing requested by the Contract Specification, with the minimum energy consumption.

The choice is carried out by considering the type of material to be compacted, as the effects of equipment (static or dynamic) could be positive, useless or negative, depending on constituent material's characteristics of the lay to be compacted. The device from vibro machines causes the dynamic effect in the material to be compacted.

It is well known that the advantage in the packing will be obtained only for a material with particular grading variety, absence of cohesive fractions. In the bituminous mixtures, the advantage of these equipment is obtained exclusively on hot mixtures, immediately behind the paver, when the binder, fluid at laying temperature, is even a lubricant material, reduces the friction between grains' surfaces and facilitates sliding and compaction.

1. L'importanza del costipamento

Prima di trattare i mezzi costipanti specifici per i conglomerati bituminosi, è opportuno effettuare una disamina degli elementi che intervengono nel fenomeno "costipamento" di un materiale sciolto, al fine di

individuare i parametri significativi ed efficaci per l'ottenimento del risultato ottimale.

I mezzi costipanti di cantiere sono decisamente diversi da quelli standardizzati per le prove di laboratorio. Ciò nonostante, l'andamento delle curve di costipamento (curve Proctor per le terre e curve "Marshall" o della »

pressa "giratoria", per i conglomerati bituminosi) è analogo, almeno qualitativamente, a quello che si riscontra nelle operazioni di costipamento con le opportune macchine che vengono utilizzate in cantiere, al variare dell'umidità (per le terre) e della percentuale di legante (per i conglomerati bituminosi).

Dalla sperimentazione pratica sulle terre risulta inoltre che l'umidità ottima, per l'addensamento con i mezzi di cantiere, è sempre leggermente maggiore di quella ottimale determinata in laboratorio, con le curve di costipamento.

Per le motivazioni suddette, è possibile avere, come obiettivo finale, il raggiungimento in cantiere dei valori di addensamento individuati in laboratorio, utilizzando i mezzi più idonei, con il necessario numero di passate.

In corso d'opera, una volta eseguito il costipamento di uno strato, occorrerà procedere al controllo dell'addensamento raggiunto, prima di effettuare la stesa dello strato successivo, per essere sicuri che le operazioni di costipamento abbiano prodotto l'effetto voluto, nel permettere il raggiungimento del grado di costipamento prescritto.

Uno scarso grado di costipamento, ritenuto erroneamente vantaggioso da parte dell'impresa esecutrice (per la minor quantità di materiale impiegato per ottenere lo spessore di contratto), compromette invece la conservazione, la funzionalità e la durabilità dello strato stesso e di tutti gli strati sovrastanti (sia negli strati di rilevato, sia negli strati della sovrastruttura stradale). Eventuali carenze di costipamento si appalesano ben presto, con danni alla sovrastruttura, che l'impresa è tenuta a risarcire, secondo i più recenti Capitolati speciali d'appalto, con notevole dispendio di tempo, materiali e mezzi d'opera. Ormai infatti, in quasi tutti i contratti, è stata inserita la clausola della responsabilità dell'impresa esecutrice, per una manutenzione almeno triennale.

2. Macchine costipanti

In cantiere, il costipamento avviene mediante specifiche macchine, di vario tipo, appositamente studiate allo scopo (**Fig. 1**). Queste macchine possono essere classificate in modi diversi, a seconda dei punti di vista: fra i più importanti, sono da ritenere quelli che mettono in evidenza il meccanismo di trasferimento dell'energia costipante fornita dalla macchina allo strato ad essa sottostante, che deve essere costipato. Possono quindi essere prese in considerazione due grandi categorie: "macchine ad azione statica" e "macchine ad azione dinamica".

2.1 Le macchine ad azione statica

Sono basate sull'applicazione di masse pesanti che in genere agiscono attraverso il rotolamento di ruote sul piano di appoggio (terreno o strato bitumato).

In un primo gruppo, le ruote possono essere di natura e conformazione diversa; si possono cioè avere ruote metalliche lisce o ruote gommate, dotate, o non, di incisioni o scolpiture tipo battistrada. A detto gruppo di macchine appartengono i cosiddetti "rulli compattatori" lisci, o a ruote gommate (supercompactor, carrelli pigiatori, ecc.) (**Fig. 2**). Tali macchine appaiono di uso relativamente più generalizzato, ed in particolare sono

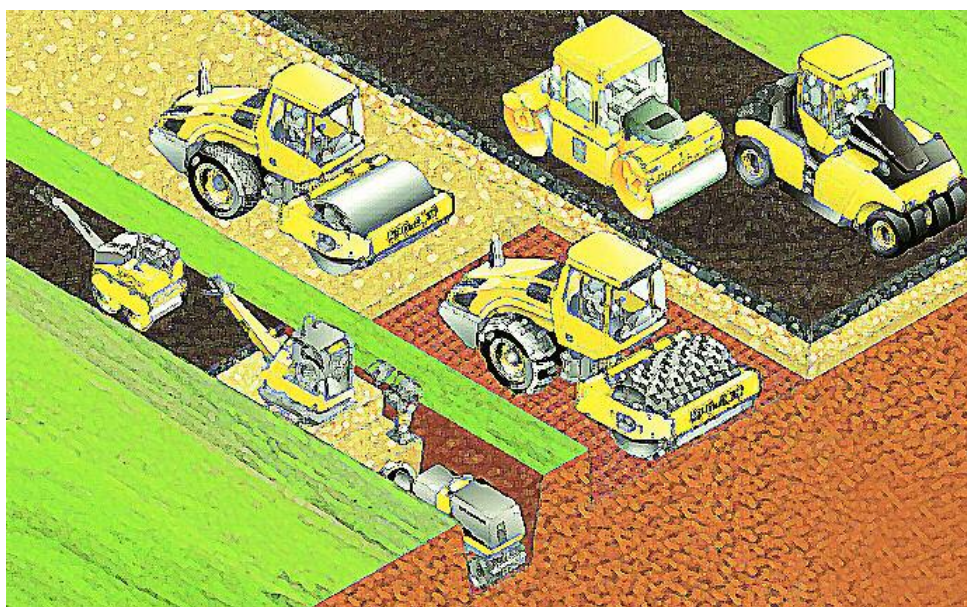


Fig. 1 Macchine per la compattazione delle terre e dei conglomerati



Fig. 2 Rullo statico gommato

più idonee per operazioni di finitura, specialmente su terre aride (materiali sabbiosi) o sul conglomerato bituminoso precedentemente costipato da altre macchine, quando lo strato aveva ancora una temperatura elevata (a seconda del tipo di legante idrocarburo usato), e sul quale occorre la regolarizzazione superficiale. Per il conglomerato bituminoso, l'operazione di finitura si ottiene soltanto dopo che la temperatura dello strato si è abbassata intorno ai 40÷50 °C, mediante passate di rulli lisci pesanti e, soprattutto, lenti (pochi metri al minuto), in modo da ottenere l'assestamento definitivo e la regolarità della superficie dello strato, vincendo la resistenza viscosa del legante che, a detta modesta temperatura, è notevole.

Nell'effettuazione del costipamento possono essere presenti, a seconda del tipo di macchina, ulteriori azioni locali, ad esempio di miscelazione o di spostamenti trasversali, grazie all'azione di massaggio delle ruote gommate, mentre possono verificarsi anche fenomeni di frantumazione, se il peso dei rulli lisci metallici è eccessivo e la granulometria dell'aggregato non è continua (questo vale principalmente per le terre, in cui possono essere presenti elementi di dimensioni notevoli, generalmente di minore resi-

stenza a compressione rispetto agli aggregati dei conglomerati bituminosi). Tali azioni aggiuntive non alterano il modo base di funzionare delle macchine stesse.

Un secondo gruppo di macchine ad azione statica, pure funzionanti con rotolamento, è quello nel quale diviene prevalente una vera e propria azione di punzonamento locale del terreno, mediante opportuni risaliti. A questo gruppo di macchine, che agiscono con notevoli azioni di taglio locale, oltre che di compressione, appartengono i cosiddetti "rulli a punta" o "a piede di montone" (**Fig. 3**). Sotto di essi, grazie alle modeste dimensioni delle superfici di contatto delle punte col terreno, si sviluppano azioni di notevole compressione, ma soprattutto, a causa del notevole rapporto "perimetro/area" nella superficie d'appoggio di ciascun punzone, si provocano diffuse (perché tante sono le punte) e forti azioni di taglio (perché grande è la variazione di s , lungo il bordo del punzone), in grado di vincere le forze di coesione dei materiali dello strato. Si fa notare che sarebbe erroneo utilizzare, su terre di tipo argilloso, i rulli metallici



Fig. 3 Rullo a piede di montone



normali, perché l'azione di taglio nei rulli lisci metallici normali si verifica, in modo molto più attenuato, soltanto ai due bordi della striscia di contatto del rullo col terreno, cioè agli estremi del cilindro metallico.

Le macchine con rulli dotati di punte sono perciò più idonee a costipare terreni coesivi (argillosi), per i quali lo spostamento e l'avvicinamento dei grani (cioè l'addensamento) può essere ottenuto solamente applicando apprezzabili valori delle forze di taglio.

Una diversa efficacia nelle azioni dell'uno o dell'altro tipo di macchine ad azione statica può essere ottenuta variando il peso della macchina stessa, il che viene realizzato, per lo più, agendo su carichi zavorra.

2.2 Le macchine ad azione dinamica

Sono quelle che riescono ad innescare un effetto dinamico nel materiale da costipare. Queste macchine possono essere suddivise in macchine che agiscono per vibrazione e macchine che agiscono per urto.

Il primo gruppo di macchine ad azione dinamica, è costituito da quelle cosiddette "vibranti" (Fig. 4). Essenzialmente esse sono dotate di dispositivi formati da coppie di alberi ruotanti in senso opposto, su ciascuno dei quali è montata una massa eccentrica, in modo tale, per esempio, da eliminare le componenti orizzontali delle forze centrifughe (che vengono assorbite dal telaio della macchina) e sommare, invece, le componenti verticali;

queste ultime, perciò, danno luogo ad una forza verticale, la cui ampiezza istantanea è variabile sinusoidalmente ad ogni giro, e la cui ampiezza massima è variabile col quadrato del numero di giri (Fig. 5).

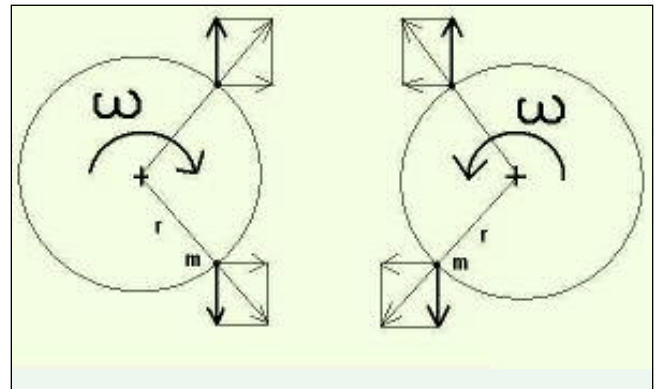


Fig. 5 Schema delle masse ruotanti

Con riferimento alla figura schematica delle masse ruotanti, per ciascuna massa ruotante, vale infatti la relazione:

$$F_c = m \cdot a_c = m \cdot \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r = 4 \cdot m \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot r$$

essendo:

F_c = Ampiezza (massimo valore dell'incremento e del decremento di peso)

m = una massa eccentrica ruotante



Fig. 4 A sinistra rullo vibrante con due ruote lisce, e, a fianco, rullo combinato

a_c = accelerazione centrifuga
 v = velocità periferica della massa eccentrica
 r = raggio di rotazione della massa eccentrica
 n = frequenza (n = numero di giri al secondo: in genere da 25 a 50)
 velocità angolare: $\omega = 2 \pi n$
 velocità periferica: $v = \omega r$ (r = raggio di rotazione della massa ruotante)

Sul piano su cui appoggia la macchina vibrante si verifica l'effetto delle due masse vibranti, con un'ampiezza massima complessiva pari ad $A = 2 F_c = 8 m \pi^2 n^2 r$, con valore, nel tempo, dato dalla legge sinusoidale:

$$F = A \sin \omega t$$

che si somma e si sottrae alternativamente al peso della macchina.

Come si deduce dalla formula, l'ampiezza, cioè l'effetto dell'incremento (o decremento) di peso, è funzione del valore delle masse eccentriche, del raggio di rotazione delle masse eccentriche, nonché del quadrato del numero di giri. La macchina, grazie al suo peso e all'effetto delle masse vibranti, pur rimanendo sempre a contatto col terreno, almeno con una quota parte del suo peso, esercita sul piano d'appoggio una forza variabile da un massimo ad un minimo (>0), con una determinata frequenza, conferendo perciò, al materiale da costipare, forze variabili istante per istante. Ne consegue che sono continuamente variabili le forze di contatto intergranulare tra tutti i grani dello strato di materiale sottoposto a costipamento (**Fig.6**).

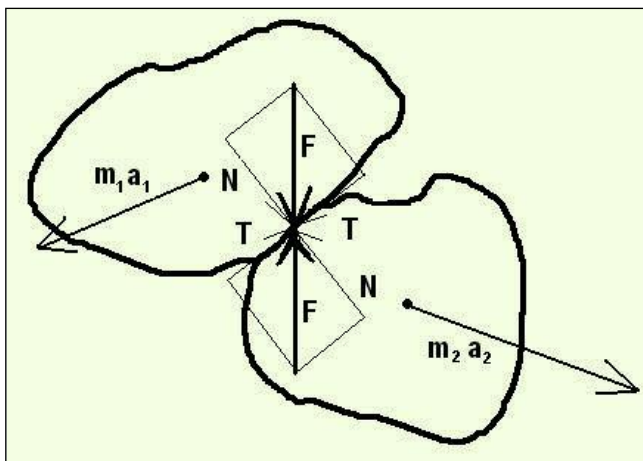


Fig. 6 Forze in gioco tra due grani a contatto

Durante questa variabilità delle forze di contatto (N), si hanno condizioni che alterano le forze di attrito interno tra i grani ($N \operatorname{tg} \varphi$), per cui avverrà l'assetamento di quei grani per i quali si verificano le condizioni di scorrimento, cioè di minore mutuo attrito interno, nelle quali pertanto risultano agevolate, nelle forze di contatto, le componenti trasversali (T) rispetto a quelle normali (N), cioè per le quali risulta $T > N \operatorname{tg} \varphi$. Il dinamismo a cui è sottoposto il materiale da costipare può essere così spiegato:

- ▶ sotto il carico istantaneo, variabile da istante a istante, inizia un assetamento di quei grani per i quali si verificano le condizioni di scorrimento;
- ▶ lo spostamento di tutti gli altri grani, a seguito dello squilibrio provocato dall'assetamento dei primi grani in movimento, avviene secondo direzioni casuali, compatibili con la situazione al contorno;
- ▶ la velocità di spostamento è variabile in conseguenza della variazione di forza applicata, istante per istante;
- ▶ nasce quindi un'accelerazione applicata ad ogni singolo grano (forza di massa), nella direzione casuale, connessa con la direzione della velocità, pur'essa variabile da istante a istante, in intensità e direzione; queste forze di massa si sommano vettorialmente allo stato tensionale istantaneo generato, tra i grani, dal peso della macchina, modificando le forze sulla superficie di contatto tra i grani, per cui può essere generato uno dei seguenti casi che favoriscono lo scorrimento (facendo riferimento a quanto può avvenire nel contatto tra due grani):
 - 1) un aumento di T, a parità di N;
 - 2) una diminuzione di N, a parità di T;
 - 3) un aumento di T ed una diminuzione di N.

In tutti i contatti tra i grani in cui si verifica $T > N \operatorname{tg} \varphi$, si generano, compatibilmente con le condizioni al contorno, mutui scorrimenti che favoriscono un più addensato assetto dei grani stessi.

Con il proseguire dell'energia di costipamento, si incrementa l'addensamento, fino a consentire il raggiungimento di un grado di costipamento non inferiore a quello prescritto dal Capitolato speciale d'appalto.

Le macchine vibranti possono essere realizzate con rullo tandem a semplice o doppia trazione, con uno o due tamburi vibranti (semoventi), oppure possono

essere costituite da rulli vibranti trainati da motrice con ruote gommate.

Nelle macchine vibranti più moderne sono state realizzate masse eccentriche disposte diversamente, in modo che possano essere applicate vibrazioni ed effetti dinamici anche in piani diversi da quello verticale. Ad esempio, in alcune macchine, ciascun tamburo può essere fatto vibrare facendo compiere, al proprio baricentro, un cerchio anziché un semplice movimento verticale, come nel caso della macchina descritta precedentemente. Ne consegue che, se un tamburo metallico appoggia sul terreno mentre il suo baricentro compie un movimento rotatorio circolare, nell'area di contatto fra tamburo e suolo si suscitano forze vibratorie non solo verticali, bensì polidirezionali, che sottopongono il materiale da addensare ad un trattamento assai più vigoroso, agevolano la riduzione dell'attrito interno lungo piani diversi, permettendo lo spostamento dei grani di qualsiasi dimensione nelle direzioni compatibili, al contorno, per colmare i vuoti.

Notevoli vantaggi si hanno con macchine dotate di due tamburi vibranti, che lavorano vicini tra loro, ma con frequenza diversa, anche di una modesta percentuale (dal 2 al 4 %). Dalla teoria ondulatoria è noto che due onde di pari ampiezza, ma di frequenza leggermente diversa, si sommano dando luogo un'onda composta di ampiezza doppia e con frequenza primaria pari alla media delle due frequenze, ma con frequenza secondaria molto bassa. Questo fenomeno è conosciuto scientificamente col nome di "battimenti". Quando due tamburi vibranti si trovano a lavorare l'uno vicino all'altro, la zona compresa fra le due superfici di contatto è quella in cui si sommano le ondulazioni da loro provocate.

Affinché le macchine ad azione dinamica possano generare effetti vantaggiosi, occorre:

- ▶ utilizzarle esclusivamente in terreni costituiti da materiali granulari "aridi", privi di coesione, cioè non argillosi. L'effetto coesivo dell'argilla farebbe da collante e impedirebbe di beneficiare dal vantaggio delle variazioni delle forze di contatto (N, T) tra i grani;
- ▶ che i materiali granulari siano costituiti da una granulometria "continua", cioè assortiti granulometricamente, ricchi di tutte le frazioni dimensionali, in

modo che i grani di dimensioni minori possano inserirsi tra i grani più grandi. Tali materiali granulari devono essere poveri di grani finissimi, precipuamente coesivi.

2.2.1 *Ambiti di utilizzo*

L'utilizzo di una macchina ad azione dinamica su un terreno argilloso, è un impiego sbagliato, con inutile dispendio di energia, in quanto si ottiene soltanto la messa in vibrazione dell'intero ammasso di terreno sotto la macchina, per un ampio spazio intorno, senza peraltro riuscire ad ottenere l'avvicinamento dei grani, a causa della presenza della coesione, che li tiene fortemente legati tra loro.

Nel conglomerato bituminoso tradizionale, che, per costituzione, deve sempre essere assortito granulometricamente, il beneficio delle macchine vibranti si ottiene esclusivamente sul conglomerato caldo, cioè immediatamente dopo la stesa (dietro alla finitrice); infatti, alle elevate temperature, il bitume perde la sua viscosità e diventa fluido; in questo caso, agisce addirittura da lubrificante (riduzione dell'attrito tra le superfici a contatto) e quindi agevola lo scorrimento dei grani tra loro, permettendo un primo notevole contributo all'addensamento. Il costipamento dovrà essere eseguito immediatamente dietro la finitrice, mediante rulli metallici lisci vibranti non molto pesanti, andrà proseguito possibilmente con rulli gommati (azione di miscelazione e massaggio) e successivamente completato sul conglomerato tiepido (40÷50 °C) con macchine ad azione statica, pesanti e lente, come sopra esposto, per vincere la resistenza viscosa, che è notevole a tale modesta temperatura.

Un treno ideale per il costipamento di un conglomerato bituminoso potrebbe essere costituito da:

- ▶ un rullo tandem vibrante leggero semovente (4-6 t, frequenza: 25-40 Hz, carico lineare: 20-30 kg/cm, velocità: 4-5 km/h, con ruota motrice rivolta verso la finitrice), per la fase di primo addensamento dei grani, immediatamente dietro la finitrice, due passaggi statici e due con vibrazione inserita; se la macchina non è dotata di disinserzione automatica durante l'inversione di marcia, ricordarsi di distaccare sempre la vibrazione, nel passare da marcia avanti a marcia indietro;

- ▶ un rullo statico gommato pesante (da 10 a 25 t), per la fase di effettivo costipamento, su materiale ancora ben caldo, ad una distanza di 50-150 metri dalla finitrice;
- ▶ un rullo statico pesante metallico liscio (8-10 t carico lineare: 40-50 kg/cm), per le operazioni di regolarizzazione e finitura superficiale, da passare sul conglomerato, quando la temperatura si è notevolmente abbassata.

Occorre tener presente che, in un misto granulare assortito granulometricamente, quale è quello che costituisce lo scheletro litico di un conglomerato bituminoso, è difficile individuare a priori la frequenza di vibrazione ottimale; per cui ci si riferisce a valori medi dettati dall'esperienza, nell'ambito delle frequenze sopra riportate, da convalidare in corso d'opera.

Sembra comunque opportuno segnalare che, per le miscele bitumate, deve essere adottato il seguente criterio:

- ▶ per strati modesti (binder e usura) occorre un'alta frequenza e una bassa ampiezza;
- ▶ per strati spessi (basi e strati di ricarica notevoli) occorre una bassa frequenza e una elevata ampiezza.

2.3 Macchine dinamiche "ad urto"

Un secondo gruppo di macchine ad azione dinamica è costituito dalle macchine che agiscono per urto (magli, mazzapicchi, rane, piastre vibranti, ecc.). Esse sono realizzate in modo da ottenere notevoli quantità di energia meccanica da trasferire al materiale da compattare, pur essendo dotate di un piccolo peso. Con tale criterio vengono costruite macchine maneggevoli, di piccolo ingombro, idonee a costipare superfici piccole o irregolari o difficilmente accessibili, dove non riescono ad operare le grandi macchine vibranti. In alcune di esse, le masse vibranti vengono progettate in modo che il valore dell'ampiezza sia pari al peso della macchina stessa, in maniera che la macchina, per due volte a ciclo, risulta senza peso; perciò non oppone resistenza alla traslazione e può essere spostata manualmente, senza alcuna fatica, in tutta la zona da costipare (piastre vibranti) (**Fig. 8**).

In altre macchine, il peso dell'intera macchina costituisce una massa battente azionata mediante l'effetto dello scoppio di una miscela di benzina/olio, provocato da una scintilla elettrica; ad ogni scoppio, la macchi-

na si solleva bruscamente dal suolo. Il loro effetto è doppio, derivando, sia dalla reazione del terreno all'atto del sollevamento, sia dall'azione d'urto della loro massa all'atto della ricaduta (mazzapicchi e rane).



Fig. 8 Piastra vibrante

3. Conclusioni

Per effettuare l'addensamento dei materiali, dovrà essere scelto il mezzo costipante più opportuno, stabilendo anche la quantità di lavoro per ottenere l'effetto di costipamento voluto. A tale scopo, per ogni tipo di terra (per i rilevati) o per ogni tipo di conglomerato bituminoso (negli strati della sovrastruttura stradale), all'apertura del cantiere, prima della posa in opera dei materiali, verrà effettuata sperimentalmente la "taratura del mezzo costipante", cioè la determinazione del numero di passate del mezzo che si ha a disposizione, necessarie per raggiungere effettivamente il valore del grado di costipamento prescritto dal Capitolato speciale d'appalto. In tale occasione potranno essere effettuate prove di variazione delle frequenze delle macchine vibranti, al fine della scelta della frequenza ottimale. ■

