

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Dipartimento di Ingegneria civile, ambientale e dei materiali
*DICAM***

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea in Costruzioni di Strade, Ferrovie ed Aeroporti

**Aspetti progettuali e ambientali delle
pavimentazioni ad elementi**

Tesi di laurea di
Matteo Pizzoli

Relatore
Dott. Ing. Cesare Sangiorgi

Correlatori
Dott. Ing. Matteo Pettinari
Dott. Ing. Federico Irali

PAROLE CHIAVE:

Pavimentazioni ad elementi

Masselli autobloccanti

Pavimentazioni stradali

Pavimentazioni drenanti

Inquinamento delle acque

Introduzione	9
Capitolo 1 - Pavimentazioni ad elementi: tipologie costruttive e caratteristiche dei masselli autobloccanti	
1.1 Premessa.....	11
1.2 Le sovrastrutture in masselli autobloccanti.....	11
1.2.1 Caratteristiche delle pavimentazioni in masselli	11
1.2.1.1 Masselli in cls.....	12
1.2.1.2 Masselli in cls speciali.....	15
1.2.1.3 Masselli in argilla	16
1.2.1.4 Masselli in pietra naturale	17
1.3 Conclusioni.....	18
Capitolo 2 - Funzionamento e installazione delle pavimentazioni in masselli	
2.1 Premessa.....	21
2.2 Funzionamento delle pavimentazioni in masselli autobloccanti	21
2.2.1 Ruolo del bordo di contenimento.....	24
2.2.2 Tombini e pozzetti	28
2.3 Posa in opera della pavimentazione.....	30
2.3.1 Piano di posa.....	30
2.3.2 Cordoli.....	30
2.3.3 Geosintetici	31
2.3.4 Strato di allettamento	31
2.3.5 Posa dei masselli.....	33
2.3.6 Sigillatura e vibrocompattazione della pavimentazione.....	34
2.3.7 Controlli finali	35
2.4 Ripristino di pavimentazioni in masselli a seguito di riparazioni	35
2.5 Conclusioni.....	38
Capitolo 3 - Ruolo e funzionamento delle pavimentazioni in masselli permeabili e caratteristiche superficiali di aderenza	
3.1 Premessa.....	39

3.2 Aderenza delle pavimentazioni in masselli.....	39
3.2.1 Caratteristiche dello scivolamento delle pavimentazioni in masselli.....	41
3.2.2 Test di aderenza su pavimentazioni in masselli autobloccanti.....	42
3.3 Inquinanti e effetti sull'ambiente	45
3.4 Idrodinamica nelle pavimentazioni permeabili	45
3.4.1 Riserva drenante	47
3.4.2 Riserva permeabile	47
3.5 Grandezze e coefficienti pavimentazioni permeabili.....	48
3.5.1 Conduttività idraulica satura K.....	49
3.5.2 Coefficiente di Dilavamento (Runoff)	50
3.5.3 Tempo di corrivazione.....	51
3.6 Trattamento delle acque e inquinanti.....	54
3.6.1 Olii e benzine	55
3.6.2 Sostanze biologiche	56
3.6.3 Particelle solide di varia natura.....	56
3.6.4 Cloro	58
3.7 Capacità filtrante degli inquinanti del terreno di fondazione	59
3.8 Fotocatalisi nelle pavimentazioni a masselli.....	60
3.9 Tipi di masselli drenanti.....	65
3.9.1 Masselli con giunti stretti.....	65
3.9.2 Masselli a giunti aperti o "OpenJoint"	66
3.9.3 Masselli a celle aperte o griglie	66
3.9.4 Masselli a giunti spazati	69
3.10 Riempimento dei giunti nelle pavimentazioni a masselli impermeabili	70
3.10.1 Materiale di riempimento dei giunti.....	70
3.11 Relazione fra infiltrazione e resistenza ai carichi della pavimentazione	73
3.12 Intasamento e recupero della permeabilità.....	74
3.13 Tipi e forme di masselli drenanti	76

3.13.1 Doppio quadro	76
3.13.2 Triplo quadrato.....	78
3.13.3 Rettangolari con dentellature.....	79
3.13.4 Doppio Ottagono	81
3.13.5 Checkerblock.....	82
3.13.6 Turfstone.....	84
3.13.7 Masselli gettati in opera.....	86
2.14 Conclusioni	88
Capitolo 4 Progettazione delle pavimentazioni in masselli	
4.1 Premessa.....	91
4.2.1 Sovrastruttura o pavimentazione.....	92
4.2.1.1 Strato superficiale	92
4.2.1.2 Strato di base.....	92
4.2.1.3 Strato di fondazione.....	92
4.2.2 Sottofondo	92
4.3 Progettazione della pavimentazione secondo linee guida.....	93
4.3.1 Definizione della categoria di traffico.....	93
4.3.2 Scelta del tipo di massello e schema di posa.....	95
4.3.3 Verifica della portanza del sottofondo.....	97
4.3.3.1 Trattamento di stabilizzazione del terreno	98
4.3.3.2 Approfondimento dello scavo.....	99
4.3.4 Progettazione della base e della fondazione.....	99
4.3.4.1 Sovrastrutture flessibili.....	101
4.3.4.2 Sovrastrutture semirigide.....	101
4.3.4.3 Misti granulari.....	101
4.3.4.5 Misto cementato	104
4.4 Linee guida statunitensi.....	107
4.4.1 Stima degli assi equivalenti	107

4.4.2	Identificazione tipo di terreno e categoria.....	107
4.4.3	Drenaggio nel terreno di fondazione	108
4.4.4	Stima delle caratteristiche del terreno	108
4.4.5	Scelta del tipo di base	109
4.4.6	Scelta del tipo di materiali.....	113
4.4.6.1	Materiali della base.....	113
4.4.6.2	Materiali di fondazione.....	114
4.4.6.3	Materiali dello strato di allettamento	114
4.4.5	Scelta del tipo di masselli	115
4.5	Analisi FEM delle pavimentazioni in masselli.....	116
4.6	Comparazione fra diversi tipi di modellazione	116
4.6.1	Caratteri geometrici e fisici del modello utilizzato.....	117
4.6.2	Risultati delle simulazioni FEM	118
4.7	Analisi parametrica di una pavimentazione con metodo FEM 3D non lineare.....	119
4.7.1	Modello in esame	119
4.7.2	Verifica del modello	119
4.7.3	Studio parametrico	120
4.7.3.1	larghezza dei giunti.....	120
4.7.3.2	Dimensione dei masselli	
4.7.3.3	Resistenza dei masselli	121
4.7.3.4	Spessore dei masselli.....	122
4.8	Studio delle spinte orizzontali.....	123
4.9	Simulazione con carichi orizzontali	124
4.9.1	Verifica sperimentale	126
4.9.2	Risultati.....	128
4.10	progettazione delle pavimentazioni secondo modelli FEM	132
4.10.1	Caratteristiche del sottofondo.....	132
4.10.2	dimensionamento dello strato di base	132

4.11 Studio di un quaderno delle pavimentazioni in masselli in pietra naturale con metodo FEM	134
4.11.1 Modello dello studio	134
4.11.2 Limiti tensionali e deformativi.....	135
4.11.3 Simulazione	136
4.12 Conclusioni.....	141
Conclusioni tesi.....	143

Introduzione

L'esigenza di pavimentazioni stradali è sorta al momento in cui l'uomo ha iniziato i trasferimenti, quindi si può affermare da quando esiste l'uomo stesso. Il primo rozzo tentativo di consolidare il terreno su cui transitare fu fatto con rami e fascine per quei brevissimi tratti, anche di pochi metri, per attraversare avvallamenti, fossati naturali o piccole zone paludose. L'evoluzione della specie umana e la necessità di conquista del territorio ha poi spinto l'uomo a vedere nei massi di roccia elementi che, opportunamente accostati e sottofondati avrebbero potuto costituire un nastro di collegamento tra luoghi lontani anche per mezzi pesanti; il facile reperimento della materia prima, praticamente in loco, ha dato vita ai primi blocchi. I masselli in pietra sono stati usati nella costruzione di pavimentazioni stradali per molti secoli. Originariamente erano di pietra naturale, per poi evolversi, in tempi più recenti, in mattoni di laterizio cotto. Essi furono usati per la pavimentazione di aree cortilive e per strade strettamente urbane con traffico veicolare leggero e saltuario, contemporaneamente, per un problema di carattere pratico ed in particolare per quelle città prossime ai corsi d'acqua, i masselli di grandi dimensioni sono stati sostituiti da ciottoli eliminando così la necessità di grossa attrezzatura per il trasporto e la difficoltà di posa; questo tipo di pavimentazione ha poi preso il sopravvento non solo per i motivi sopradetti, ma anche nel tempo, per motivi estetici ed architettonici.

Dopo la seconda guerra mondiale le città europee vennero ricostruite cercando di replicare il carattere delle strade in pavimentazione classica in pietre naturali e per questo scopo alcune industrie, al fine di ridurre i costi della ricostruzione iniziarono a produrre i primi masselli in cls sfruttando l'idea del carattere classico delle pavimentazioni in pietra naturale. Nello stesso periodo in nord America, a causa della crescente motorizzazione e della ricerca di superfici più lisce, si era spostata l'attenzione sulle pavimentazioni di asfalto e cls a lastre, ma negli anni 60, in Germania, lo sviluppo e l'efficienza nella produzione di masselli portarono l'esportazione di questo prodotto inizialmente in Inghilterra e da qui in tutto il mondo, fino ad essere implementato con successo negli Stati Uniti negli anni 70.

Le pavimentazioni ad elementi sono tra le più versatili a disposizione; esse vengono utilizzate per la costruzione di marciapiedi, strade, parcheggi, piazzali industriali e per applicazioni particolari quali spazi portuali e aeroportuali. L'utilizzo dei masselli autobloccanti in calcestruzzo ha avuto un forte incremento in Europa negli ultimi anni, mentre in Italia il loro impiego nella maggior parte dei casi rimane limitato alla pavimentazione di piazze, giardini e aree residenziali. Nel nord Europa vengono utilizzati

per le pavimentazioni di strade urbane, porti e aeroporti perché si sono dimostrati più durevoli e versatili delle classiche pavimentazioni in conglomerato bituminoso in condizioni meteorologiche estreme.

La presenza sul mercato di molteplici possibilità tecniche e architettoniche accresce l'interesse per queste pavimentazioni, i materiali utilizzati e le tecniche produttive sono varie e conferiscono ai masselli caratteristiche particolari che permettono il loro utilizzo in numerose soluzioni. Importante e interessante è la conoscenza della modalità di posa di queste pavimentazioni al fine di capire quali siano i punti deboli e gli errori da non commettere al fine di garantire per tutta la vita utile della pavimentazione le prestazioni ottimali. Questo tipo di pavimentazione rientra nella categoria delle sovrastrutture flessibili ricalcandone i concetti generali, quali la presenza di fondazione, base e strato di collegamento e il comportamento sotto i carichi durante il suo esercizio, è per questo che le modalità di progettazione non si discostano molto dalle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Oltre alle caratteristiche di resistenza dei masselli è stato dato un ampio spazio alle caratteristiche superficiali e di ecocompatibilità delle pavimentazioni in masselli, in molti paesi nord europei e negli Stati Uniti queste superfici vengono utilizzate per la loro grande versatilità dal punto di vista idrodinamico, esse vengono utilizzate sia in aree soggette a frequenti alluvioni, sia come rivestimento di sponde di laghi o fiumi, sottolineando quindi l'affinità con problematiche di carattere idrico. La sensibilità verso i problemi ambientali e di inquinamento nel nord Europa ha portato un grande sviluppo ed utilizzo delle pavimentazioni in masselli permeabili a causa delle loro spiccate caratteristiche di ecocompatibilità e di trattamento degli inquinati.

Lo studio e la progettazione sono frutto dell'esperienza sul campo effettuata in vari anni di sviluppo e delle tecniche di calcolo effettuate attraverso lo studio agli elementi finiti, capace solo ora grazie a calcolatori sufficientemente potenti di analizzare il comportamento complesso dei materiali e degli strati caratterizzati da discontinuità e da leggi di comportamento non lineari. In questa breve introduzione al fine di comprendere l'importanza di questi masselli e a che punto si è spinta la ricerca, la produzione e le nuove idee prodotte per la sostenibilità e attenzione all'ambiente, vale la pena citare due esempi di materiale recentemente prodotto e messo in commercio: Un massello in cls fotoluminescente prodotto da una azienda italiana e una pavimentazione continua altamente drenante derivata dall'idea del massello prodotta da una azienda dell'Alta Italia e testata da circa quattro anni in condizioni estreme e che sarà a breve messa in commercio.

Capitolo 1 - Pavimentazioni ad elementi: tipologie costruttive e caratteristiche dei masselli autobloccanti

1.1 Premessa

L'argomento è di estremo interesse e, dando risultati eccellenti stimola l'indagine sulle capacità drenanti, sulla loro durata nel tempo e sulla loro capacità concorrenziale a livello economico con altri tipi di pavimentazioni; si cercano allora vari tipi di masselli, si studiano le loro forme e i materiali che li costituiscono e se ne studiano i processi produttivi al fine di comprendere meglio le caratteristiche dei prodotti in commercio.

1.2 Le sovrastrutture in masselli autobloccanti

1.2.1 Caratteristiche delle pavimentazioni in masselli

Le sovrastrutture in masselli, sono costituite da una serie di elementi rigidi uniti per attrito da giunti di sabbia con granulometrie ben definite e adagiati su letto di inerti anch'essi con particolari caratteristiche e con compattazione adeguata. La costanza dimensionale e prestazionale é assicurata da un processo industriale e permette il loro perfetto bloccaggio una volta posti in opera. Le pavimentazioni in masselli autobloccanti (MAC) hanno ottime caratteristiche di resistenza sia nei confronti di carichi concentrati verticali, sia di sforzi tangenziali e superiori ad altre pavimentazioni in caso di aderenza, resistenza ad oli, agenti chimici, a variazione di temperatura oltre all'abrasione, rendendoli adatti anche per installazioni in zone industriali. Un altro vantaggio di queste sovrastrutture é che una volta installate non é necessario attendere per il loro utilizzo, diminuendo così i costi dovuti ai disagi e alla inoperatività della zona. I costi di costruzione rispetto alle sovrastrutture tradizionali sono maggiori del 5-15% ma la scarsa necessità di manutenzione ordinaria e straordinaria, la facilità della stessa la possibilità del recupero del materiale e la minor produzione di scarti a fine del ciclo vitale rendono conveniente questo tipo di opera. Ogni pavimentazione a masselli consiste in vari elementi da tenere in considerazione, dal tipo di materiale costituente i masselli che può variare dalla pietra naturale ai vari tipi di cemento, alle svariate forme dei masselli specifiche per il tipo di utilizzo. Le tecniche di produzione di massa hanno ridotto il prezzo dei masselli rendendo conveniente questo tipo di pavimentazione per molti interventi sia di carattere pubblico che privato; utilizzando masselli di materiali adeguati si può rimpiazzare, in molti ambiti, l'asfalto garantendo un livello estetico più gradevole e prestazioni superiori. Un esempio delle varie colorazioni e disegni che si possono riprodurre con i masselli. (Fig.1.1)

Capitolo 1 - Pavimentazioni ad elementi: tipologie costruttive e caratteristiche dei masselli autobloccanti piccole dimensioni per evitarne il blocco e la rottura come nel caso di carrelli di supermercati, o per agevolare semplicemente il transito di mezzi come biciclette o carrozzine per disabili.

Il colore nei masselli di calcestruzzo é realizzato utilizzando appositi coloranti costituiti principalmente da ossidi miscelati al cls in fase di produzione; i sistemi per colorare i masselli sono due:

- Metodo a colorazione intera
- Metodo a colorazione superficiale “face mix”

Nel metodo a colorazione intera il blocco é costituito interamente da cls colorato, in questo caso il colore non é soggetto a fenomeni di usura superficiale (Fig. 1.2).



Figura 1.2 esempio di massello ottenuto attraverso la colorazione intera

Nel caso di colorazione superficiale “face mix” la parte più bassa del blocco che viene colata per prima nello stampo é normale cls grigio, mentre la parte superficiale, il cui spessore varia a seconda del produttore, é costituita da calcestruzzo colorato (Fig. 1.3). Il ritardo nel getto del secondo strato é molto breve per evitare il fenomeno di distaccamento tra i due getti a causa dei tempi diversi di presa che porterebbe a difetti e rotture nella pavimentazione. Questa seconda tecnologia permette di utilizzare per i due strati anche aggregati e cementi differenti: nello strato inferiore é così possibile utilizzare materiali meno pregiati o di riciclo, nella parte superficiale soggetta ad usura, che solitamente non scende sotto i 4 mm di spessore, si utilizzano miscele cementizie a base di quarzo in modo da aumentarne la durezza e raggiungere lo standard UNI EN 1338 classe 1. In questo modo é possibile raggiungere un migliore aspetto estetico consentendone colorazioni più accentuate, gradevoli, di aspetto sfumato e disomogeneo in modo da soddisfare le più diverse esigenze architettoniche.



Fig. 1.3 esempio di massello ottenuto attraverso la colorazione intera

Di contro c'è da considerare la maggiore spesa da parte delle aziende produttrici a causa della maggiore complessità nella produzione di quest'ultimi. Solitamente la qualità dell'ossido utilizzato incide sulla durata: coloranti meno pregiati tendono a sbiadire nel tempo a causa dei raggi solari, con il rischio di avere pavimentazioni non uniformi e, nel caso di ripristino di alcune zone per manutenzioni o rotture di avere colori molto diversi dall'originale. Vi sono svariate lavorazioni di finitura superficiale per rendere gradevoli o più resistenti le pavimentazioni; la finitura anticata dei masselli viene ottenuta attraverso una particolare azione meccanica con appositi rulli e viene abbinata a colorazioni particolari in modo da avvicinare l'aspetto del prodotto ad una antica pavimentazione in cotto (Fig. 1.4). Altre finiture ottenute con pressovibrazione riproducono quasi fedelmente la trama di pietre naturali pregiate (Fig. 1.5) .



Figura 1.4 Pavimentazione in masselli di cls con effetto cotto



Fig. 1.5 Masselli in cls simili a pietre naturali

1.2.1.2 Masselli in cls speciali

I masselli in cls poroso sono costituiti da una miscela particolare che presenta una prefissata porosità: il vantaggio di questa tecnologia é che l'intera pavimentazione e non solo i giunti diventano permeabili. Il massello drenante é indicato per marciapiedi, cortili, parcheggi per autovetture e per aree ciclo pedonali. La permeabilità dei masselli in cls é generalmente molto scarsa e per ovviare a questo problema, oltre a miscele drenanti la forma degli stessi li può rendere adatti a questa esigenza, é possibile trovare masselli con distanziali maggiorati che permettono il riempimento dei giunti con materiali che ne consentono un comportamento diverso: possono essere riempiti di graniglia (per una migliore drenanza) o coltivati a prato (drenanza minore); il vantaggio di questi masselli é la possibilità di creare aree drenanti in superfici anche soggette a carichi pesanti e condizioni gravose come piazzali industriali o portuali.

I grigliati erbosi sono la tipologia più comune di pavimentazione a masselli drenante in cls; la loro capacità drenante é funzione del rapporto pieno/vuoti e dal materiale di riempimento dei vuoti; queste pavimentazioni a causa dalla loro struttura non sono adatte per impieghi gravosi e solitamente vengono utilizzati per parcheggi di autoveicoli o zone di transito veicolare leggero. Vari esempi di masselli permeabili sono esposti nel capitolo 3.

Gli usi di questi masselli sono innumerevoli a partire dalla pavimentazione di parcheggi per arrivare alla stabilizzazione dei bordi di canali o laghi (Fig. 1.6).

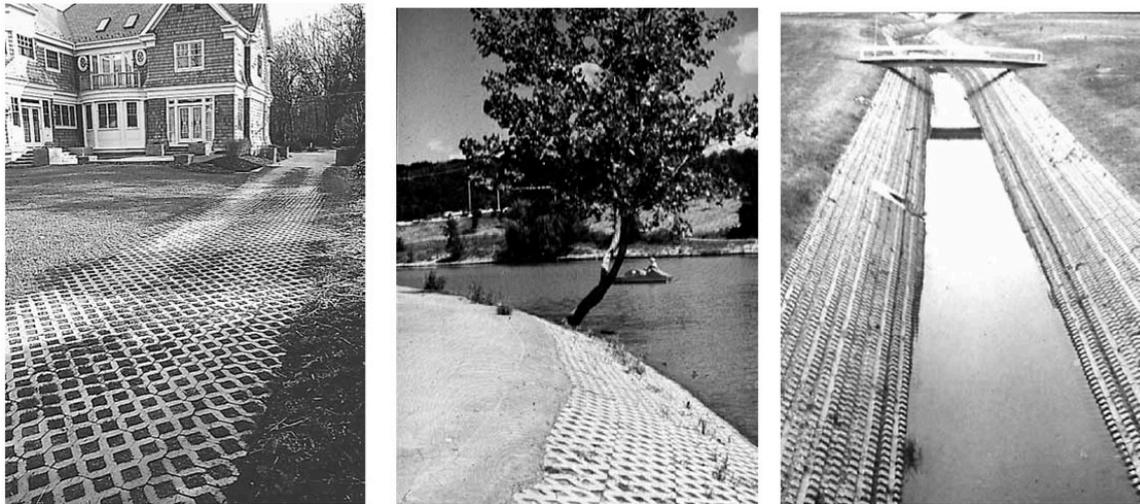


Fig. 1.6 Esempi di uso di pavimentazioni in grigliati erbosi

1.2.1.3 Masselli in argilla

I masselli in argilla vengono prodotti con un lato rifinito, in alcuni casi il lati rifiniti sono entrambi; in caso di usura, la doppia faccia consente il semplice ripristino della pavimentazione usurata con l'inversione del massello (Fig. 1.7). il colore é completamente naturale, non utilizzando quindi additivi sono meno soggetti allo sbiadimento dovuto ai raggi solari. Da segnalare che i masselli in argilla a causa della struttura interna sono difficilmente tagliabili con i block splitter perché ne provocherebbe la scheggiatura, é quindi necessario l'uso di dischi diamantati.

Il problema maggiore di questo tipo di massello é il costo di fabbricazione; il procedimento di produzione, al fine di garantire l'adeguata durezza per l'uso delle argille come pavimentazione, richiede un processo di cottura a temperatura maggiore rispetto ai normali mattoni da costruzione. E' possibile l'uso di mattoni realizzati a mano con cottura standard al posto dei masselli ma solo per la pavimentazione di aree a basso traffico pedonale come i percorsi all'interno di giardini.

I masselli in argilla hanno tolleranze dimensionali maggiori rispetto ai masselli in cls e vengono forniti in forme e dimensioni che più si adattano ad interventi di pregio poiché permettono soluzioni estetiche gradevoli. L'uso di questo tipo di pavimentazione é molto meno diffuso rispetto alle omologhe in cls o pietra naturale.



Fig. 1.7 Esempio di pavimentazioni in masselli di argilla

1.2.1.4 Masselli in pietra naturale

I Masselli in pietra naturale sono i masselli di più antico utilizzo, ne esistono di varie forme e dimensioni e di pietre diverse (Fig 1.8). La pavimentazione che viene maggiormente utilizzata anche ora e che ha un effettivo interesse pratico è quella costituita da masselli o blocchetti di porfido o di pietra calcarea, questo tipo di pavimentazione è largamente utilizzato in ambito urbano per il suo elevato pregio estetico, architettonico e per la grande durezza (Fig 1.9). I cubetti di porfido sono elementi da pavimentazione di forma parallelepipedica ottenuti per spaccatura meccanica di lastre di porfido il cui spessore varia dai 4 ai 14 cm. Si dividono in cubetti irregolari, il cui spessore



Fig. 1.8 Esempio di pavimentazioni in pietra naturale

Capitolo 1 - Pavimentazioni ad elementi: tipologie costruttive e caratteristiche dei masselli autobloccanti e la faccia a vista presentano irregolarità. Essi vengono solitamente utilizzati per la posa ad archi contrastanti e cerchi concentrici, ed in “misura fissa” 10 cm x 10 cm solitamente utilizzati per la posa a file parallele. Gli spessori fino a 8 cm sono adatti esclusivamente per zone a traffico pedonale leggero mentre per utilizzi più intensi come zone ad alto traffico pedonale o per traffico veicolare é necessario utilizzare spessori molto maggiori. il vantaggio é la grande durezza superficiale e complessiva che permette una forte resistenza all’ usura della superficie della pavimentazione.

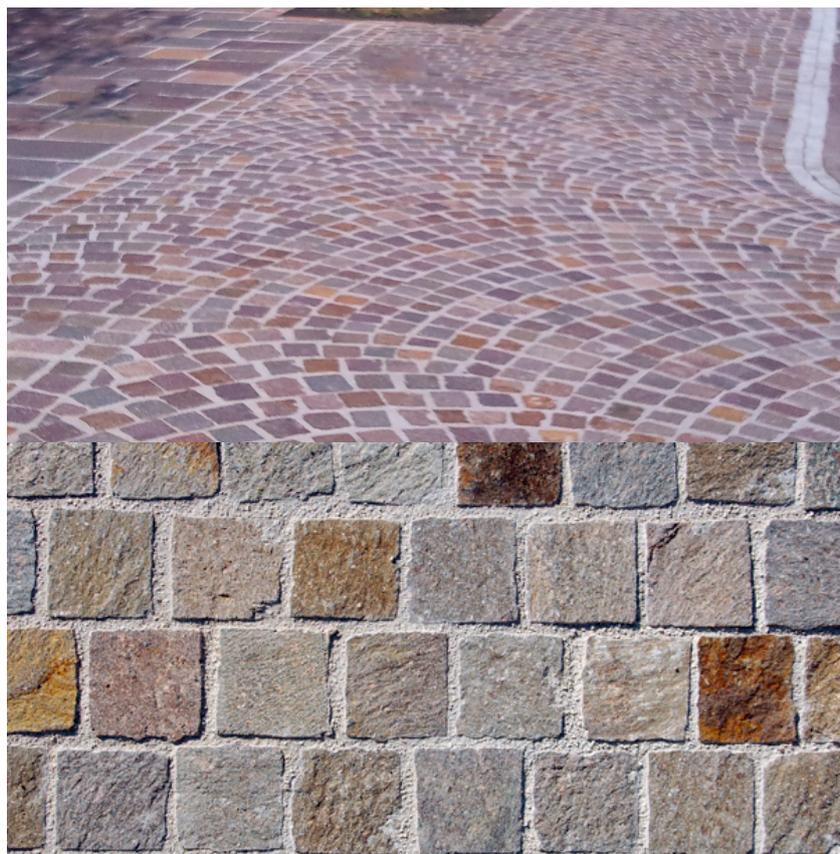


Fig. 1.9 Pavimentazioni in cubetti di porfido, in alto a archi contrastanti in basso a file parallele

1.3 Conclusioni

Abbiamo visto quanti tipi di masselli in cls ci sono in commercio e forse nemmeno tutti , abbiamo accennato alle loro caratteristiche e al loro impiego più razionale , alla loro costituzione fisica , alla loro forma , alla loro facilità di impiego e sostituzione parziale anche di piccole quantità e solo nel punto del difetto e infine alla loro presentazione estetica .E’ stato sottolineato un loro particolare pregio: la porosità che consente di ottenere pavimentazioni drenanti con tutti i benefici le cui caratteristiche sono state sviluppate nei capitoli a seguire. Una particolarità molto apprezzata è quella del massello grigliato che consente la crescita erbosa e quindi anche il consolidamento spondale di canali con un impatto ambientale visivo contenuto. Un accenno è stato fatto anche per i

Capitolo 1 - Pavimentazioni ad elementi: tipologie costruttive e caratteristiche dei masselli autobloccanti masselli in argilla e per quelli in pietra naturale in particolare quelli in porfido largamente usato .

Particolare attenzione sarà posta nello studio delle pavimentazioni nel capitolo appositamente redatto per evidenziare le loro prestazioni tecniche di resistenza meccanica , chimica e fisica, di durabilità , di manutenibilità , di facile lavorabilità, di eco-compatibilità , di basso impatto ambientale e soprattutto di scarsa obsolescenza fisiologica. In definitiva si qualificano come materiali moderni e innovativi per l'economicità e uniformità nei processi produttivi .

Capitolo 2 - Funzionamento e installazione delle pavimentazioni in masselli

2.1 Premessa

Questo capitolo studia il comportamento delle pavimentazioni in masselli in funzione della loro forma e posa sullo strato di base, di fondazione e di sottofondo secondo la fatica a cui la pavimentazione è sottoposta, a questo scopo si addentra all'esame delle cause che producono deformazioni e di conseguenza delle modalità per contrastarle; studia i vari schemi e le modalità di posa. Verifica la necessità del contenimento della pavimentazione e propone diversi tipi di cordoli atti allo scopo e la difesa dei manufatti contenuti nella pavimentazione come le caditoie e tombini. Prende in esame la stratigrafia di quanto necessario alla stabilità dell'opera quindi rende edotti della forma del pacchetto costituito da usura, collegamento, base, fondazione, sottofondo oltre alla sigillatura dei giunti tra i vari masselli e le tolleranze ammesse tra i masselli stessi in ragione della planarità dell'opera finita. In fine della modalità per il ripristino causato dalla posa di sottoservizi postumi. Il capitolo secondo tratta in modo puntuale su quanto è necessario per un risultato finale soddisfacente.

2.2 Funzionamento delle pavimentazioni in masselli autobloccanti

Una pavimentazione in masselli é una pavimentazione flessibile; essa é composta da uno strato superficiale costituito dai masselli, uno strato di base e di fondazione costituiti da inerti con idonea granulometria e uno strato di sottofondo. Per sottolineare l'affinità dei tipi di sovrastrutture si può notare come le ormaie che si creano in una pavimentazione in masselli siano essenzialmente simili a quelle di una pavimentazione flessibile in conglomerato bituminoso, si evidenzia quindi che le rotture della pavimentazione si manifestano prima di tutto attraverso la deformazione della stessa causa del cedimento degli strati sottostanti come avviene per altre pavimentazioni; rotture, fessurazioni e dislocamenti dei masselli sono più rari e sono imputabili a impatti o ad errata posa degli stessi. Prove di carico con piastra [1] hanno dimostrato che le pavimentazioni in masselli distribuiscono i carichi in aree più grandi rispetto a sovrastrutture di conglomerato bituminoso di spessore analogo e che masselli di spessore maggiore lo distribuiscono meglio rispetto a spessori minori. Il funzionamento delle pavimentazioni ad elementi si basa sul concetto di "ingranamento" che possiamo definirlo come l'impossibilità di movimento di un elemento rispetto a quelli adiacenti, l'obiettivo da raggiungere con la

progettazione del blocco stesso e della posa in opera é quindi l'impedimento del massello posato di effettuare tre movimenti: verticale, orizzontale e rotazionale (Fig. 2.1).

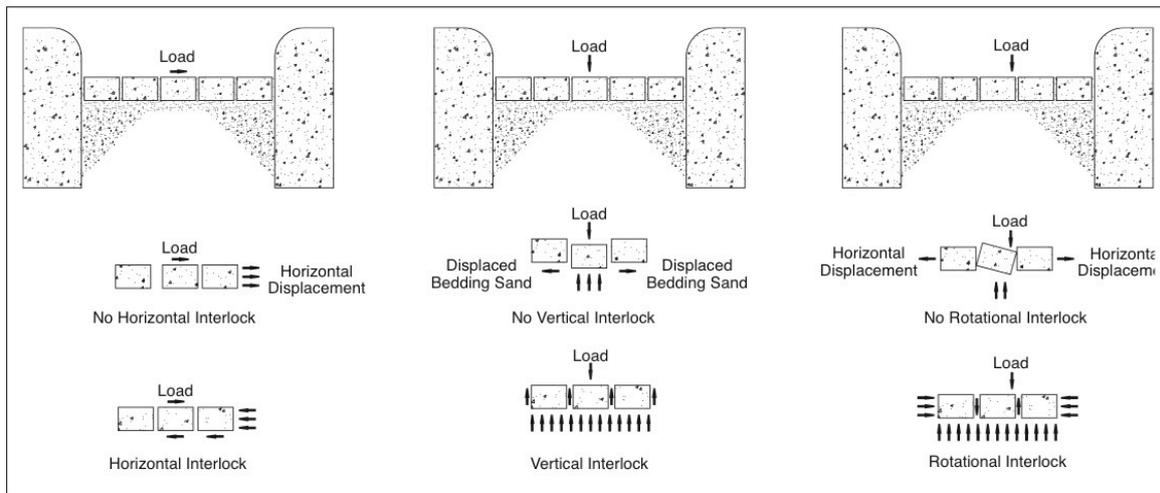


Fig. 2.1 Schematizzazione dei movimenti impediti ai masselli durante l'utilizzo

L'ingranamento verticale viene raggiunto mediante il trasferimento del carico di taglio ai masselli circostanti attraverso la sabbia nei giunti di collegamento. Il bloccaggio rotazionale é demandato allo spessore mentre il bloccaggio rispetto le forze orizzontali avviene attraverso l'uso corretto dei schemi di montaggio che disperdono le forze dovute alla frenatura e all'accelerazione dei veicoli e dagli sforzi tangenziali degli pneumatici in curva. Il montaggio a "lisca di pesce" o "herringbone" si é rivelato rispetto ad altri tipi di installazione quello con maggiore resistenza ai movimenti laterali rispetto ad altri schemi [2]. Sia per i movimenti rotazionali, sia per gli sforzi tangenziali é fondamentale prevedere un bordo di contenimento, che supporterà grande parte del carico come chiarito nei paragrafi successivi. Per l'utilizzo in marciapiedi o zone pedonali é raccomandato uno spessore minimo dei masselli di 50 mm, per le strade e le zone soggette a traffico veicolare leggero lo spessore minimo consigliato é di 80 mm mentre per l'utilizzo in zone industriali dove i carichi sono molto alti 100 mm risulta lo spessore più idoneo. I masselli con rapporto tra lunghezza/spessore maggiore di 4 é bene evitarli in tutti gli utilizzi veicolari, nel caso di traffico leggero é possibile utilizzare quelli con rapporto compreso tra 3 e 4 mentre in caso di traffico intenso e pesante é meglio utilizzare rapporti inferiori al 3, questo per evitare sforzi flessionali del massello e garantirne il bloccaggio rotazionale.



Fig. 2.2 masselli con forma irregolare

Intuitivamente i masselli con forme diverse dal normale rettangolo (Fig 2.2) offrendo una maggior superficie verticale a contatto tra di loro dovrebbero avere una azione di ingranamento maggiore, una verifica di questa affermazione é stata fatta attraverso uno studio su pavimentazioni esistenti e incrociate con i dati di traffico [3] ha concluso che effettivamente non ci sono differenze tra la semplice forma rettangolare e le altre; più tardi sia Kupers (1984) e Knapton (1985) hanno affermato, basandosi su studi effettuati su pavimentazioni industriali che i masselli rettangolari avevano prestazioni superiori rispetto a quelli “con forma”. Altri studi successivi effettuati da Sharp e Armstrong trovarono che non c'erano differenze in performance tra i due disegni. Nonostante le divergenze tra le opinioni riguardo la forma migliore rimane condiviso che l'unico schemi capace di resistere a carichi intensi nei blocchetti parallelepipedi é quello a “spina di pesce” mentre l'incidenza del schemi di installazione in quelli di forme diverse sembra essere minore (Fig 2.3).

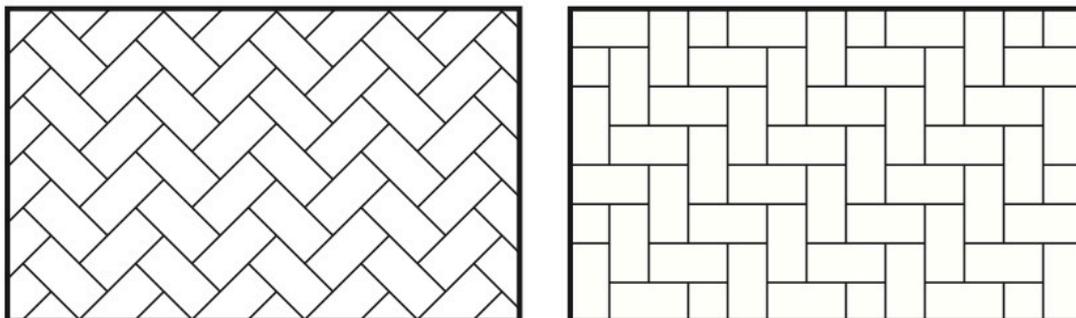


Fig. 2.3 Schemi di posa a spina di pesce o herringbone

2.2.1 Ruolo del bordo di contenimento

I bordi di contenimento sono una componente fondamentale nella struttura delle pavimentazione ad elementi autobloccanti (fig. 2.4).

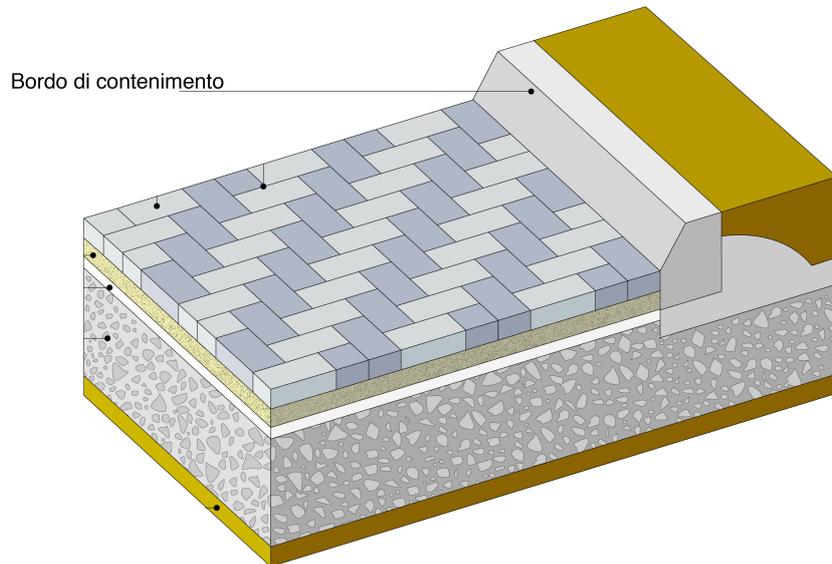


Fig. 2.4 Bordo di contenimento

Essi mantengono l'ingranamento dei masselli evitando il loro movimento a seguito degli sforzi tangenziali del traffico, essi vanno studiati per essere stabili sia a seguito degli sforzi indotti, sia delle variazioni termiche dovute al gelo e disgelo. I bordi di contenimento sono richiesti sia lungo il perimetro della pavimentazione sia nei bordi lungo i cambi di schemi, sia per quanto riguarda il disegno sia la direzione di stesura. Al fine di ottenere una maggior resistenza alle forze orizzontali e diminuire gli spostamenti è necessario posare gli elementi di bordo con un opportuno getto di cls e interrare gli elementi contenitivi. È possibile anche utilizzare bordi di alluminio opportunamente fissati al terreno attraverso paletti.

Bordi di cemento prefabbricato o pietra tagliata profondo

Generalmente questo tipo di bordo ha misure tali da potersi estendere fino al sottofondo, esso permette il contenimento dello strato di base; la sua installazione va effettuata all'inizio della formazione della pavimentazione. Per maggiore stabilità è consigliato un getto di cls di rafforzamento (Fig 2.5),

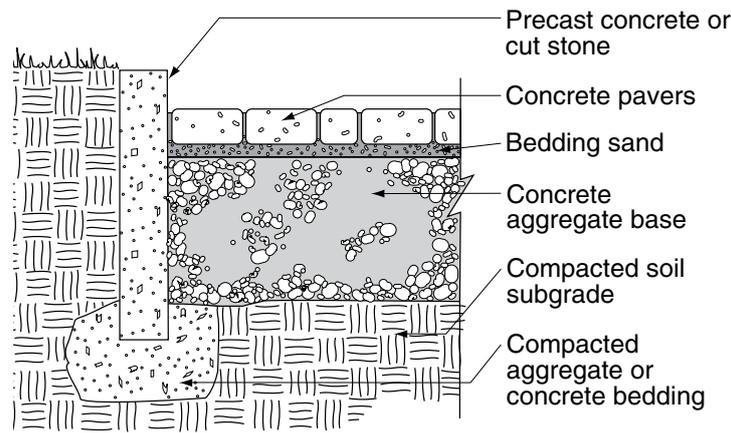


Fig. 2.5 Sezione rappresentante un bordo in cls profondo

Bordi di calcestruzzo prefabbricato o pietra tagliata ad altezza ridotta

Per usi residenziali o pedonali, comunque non particolarmente pesanti è possibile utilizzare bordi meno profondi dei precedenti con il vantaggio del minor costo e della più facile messa in opera; rimane indispensabile un riempimento posteriore di cls per contrastare le spinte orizzontali e diminuire gli spostamenti (Fig 2.6). [4]

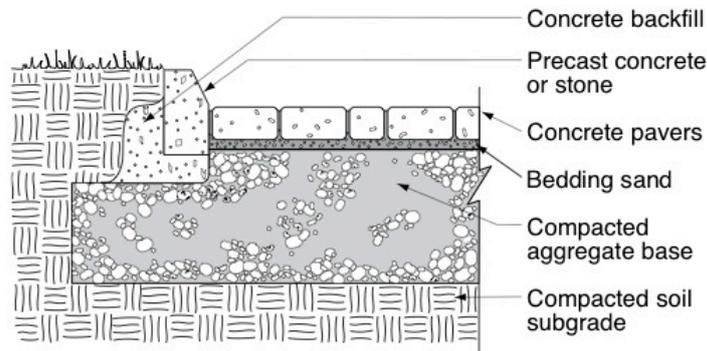


Fig. 2.6 Sezione rappresentante un bordo gettato in opera

Bordi di materiale plastico

I vantaggi sono la facilità di posa in opera e la grande resistenza agli agenti esterni quale acqua e cicli di gelo/disgelo, possono essere utilizzati sia in ambito residenziale che commerciale, importante come nei precedenti è la corretta installazione, la quale va effettuata mediante appositi chiodi che devono penetrare fino agli strati di base, questi bordi devono essere specifici per le pavimentazioni in masselli e non sono adatte soluzioni differenti come bordi per giardino che non garantiscono sufficiente tenuta (Fig. 2.7) [4]

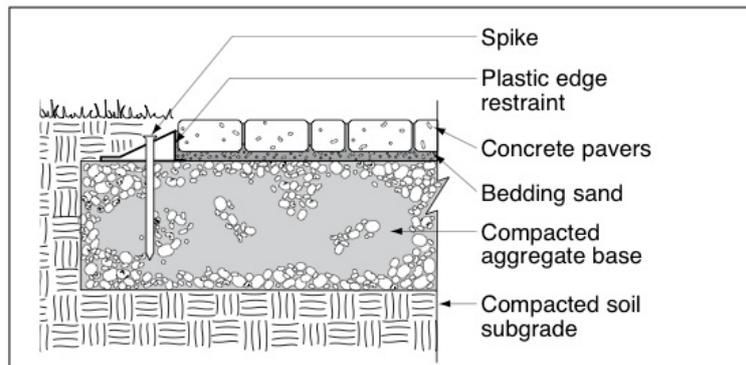


Fig. 2.7 Sezione rappresentante un bordo in materiale plastico

Bordi in alluminio e acciaio

Permettono di essere facilmente occultati grazie al loro ridotto spessore, il quale va comunque considerato in fase di progettazione al fine di scegliere il più adatto in base ai carichi che la pavimentazione deve sopportare; come quelli in plastica essi vanno fissati attraverso appositi chiodi che devono essere infissi all'interno dell'aggregato di base ma non devono penetrare nel terreno (Fig 2.8). [4]

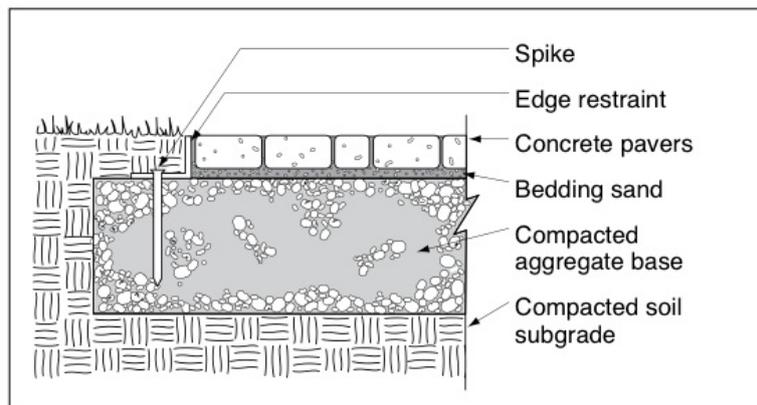


Fig. 2.8 Sezione con bordo metallico

Bordi gettati in opera

Questi possono svolgere solo la funzione di bordo di ritenzione oppure possono essere conformati come scoline; le loro dimensioni devono essere tali da protrarsi comunque sotto lo strato di sabbia di allettamento (Fig 2.9).

È possibile costruire bordi in opera non visibili, per questo si può utilizzare la base e il bordo della pavimentazione come cassera, facendo attenzione a lasciare sufficiente spazio nella parte superiore per consentire la ricopertura di terra e uno spessore sufficiente alla crescita dell'erba; in questi casi bisogna considerare però che la pavimentazione perde il vantaggio di essere immediatamente utilizzabile e necessita del tempo sufficiente all'indurimento del cls stesso. In tutti questi casi è necessario

considerare una larghezza minima del bordo di 15 cm, uno spessore sufficiente per coprire almeno 2/3 dello spessore del blocco e una profondità oltre lo strato di allettamento di almeno 5 cm all'interno dello strato di base, è consigliata una armatura metallica. D'altra parte però il vantaggio consiste nel fatto che possiamo avere una continuità strutturale nel cordolo stesso, una maggiore rigidità e un rischio minore di movimento soprattutto dove la contropinta del terreno a tergo è minore a causa del tipo di terreno stesso o dalla conformazione geometrica. [4]

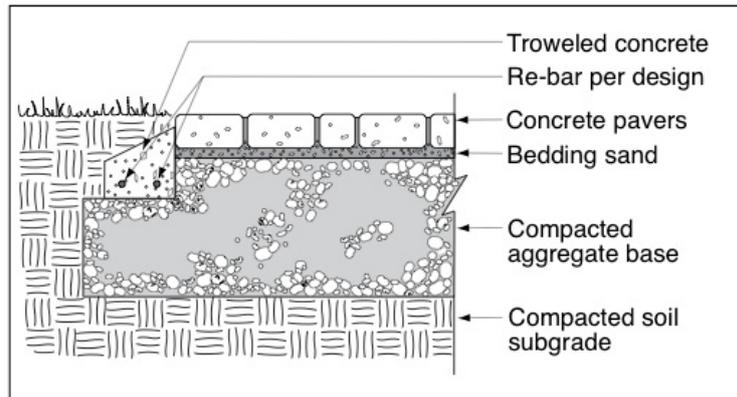


Fig. 2.9 Bordo gettato in opera con armatura

Anche la compattazione del pavimento mediante vibrazione va effettuata quando il cls raggiunge una certa durezza, rimane comunque necessaria una certa cura per evitare la rottura dei bordi dello stesso o il distacco dei blocchetti cementati. In questo caso nel periodo che passa tra l'installazione dei blocchetti e la compattazione degli stessi è necessario coprire la pavimentazione stessa in modo da evitare che la pioggia possa saturare o far uscire la sabbia dei giunti rendendo impossibile una efficace compattazione, rendendo necessaria la rimozione dei masselli stessi.

Bordi non visibili

Un modo per creare un bordo non visibile è quello di costruire un cordolo avente come quota superiore quella della sabbia di allettamento e fissare sopra di esso gli stessi masselli usati per la pavimentazione.

Al fine di garantire una resistenza agli sforzi tangenziali di notevole intensità, cicli di gelo e disgelo e la presenza di sali (antighiaccio) è necessario utilizzare per il fissaggio malte rinforzate con additivi acrilici oppure resine epossidiche ad alto modulo, anche in questo caso è necessario posare il cordolo su una base di aggregato opportunamente compattato; questa soluzione è corretta per le pavimentazione soggette ad un volume medio basso di traffico, in caso di alti volumi o traffico pesante non può comunque

garantire una sufficiente resistenza nel lungo periodo per via delle discontinuità tra i materiali del cordolo (Fig. 2.10)

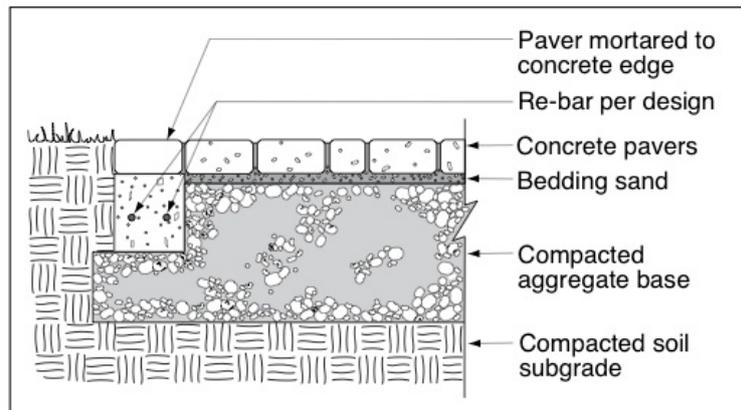


Fig. 2.10 Bordo nascosto con massello contenitivo

2.2.2 Tombini e pozzetti

E' necessario che all'atto della posa in opera di pozzetti e tombini siano dotati di un cordolo di contenimento al fine di evitare la rottura causata dalla spinta dei blocchetti, onde di evitare la rottura da parte degli spazzaneve é necessario che siano installati almeno 5-6 mm al di sotto della quota finale della pavimentazione. É utile soprattutto nei primi tempi dalla avvenuta posa della pavimentazione drenare l'eccesso di acqua dagli strati di base, é necessario quindi lasciare dei fori di drenaggio nel cordolo di contenimento del pozzetto alla quota più bassa dello strato di base di almeno 25 mm (Fig. 2.11). [4]

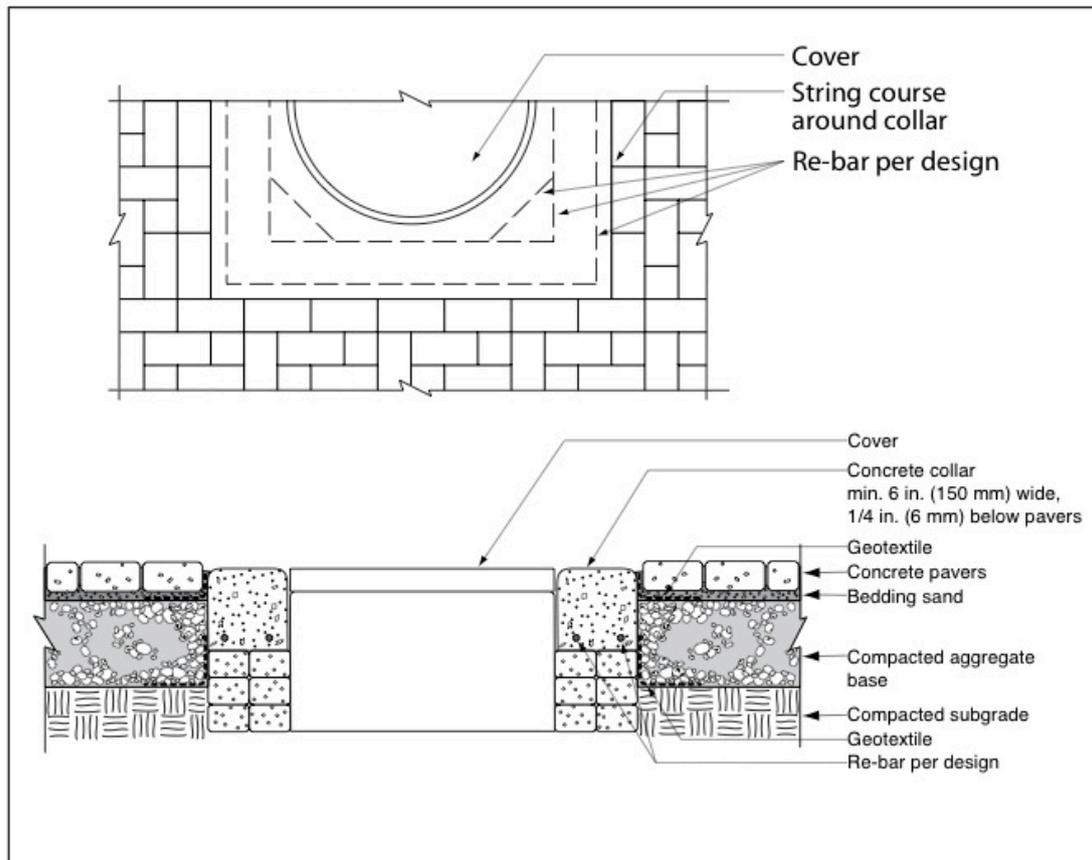


Fig. 2.11 Sezione corretta di una caditoia in pavimentazione a masselli

La parte del pozzetto confinante con gli strati di base deve essere inoltre opportunamente rivestita con idonei geosintetici che permettano la filtrazione dell'acqua e evitino la dispersione porzione fine degli aggregati della base; questi dettagli del drenaggio sono molto utili per evitare fenomeni di pumping nelle zone limitrofe al pozzetto. Nelle parti di pavimentazioni a masselli utilizzate come scoline i masselli vengono posati su uno strato impermeabile (generalmente il canale in cemento o su un letto di bitume/neoprene) con malte modificate o adesivi polimerici in grado di resistere ai cicli di gelo/disgelo e a i sali antighiaccio. [4]

La sabbia all'interno dei giunti nelle zone soggette ad acqua canalizzata, poiché é soggetta ad asportazione durante il deflusso dell'acqua necessita l'utilizzo di additivi idonei oppure la miscelazione a secco con cemento al 5%.

2.3 Posa in opera della pavimentazione

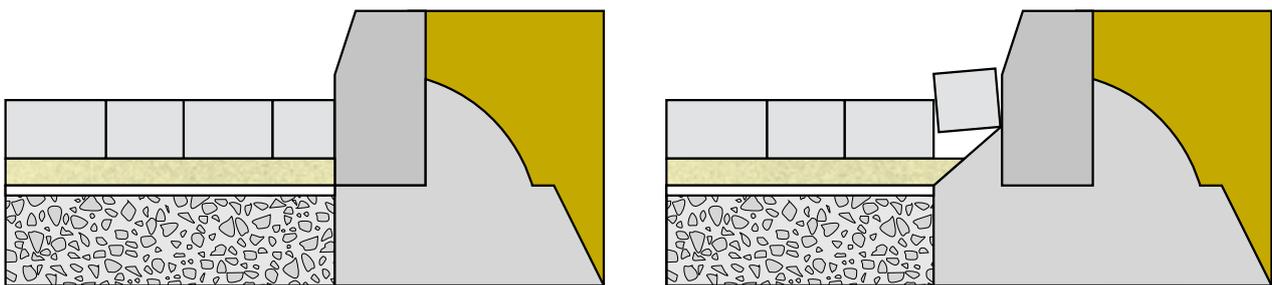
la resistenza e la durevolezza della pavimentazione dipende oltre che da una corretta progettazione, anche da una attenta posa in opera. La prima fase consiste nella compattazione del terreno di sottofondo con mezzi adeguati, particolare attenzione dovrà essere posta nelle zone limitrofe ai bordi, pozzetti, caditoie nelle zone di riempimento degli scavi di tubature e impianti; nel caso non si rispettino i minimi garantiti in fase progettuale si dovrà procedere alla sostituzione del terreno con materiali più idonei. [5]

2.3.1 Piano di posa

La pendenza del piano di posa va verificata poiché é da considerare che non é possibile ricavare le pendenze dagli strati di base o da quello di allettamento. Per favorire il deflusso delle acque ed evitare il precoce cedimento della pavimentazione non devono mai essere realizzate con pendenza minore dell' 1,5%. Le tolleranze massime ammissibili per il piano di sottofondo sono di +- 15mm; i manufatti devono essere posti al livello della pavimentazione finita prima dell'inizio della posa in opera, considerando un calo della stessa per i carichi durante l'esercizio di 3/5mm.

2.3.2 Cordoli

Se non presenti strutture che fungano da contenimento dell'opera (muri, marciapiedi...) é necessario posare i cordoli di contenimento prima della posa in opera della pavimentazione, nel caso invece di cordoli gettati in opera questo può avvenire in un secondo momento. É da tenere in considerazione che il cls di allettamento/rinfranco del cordolo non deve ostacolare la posa dei masselli Fig. (2.12)



SOLUZIONE **CORRETTA**

SOLUZIONE **NON CORRETTA**

Fig. 2.12 Getto di cls di rinfrancamento

lo spazio tra cordoli prefabbricati contigui deve essere tale da evitare la perdita della sabbia di allettamento, se praticamente non realizzabile, si possono sigillare i giunti con malta cementizia evitando la creazione di ostacoli alla posa in opera dei masselli.

2.3.3 Geosintetici

E'opportuno utilizzare opportuni geosintetici durante la posa della pavimentazione, questi svolgono la funzione di separazione fra gli strati e di distribuzione dei carichi (fig. 2.13). Essi devono garantire una sufficiente azione filtrante e una resistenza meccanica che ne garantisca la posa senza subire danni a causa delle lavorazioni successive; generalmente vengono utilizzati tessuti non tessuti.

carichi.

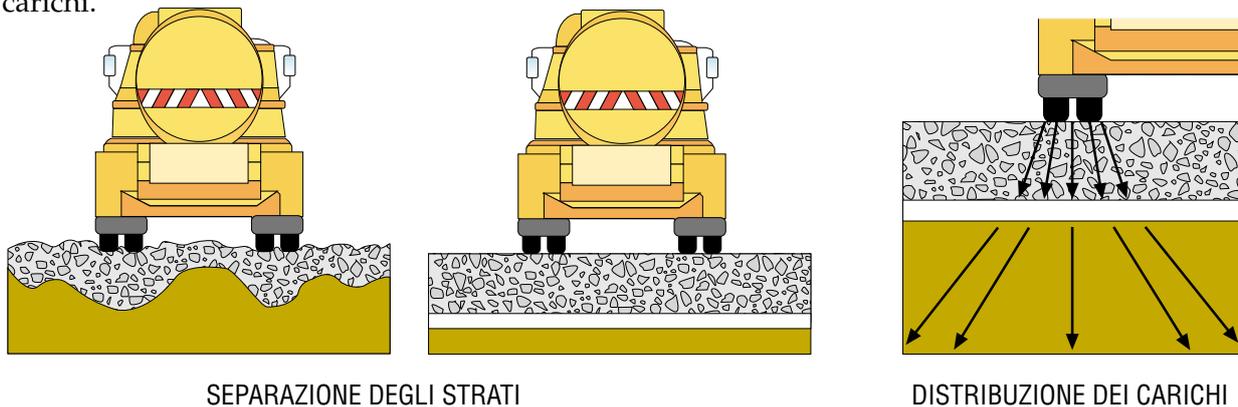


Fig. 2.13 Funzione dello strato di geosintetico

le posizioni in cui é possibile posare il geosintetico sono due (Fig. 2.14):

- Sul terreno prima della costruzione dello strato di fondazione
- Sullo strato di base prima della costruzione dello strato di allettamento

In fase di intervento successivo di manutenzione o scavo, il geosintetico può provocare disagi e difficilmente potrà essere ripristinato in maniera corretta.



Fig.2.14 Posizione del geosintetico

2.3.4 Strato di allettamento

Oltre alla granulometria segnalata in fase progettuale é bene valutare in fase di stesura la condizione di umidità della sabbia stessa; essa dovrà essere uniforme e il materiale non dovrà in ogni caso essere saturo, tale condizione, in particolar modo in presenza di basi non drenanti può portare a fenomeni di pumping con conseguente svuotamento dei giunti. É bene quindi in caso di basi in misto cementizio o bituminose oltre che ad evitare sabbie sature anche a predisporre drenaggi lungo i cordoli nelle zone di quota inferiore. Nel caso si vogliano ottenere allettamenti con rigidzze maggiori é possibile ricorrere a sabbie miscelate con malte cementizie e comunque evitare la tecnica

dello spolvero sullo strato stesso. Lo strato di allettamento dovrà mantenere uno spessore costante considerando in fase di assestamento per effetto anche della compattazione una riduzione di spessore tra il 20% e il 30% in funzione della granulometria utilizzata. Per facilitare il compito e ridurre al minimo l'errore nei livelli vengono stese guide costituite da piattine metalliche. (Fig 2.15)



Fig. 2.15 Staggiatura della sabbia di allettamento

La staggiatura può essere realizzata in due modi:

- Precompattazione
- Metodo classico

La prima si effettua in diversi passaggi: dopo aver steso la sabbia con un idoneo spessore si vibrocompatta con piastra vibrante, si sparge un nuovo spessore di circa 1,5cm e si staggia. Con questo metodo è possibile garantire minori cedimenti in pavimentazioni che devono sopportare carichi elevati, inoltre è possibile in questo modo controllare maggiormente il cedimento finale della pavimentazione.

Nel metodo classico La sabbia viene stesa e staggiata, la compattazione avviene nella fase successiva dopo aver installato i massetti attraverso idonee attrezzature.

E' importante non disturbare il piano di posa dopo la staggiatura, nel caso questa venga rovinata anche in piccole porzioni è necessario provvedere alla sua sistemazione prima della finitura con i masselli, è inoltre importante non eseguire mai queste operazioni in caso di temperature minori di 1°C onde evitare la formazione di ghiaccio.

2.3.5 Posa dei masselli

Mentre per un uso pedonale o ciclabile la posa in opera dei masselli può prevedere qualsiasi schema di installazione, come già anticipato, per carichi intensi è necessario procedere con il disegno a spina di pesce in particolar modo è preferibile uno schema a 45° rispetto alla direzione principale di marcia. Nel caso di masselli non dotati di distanziatori è necessario lasciare un giunto tra essi di almeno 3mm al fine di garantire l'effetto di ingranamento. La posa in opera deve essere condotta in modo tale da evitare l'inserimento forzato dei masselli (fig 2.16).

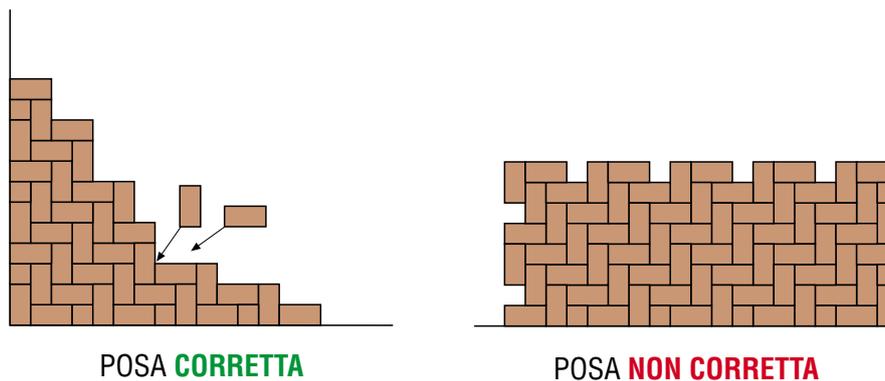


Fig. 2.16 posa dei masselli a fronte aperto

La posa deve avvenire seguendo fili di riferimento posizionati in senso longitudinale e trasversale ogni 4-5 metri. L'installazione dei masselli è possibile anche mediante apposite macchine in grado di prelevare un intero piano di masselli da imballi appositi e di collocarli sul piano di allettamento, i vantaggi di questo tipo di posa sono il minor rischio degli addetti per i minori carichi spostati, la velocità di esecuzione e la costanza nel distanziamento dei giunti. I masselli che non possono essere inseriti integralmente vanno tagliati con apposite attrezzature a spacco o con seghe diamantate; è bene comunque evitare di tagliare masselli in parti minori di 1/3 del totale. Attenzione va posta nelle zone adiacenti a chiusini, caditoie o simili, in fase di progettazione è meglio comunque preferire un tipo di drenaggio a canaletta anziché a caditoia per una maggiore facilità costruttiva (Fig. 2.17). Le sigillature con malta cementizia in prossimità dei manufatti pur essendo esteticamente peggiori possono essere realizzate considerando però opportuni additivi che possano evitare la formazione di fessurazioni dovute ai limitati spessori dell'impasto necessario.

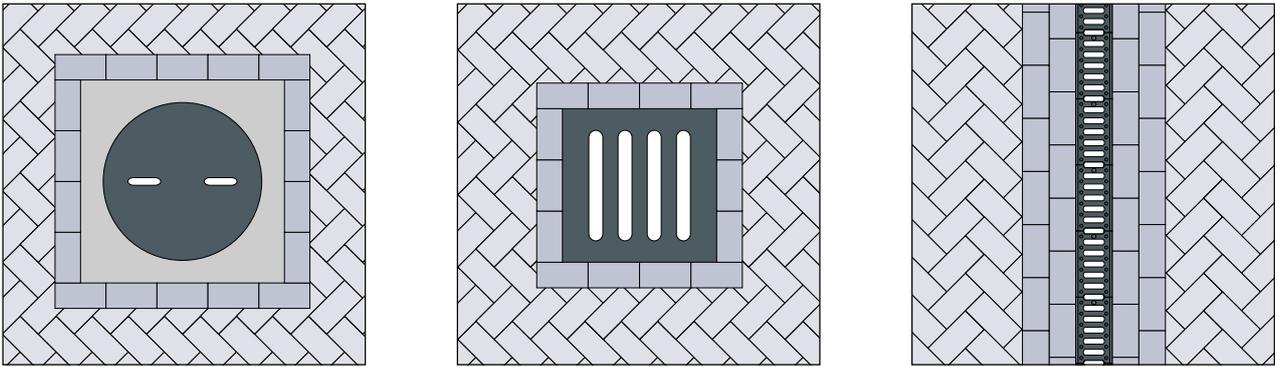


Fig. 2.17 drenaggio a caditoia e a canaletta

2.3.6 Sigillatura e vibrocompattazione della pavimentazione

La stabilità complessiva dell'opera, oltre che da una corretta progettazione dipende dalla posa della stessa e in particolar modo da dalla sigillatura dei giunti. Appena terminata la posa con i tagli di finitura si deve provvedere al pre-intasamento dei giunti con sabbia avente le caratteristiche indicate in fase di progettazione. Il pre-intasamento ha lo scopo di ottimizzare il riempimento dei giunti ed evitare il disallineamento dei masselli sia nella fase di movimentazione dei materiali verso il fronte di posa che durante la vibrocompattazione. Questa fase é eseguita manualmente portando la sabbia sulla pavimentazione e stendendola con appositi strumenti evitando di muovere i masselli durante la stesura. La sabbia deve essere stesa e distribuita in modo omogeneo su tutta la superficie da vibrocompattare. Al termine del pre-intasamento si procede con la vibrocompattazione, essa ha la funzione di allettare i masselli sullo strato di sabbia e garantire un primo assestamento della sabbia nei giunti, è necessario effettuare più passaggi al fine di garantire un uniforme e corretta compattazione. Nel caso di superfici molto ampie in cui si voglia procedere alla compattazione prima della fine di posa dei masselli è bene arrestarsi almeno ad un metro dal fronte di posa; per superfici in forte pendenza é consigliata la vibrocompattazione in senso trasversale dal basso verso l'alto. Le piastre da utilizzare per questa fase (Tab. 2.1) dipendono dal tipo e spessore del massello ed é sempre consigliato onde evitare rotture macchie o graffi di dotarle di tappetino protettivo in materiale idoneo. A seguito di studi effettuati (Rada 1990) utilizzando test di simulazione traffico accelerato si é visto che l'irrigidimento del complesso sabbia di allettamento/masselli avviene generalmente prima dei 10000 ESALs; al fine quindi di accelerare questo processo é possibile programmare la compattazione attraverso un rullo gommato da 8-10 tonnellate, il vantaggio di queste pavimentazioni é che il modulo resiliente a differenza dei conglomerati bituminosi non varia in funzione della temperatura.

Tab. 2.1 Caratteristiche delle piastre vibranti

A parità di forma del massello:	Forza centrifuga KN	Frequenza Hz	Dimensione minima piastra m ²
cm. 4	9 - 11	75 - 100	0,20
cm. 6	14 - 16	75 - 100	0,24
cm. 8	16 - 20	75 - 100	0,24
cm. 10	20 - 24	75 - 100	0,28

In caso di pavimentazioni destinate a grandi carichi (zone industriali, di stoccaggio) é necessario procedere alla compattazione con rulli gommati statici di peso idoneo. L'ultima fase consiste nell'intasamento manuale dei giunti con ulteriore stesura di sabbia. La sabbia deve essere lasciata sulla pavimentazione il più a lungo possibile per permettere un intasamento anche sotto i ripetuti carichi del traffico.

2.3.7 Controlli finali

Al termine della posa é necessario controllare il corretto allineamento dei masselli, l'assenza di danneggiamento degli stessi dovuti a cattiva movimentazione o errata vibrocompattazione, l'ottimale sigillatura dei giunti. É da ricordare che per i primi mesi successivi é necessario un periodico controllo dei giunti e il reintegro con sabbia asciutta nel caso questi si siano vuotati o ne siano carenti. I livelli della pavimentazione finita deve rispettare le seguenti tolleranze (Tab 2.2) rispetto al progetto.

Tab. 2.2 tolleranze delle pavimentazioni in masselli

in generale, rispetto alle quote di progetto	± 6 mm.
planarità della superficie (controllata con staggia da 3 metri)	10 mm.
differenza di spessore tra 2 masselli adiacenti	2 mm.
in corrispondenza di pozzetti, caditoie, canali di drenaggio	+ 6 mm.

2.4 Ripristino di pavimentazioni in masselli a seguito di riparazioni

Quando nasce la necessità di effettuare riparazioni in aree coperte da pavimentazione a masselli, le operazioni di apertura e ripristino della copertura risultano molto più semplici ed economiche rispetto ad analoghe sovrastrutture in conglomerato cementizio o in cemento, un ulteriore vantaggio é la possibilità di poter ripristinare il tutto senza le antiestetiche "pezze" e garantendo, con opportune attenzioni nelle lavorazioni, la resistenza originale della pavimentazione.[4] Tutte le operazioni possono essere effettuate senza martelli pneumatici o attrezzature pesanti, riducendo anche sensibilmente il costo dell'intervento, se si considera anche la rapida messa in servizio della zona soggetta a riparazione e la possibilità di riutilizzare gran parte del materiale rimosso.

Localizzata la zona di lavorazione é necessario procedere alla rimozione dei masselli lasciando 15/30 cm di strato di allettamento non disturbato al fine di fissare bordi metallici o plastici temporanei che possano evitare il movimento dei blocchetti attigui,(Fig. 2.18).

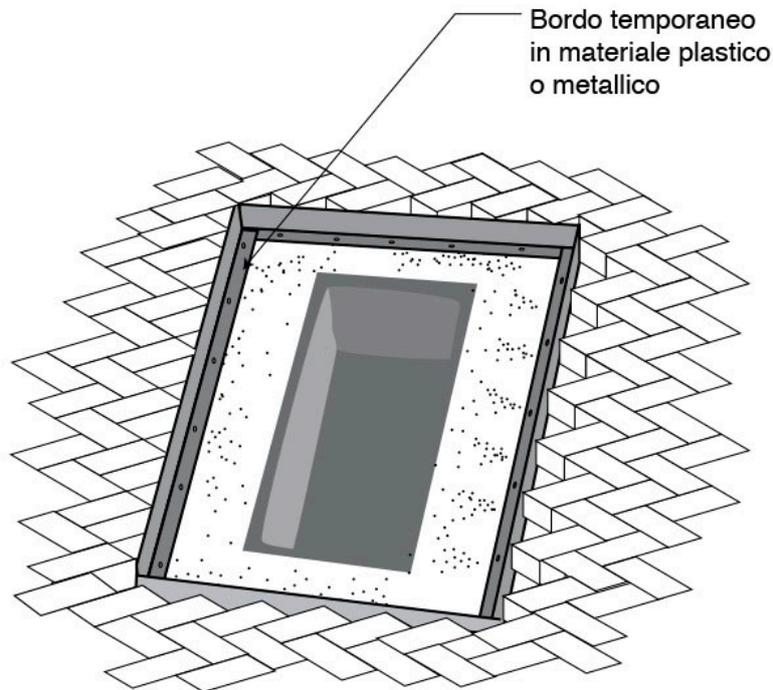


Fig. 2.18 apertura nella pavimentazione

I materiali di risulta possono essere riutilizzati solo nel caso in cui non vengano miscelati durante gli scavi rendendo la granulometria errata per il successivo reinterro, in questo caso é necessario utilizzare inerti nuovi, cercando di adottare tipologie più simili all'originario possibile per avere un comportamento omogeneo della pavimentazione una volta ripristinata.

Il monitoraggio del grado di compattazione degli strati di inerti é essenziale nel ripristino della pavimentazione; solitamente il "dynamic pocket penetrometer" é lo strumento più adatto per questo tipo di verifiche.

Se gli strati risultano troppo secchi durante la compattazione é possibile aggiungere acqua per raggiungere un corretto livello di umidità evitando però la saturazione dell'inerte per evitare i problemi di compattazione. É consigliato raggiungere un 98% della densità secondo la prova Proctor standard per lo strato di fondazione mentre il 98% della densità della Proctor modificata per lo strato di base.

In alcuni casi si possono usare materiali a bassa resistenza controllata (ClSM), al posto degli aggregati di base, questi materiali sono composti da aggregati mescolati con cenere, pozzolane o cemento; il vantaggio di questi materiali é che é possibile inserirli in

posizioni difficili (sotto le tubature, in zone non raggiungibili da compattatori...). Queste miscele richiedono un breve tempo per indurire e possono essere usate anche in climi freddi senza modificare sostanzialmente le proprie caratteristiche, sono inoltre più rigide degli aggregati di base e offrono una maggiore resistenza all'assestamento e all'ormaiamento della pavimentazione. Al fine di rendere comunque facile un possibile futuro intervento, questo tipo di miscele non devono contenere troppo cemento o risultare troppo dure, la resistenza di questi materiali a stagionatura avvenuta non dovrebbe superare i 2MPa.

Alla fine del ripristino degli strati inferiori si può procedere con la posa dei masselli e il riempimento dei giunti; è necessario comunque fare in modo che i masselli lungo il bordo della riparazione siano a 2mm più alti di quelli già posati mentre, al centro dello scavo si dovrebbe arrivare a 5mm a causa del maggior cedimento tipico della zona centrale in seguito alla vibrocompattazione. Per poter raggiungere la compattazione degli strati limitrofi già soggetti a traffico si può procedere con compattazioni più energiche (Tab. 1.1)

2.5 Conclusioni

Dalla esposizione sopra riportata si evince che l'uso di questi tipi di pavimentazione da ottime garanzie di durata nel tempo e cosa importante la possibilità di intervenire per successive pose di sottoservizi senza lasciare traccia superficiale del lavoro eseguito a differenza degli interventi su manto di asfalto.

Pur essendo necessaria una particolare cura e attenzione nella posa dei masselli autobloccanti si può affermare che questo tipo di pavimentazione é comunque economico, é necessario comunque porre attenzione alla scelta del tipo di massello tra il cls e quello naturale valutando attentamente il sito in cui si dovrà posare in quanto il costo del massello in cls rispetto a quello naturale é enormemente inferiore. particolare attenzione deve essere posta quindi sulla miscela di inerti impiegata nell'intasamento degli interstizi tra massello e massello al fine di ottenere il massimo risultato di contrasto ai tre movimenti a cui sono sottoposti : verticale , orizzontale e rotazionale non dimenticando la libertà di percolamento delle acque in particolare per le pavimentazioni drenanti.

Da osservazioni di diversi studiosi sul comportamento dei masselli in opera e sottoposti alle diverse forze prodotte dal traffico hanno dimostrato che non è necessario che abbiano forme strane , ma il comportamento migliore è dato dai masselli parallelepipedi e disposti a "lisca di pesce".

Un difetto importante di una pavimentazione in masselli è quello che non può essere terminata con singoli masselli liberi , ma deve essere contenuta da appositi bordi di contenimento a differenza della pavimentazione in conglomerato bituminoso.

I masselli poi, per loro natura, sono soggetti a trasferire gli sforzi laterali per cui occorre particolare attenzione nella posa a contatto con elementi di completamento delle pavimentazioni quali caditoie ecc che devono essere opportunamente difese.

Capitolo 3 - Ruolo e funzionamento delle pavimentazioni in masselli permeabili e caratteristiche superficiali di aderenza

3.1 Premessa

Con l'espansione dell'urbanizzazione il carico di contaminanti ricevuti dalle acque da parte del traffico veicolare aumenta in modo più che proporzionale. Frequentemente ignorato è anche l'incremento termico che risulta essere un elemento di stress per l'habitat acquatico e l'ambiente a valle delle aree urbane. A causa della maggior attenzione nei confronti della salute dell'ambiente le attuali tecniche per la gestione delle acque meteoriche si stanno muovendo dalle tradizionali vasche di contenimento delle acque di prima pioggia con relativa depurazione alle tecniche di depurazione via infiltrazione in abbinamento al vantaggio del controllo delle quantità e dei tempi di scarico. Anche l'aumento di temperatura delle acque meteoriche è uno dei maggiori effetti delle urbanizzazioni in zone vicino a laghi e fiumi, essa distrugge l'ecosistema acquatico visibile da vari indicatori quali la diminuzione di ossigeno disciolto in acqua. In questo studio viene anche evidenziata l'influenza delle acque derivanti dagli scarichi urbani in questa fase. La concentrazione di sedimenti o sospensioni solide è definita torbidità ed è un altro importante inquinante che viene rimosso o ridotto dalle pavimentazioni permeabili [5]

Le pavimentazioni in masselli oltre ad adattarsi ed a soddisfare attraverso una adeguata progettazione i requisiti richiesti, hanno dimostrato notevoli vantaggi economici soprattutto nella riduzione dei costi di smaltimento delle acque superficiali, consentendo un ridotto impiego di canalizzazioni nel caso in cui l'acqua venga dispersa nel terreno; i costi di costruzione risultano altresì ridotti rispetto ad altre pavimentazioni con simili caratteristiche in relazione alla gestione delle acque e regolamentazione delle stesse.

3.2 Aderenza delle pavimentazioni in masselli

La Resistenza allo scivolamento dei pedoni e resistenza allo scivolamento dei pneumatici sulla strada sono importanti per la sicurezza della viabilità.

Una superficie resistente allo scivolamento è quella che offre un'attrito necessario a garantire l'aderenza in un range molto grande di condizioni. Molte caratteristiche delle superfici e umane influenzano la resistenza allo scivolamento, esse comprendono la tessitura della superficie, il tipo di scarpe, l'umidità, lo sporco sulle superfici, la velocità, lo stile della camminata, la discesa e la salita delle rampe e i gradini.

Le pavimentazioni in masselli autobloccanti in cls offrono caratteristiche superficiali che forniscono resistenza all'usura maggiore rispetto ad altri tipi di pavimentazione.

La resistenza allo scivolamento in condizioni asciutte è approssimata dalla misurazione del coefficiente di attrito statico, esso è definito dal rapporto tra il valore della forza orizzontale necessaria ad iniziare lo slittamento e la forza verticale (Fig. 3.1).

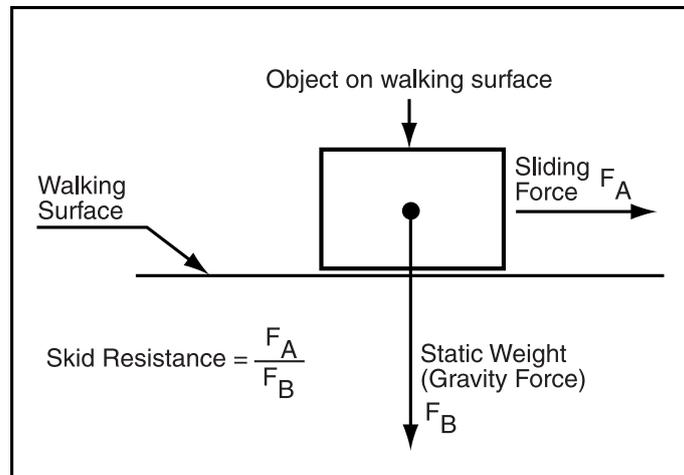


Fig 3.1 schematizzazione coefficiente d'attrito

Il coefficiente di attrito dinamico è il rapporto tra le stesse forze che agiscono su un corpo soggetto a moto rettilineo uniforme. Questi coefficienti sono usati per misurare la resistenza allo scivolamento anche sulle superfici bagnate; bisogna comunque prestare attenzione poiché le misurazioni effettuate sulle superfici in queste condizioni possono essere falsate in varia misura dalla presenza della tensione superficiale dell'acqua che induce una falsa forza di frizione.

Non c'è un solo metodo per la misurazione, ci sono varie metodologie consigliate raccomandate nelle varie pubblicazioni, queste includono " Horizontal pul slipmeter " e il "PT drag sled tester " , l'attrezzatura correntemente raccomandata per la misurazione dello scivolamento è quella dallo ICP statunitense è la "Nist-brungraber tester", esso è costituito da un montante di peso conosciuto incernierato alla struttura, esso aderisce alla superficie da misurare attraverso un pattino rivestito da materiale idoneo. Applicando una forza orizzontale crescente fino allo spostamento dello strumento, il montante assumerà un'inclinazione misurabile attraverso l'apposita scala graduata da cui è possibile ottenere i coefficienti d'attrito.

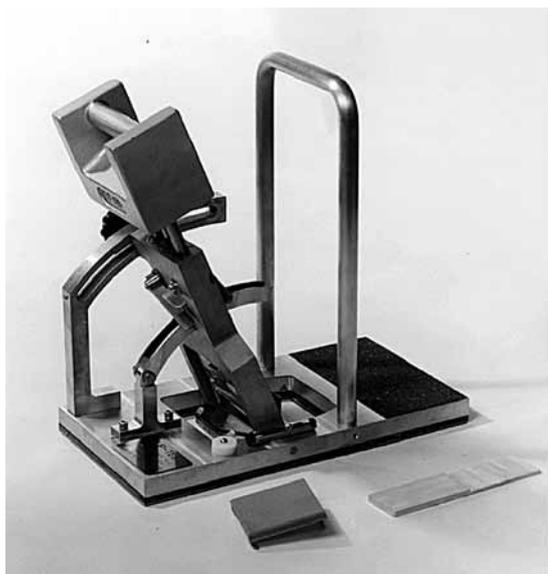


Fig. 3.2 Nist-brungraber tester

3.2.1 Caratteristiche dello scivolamento delle pavimentazioni in masselli

Normalmente per le pavimentazioni in masselli di calcestruzzo non è necessario fare alcun test per lo scivolamento in quanto loro stessi sono costruiti con un alto coefficiente antiscivolamento, questo non significa che, per ragioni volute dalla committenza o dal progettista non si possa fare, in particolare è prudente avere la certificazione per percorsi pedonali e rampe soprattutto per la tutela delle persone diversamente abili.

L'aderenza è particolarmente importante per la sicurezza della viabilità, l'attrito degli pneumatici sulla superficie viabile è influenzato da due fattori riguardanti le caratteristiche della pavimentazione:

Macrotessitura data dall'insieme delle asperità superficiali;

Microtessitura data dalla scabrezza dei singoli elementi lapidei;

La microtessitura nei masselli di cls essa è costituita dagli inerti che compongono il massello, particolare attenzione da parte dei produttori è posta nell'uso degli aggregati nella produzione del massello, che devono essere di struttura cristallina con alta durezza rispetto la scala di Mohs e non solubili agli acidi, permettendo così una migliore resistenza alla "lucidatura" del massello che provocherebbe perdita di microtexture e di conseguenza di aderenza. Essa è responsabile dell'aderenza degli pneumatici per velocità inferiori 40 Km/ora.

La macrotessitura in caso di pavimentazioni in masselli è dovuta ad eventuali disegni superficiali ed è comunque presente a causa della bisellatura o la smussatura arrotondata. Essa è determinabile mediante diverse prove quali l'altezza di sabbia: la prova consiste nello stendere e rasare sulla superficie della pavimentazione un determinato volume di sabbia, in modo da interessare un'area di forma circolare. L'altezza media di sabbia (HS)

si calcola facendo il rapporto tra il volume di sabbia e l'area. La normativa di riferimento in merito all'esecuzione della seguente prova è la CNR BU n. 94 del 15/10/1994. L'eccessiva velocità su pavimentazione in masselli drenanti può causare il "rimbalzo" degli pneumatici provocando un drastico calo di comfort di marcia e coefficiente di attrito.

La presenza di un velo sottile d'acqua pari a 0,05 mm è sufficiente a far diminuire l'attrito; molto importante è quindi l'uso di masselli drenanti porosi al fine di garantire lo smaltimento rapido delle acque.

3.2.2 Test di aderenza su pavimentazioni in masselli autobloccanti

Da studi effettuati e da letteratura in materia risulta che pavimentazioni in masselli autobloccanti prodotti utilizzando materiali controllati possono garantire ottime caratteristiche superficiali per tutta la durata dell'opera.

Lo Skid Resistance Test consente di misurare la perdita di energia dovuta allo strisciamento radente di un pattino gommato montato all'estremità di un pendolo sulla superficie stradale (Fig.3.2). La massa del pendolo è di circa 1.5 kg, la sua distanza dal centro di oscillazione è di 41 cm, il pattino di gomma ha dimensioni 25.4×76.2 mm². Il pendolo viene lasciato cadere da una posizione orizzontale sulla superficie precedentemente bagnata con acqua. Alcuni test effettuati utilizzando il "British Pendulum tester" in diversi paesi riportano interessanti risultati:

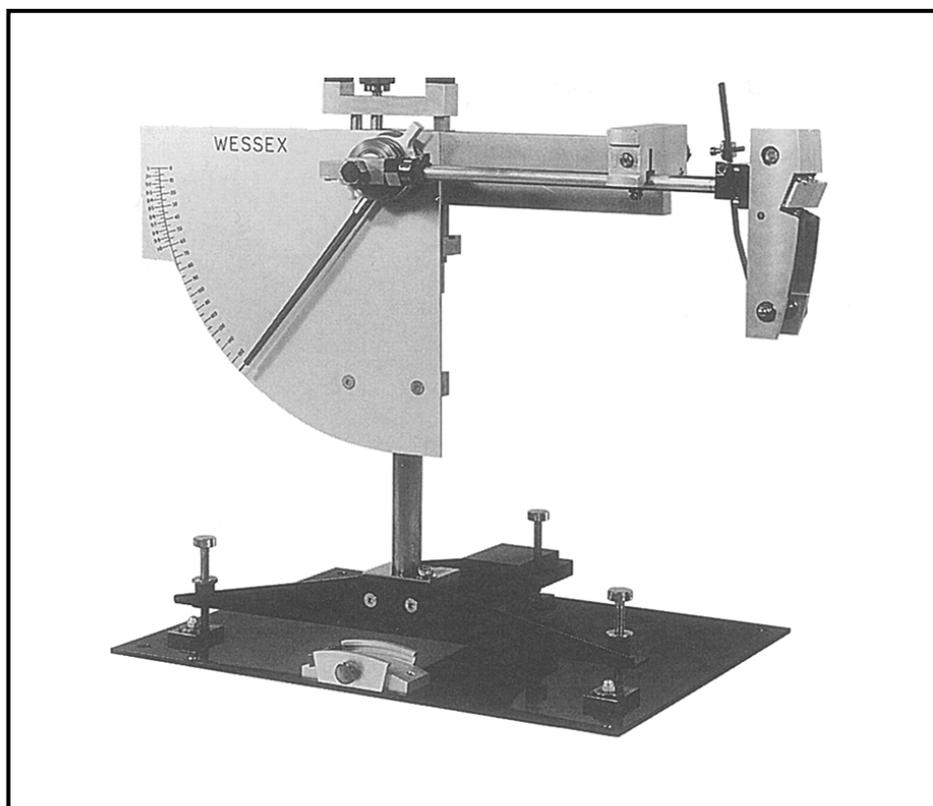


Fig. 3.2 British Pendulum tester

- Misurazioni fatte su una strada per autobus in Durban Sud Africa dopo 17 anni dalla realizzazione hanno riportato valori di BPN con media di 61 con deviazione di standard di 4,3 [6]
- Numerosi test effettuati in varie località in Sud Africa per l'Istituto Nazionale per le ricerche stradali hanno riportato misure in tabella 3.1 [7]

Tabella 3.1 varie misurazioni con British Pendulum

Località	BPN
Strada urbana regolarmente manutenzionata dopo 1 anno dalla posa	46/61
Strada residenziale dopo 8 anni dalla costruzione	54/59
Strada residenziale dopo 20 anni dalla costruzione	41/55
area di sosta e di servizio nei pressi di zone terziarie dopo 3 anni dalla costruzione	52/57
strade secondarie all'interno di giardini botanici con età compresa tra i 3 e gli 8 anni	45/85

- Misurazioni effettuate in Australia in tre lotti di parcheggio soggetti a traffico pesante hanno mostrato un valore di 81 appena posati e dopo tre anni è sceso a 53 ancora accettato dagli standard Australiani [8]
- La comparazione delle performance di pavimentazioni in masselli e asfalto posti in opera nello stesso periodo soggetti a traffico leggero, dopo 12 mesi hanno mostrato valori simili tra loro variabili tra 56 e 59 [9]
- Un test effettuato in Australia su una particolare pavimentazione appena installata ha dato 70 BPN e solo dopo 460 ESALs il valore è sceso a 57 [10]
- Test sperimentali effettuati su una strada di accesso a una zona industriale in Inghilterra della durata di un anno su otto pavimentazioni di produttori diversi hanno mostrato valori variabili tra 44 e 56, questi valori sono da considerare superiori a quelli di strade con le stesse caratteristiche di traffico ma costruite con materiali diversi [11]
- Test effettuati in sette differenti aree di strada inclinata in Danimarca al momento della installazione hanno dato valori tra 49 e 60. [12]
- Sono state effettuate 5 misurazioni per tre velocità 40 - 65 - 80 Km/h su pavimentazioni appositamente posate (Fig.3.3) in strisce di larghezza pari a 60 cm e lunghezza pari a 45 metri usando il metodo di test descritto nella ASTM E74 (Tab 3.2) [13]

Tab 3.2 Valori rilevati con test

sezione di test	velocità (km/h)	SN	Deviazione standard
A	40	51,9	0,5
A	65	46,5	1,1
A	80	400	1,5
B	40	57,2	1,1
B	65	496	3,0
B	80	43,1	0,5

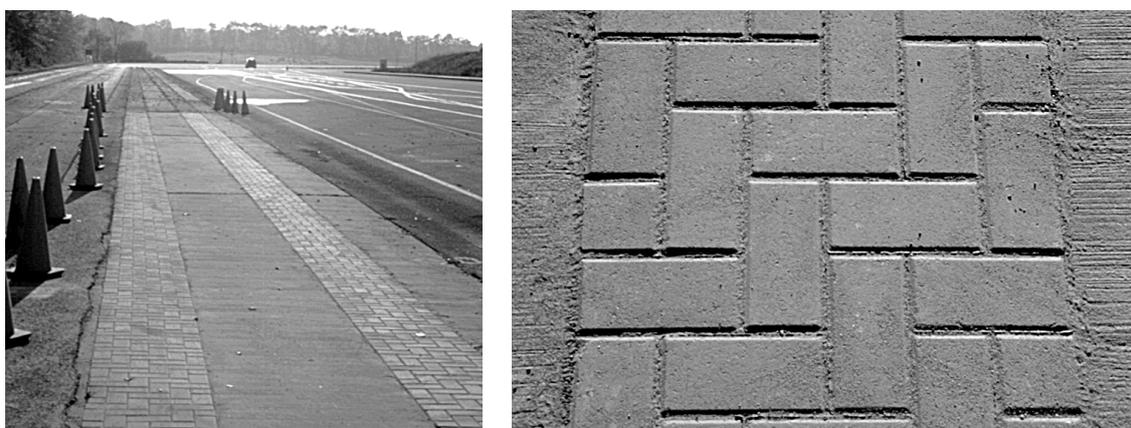


Fig. 3.3 posa di pavimentazione in masselli per test

In Giappone al fine di verificare la sicurezza del traffico su pavimentazioni diverse è stata monitorata, mediante una telecamera ad alta velocità, la distanza di frenatura su una intersezione stradale asfaltata, le stesse misurazioni sono state effettuate dopo la demolizione in quel tratto della pavimentazione in asfalto e la sostituzione con masselli in calcestruzzo; la distanza di frenatura è risultata ridotta nelle varie classi di velocità sia su superficie bagnata che asciutta tabella 3.4

Tab. 3.4 distanze misurate sullo stesso tratto stradale, valori espressi in metri

superficie	20 km/h asciutto	20 km/h bagnato	40 km/h asciutto	40 km/h bagnato	60 km/h asciutto	60 km/h Bagnato
Asfalto	1,7	3,2	5,85	9,6	14,2	26,7
Masselli cls	1,68	2,5	5,23	8,15	13,6	21,3

Un test di paragone [13] effettuato dalla NASA su pavimentazione continua in cls e pavimentazione in masselli autobloccanti sotto un carico di 123 kN a velocità variabili dagli 8 ai 160 Km/h tipica di un Boeing 737 ha dimostrato un valore di attrito nettamente

superiore per i masselli sia in condizioni di bagnato che di asciutto rispetto alle omologhe in cls .

3.3 Inquinanti e effetti sull'ambiente

La chiave per lo studio di una pavimentazione a masselli drenante é la previsione di una sufficiente capacità filtrante dell'opera al fine di permettere che un adeguato flusso di acqua meteorica possa venire filtrato e trattato. Sebbene non sia difficile progettare e costruire sistemi con appropriate capacità filtranti risulta molto difficile il mantenimento di questa capacità negli anni. Nelle aree urbane le strade costituiscono fino al 25% delle superfici non permeabili all'acqua, l'utilizzo quindi di pavimentazioni in masselli permeabili rende la gestione delle acque più semplice e compatibile con le esigenze di un territorio sempre più urbanizzato se spesso con infrastrutture inadeguate allo scarico delle acque meteoriche. [14]

Anche il contenimento dell'inquinamento ambientale é una forte spinta ad utilizzare questo tipo di pavimentazioni: negli Stati Uniti e in altri paesi le autorità danno ampio consenso alle pavimentazioni in masselli nel campo della tutela ambientale a causa delle risultati raggiunti in campo dell'abbattimento degli inquinanti da parte di queste pavimentazioni. I requisiti tipici richiesti in molti paesi per le nuove aree urbanizzate sono:

- Limitazioni per quanto riguarda la quantità di superfici impermeabili;
- Ritenuta in sito delle acque meteoriche;
- Controllo della quantità di penetrazione;
- Gestione della qualità delle acque reflue;
- Misure per la raccolta ed riutilizzo dell'acqua meteorica;

tutto questo legato anche alla possibilità di un corretta gestione nello smaltimento degli eventuali rifiuti inquinanti durante la vita della pavimentazione. gli agenti inquinanti in esse contenuti si depositano soprattutto nei primi 2,5 - 5 cm degli inerti con i quali sono stati riempiti i giunti, il materiale inquinato risulta quindi semplice nella rimozione.

3.4 Idrodinamica nelle pavimentazioni permeabili

Il layout degli strati che compongono una pavimentazione a masselli di tipo permeabile rispecchia quello di pavimentazioni in masselli standard con un diversa attenzione alle granulometrie che li compongono. Nelle Pavimentazioni permeabili viene definita "riserva" (Fig. 2.1) tutto lo strato di inerti a partire dal terreno di sottofondazione fino al livello che raggiunge l'acqua con una certa frequenza; questa sarà calcolata in

funzione del tempo di ritorno dell'evento che ci interessa coprire. Il volume di ritenuta é costituito dal vuoto totale compreso fra gli inerti interessati.

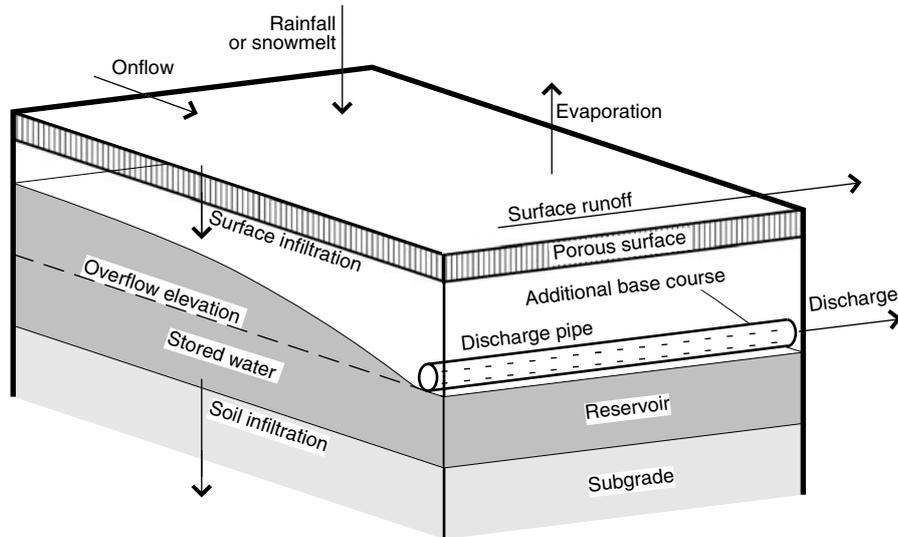


Fig. 2.1 schema idrodinamico di una pavimentazione

L'utilizzo della "riserva" permette uno scarico dell'acqua più lento attraverso tubi di drenaggio laterale; questo tipo di accumulo permette la riduzione della portata di deflusso dell'acqua riducendo sia l'erosione, sia le sezioni dei sistemi drenanti. Dove é necessario lasciare le aree permeabili all'acqua per non modificare gli assetti idrologici della zona oggetto d'intervento é possibile calcolare la "riserva" in modo da far filtrare l'acqua presente nel terreno evitando la formazione di pozzanghere che precluderebbero l'utilizzo della pavimentazione; la "riserva" é quindi il volume necessario al fine di immagazzinare la differenza tra volume di acqua precipitata e quello della stessa infiltrata o drenata nel tempo. L'acqua che passa attraverso gli strati filtranti, della pavimentazione fino agli strati sottostanti subisce un effetto di filtrazione e innesca l'attività dei microrganismi presenti. La dinamica della infiltrazione dell'acqua nella pavimentazione comincia in superficie con le precipitazioni di pioggia o di neve, parte di essa si infiltra attraverso i giunti dei masselli oppure attraverso di essi nel caso che il materiale da cui sono composti lo permetta. La rimanente, la cui quantità é funzione delle caratteristiche superficiali, defluisce e altra acqua arriva dal deflusso dei pavimenti circostanti; superato il primo strato costituito dalla pavimentazione vera e propria le acque attraversano lo strato di allettamento e lo strato di base. Nel caso in cui non sia stata prevista una impermeabilizzazione nel sottofondo, l'acqua si infiltra nel terreno e quella in eccedenza può venire scaricata da appositi drenaggi in modo da evitare lo straripamento e il ritorno in superficie della stessa. La zona di "riserva" trattiene temporaneamente la differenza tra l'acqua in arrivo e quella in uscita.

E' possibile configurare la "riserva" in due modi:

- Riserva drenante;
- Riserva permeabile;

3.4.1 Riserva drenante

Nella figura 2.2 é possibile vedere vari schemi di riserve drenanti, l'acqua meteorica viene completamente drenata attraverso tubi o dreni in un apposito sistema di smaltimento, in questi casi si vuole evitare o eliminare del tutto l'infiltrazione nel sottosuolo, é opportuno quindi utilizzare appositi geosintetici impermeabili tra lo strato di base e il terreno del sottofondo della pavimentazione per evitare completamente il passaggio di acqua ed evitare la contaminazione degli inerti da parte delle particelle del terreno.

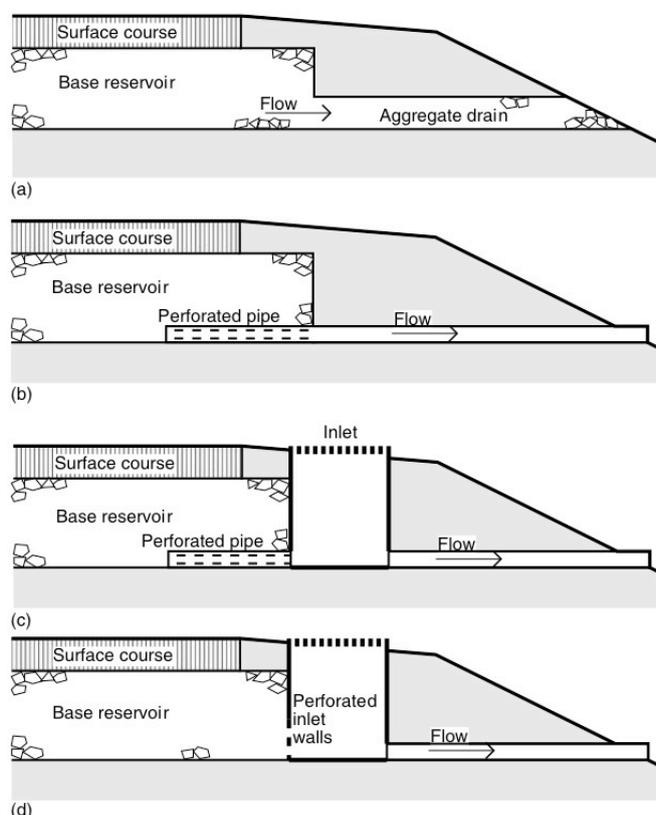


Fig. 2.2 varie tipologie di riserve drenanti

3.4.2 Riserva permeabile

É possibile creare riserve che permettono il normale percolamento dell'acqua nel sottosuolo garantendo comunque, in caso di eccesso di precipitazione, un rapido scarico della stessa in un sistema drenante. In questo caso é necessario utilizzare un geosintetico filtrante che permetta il passaggio dell'acqua ma eviti la contaminazione degli inerti per migrazione delle particelle fini del suolo negli strati superiori (Fig. 2.3).

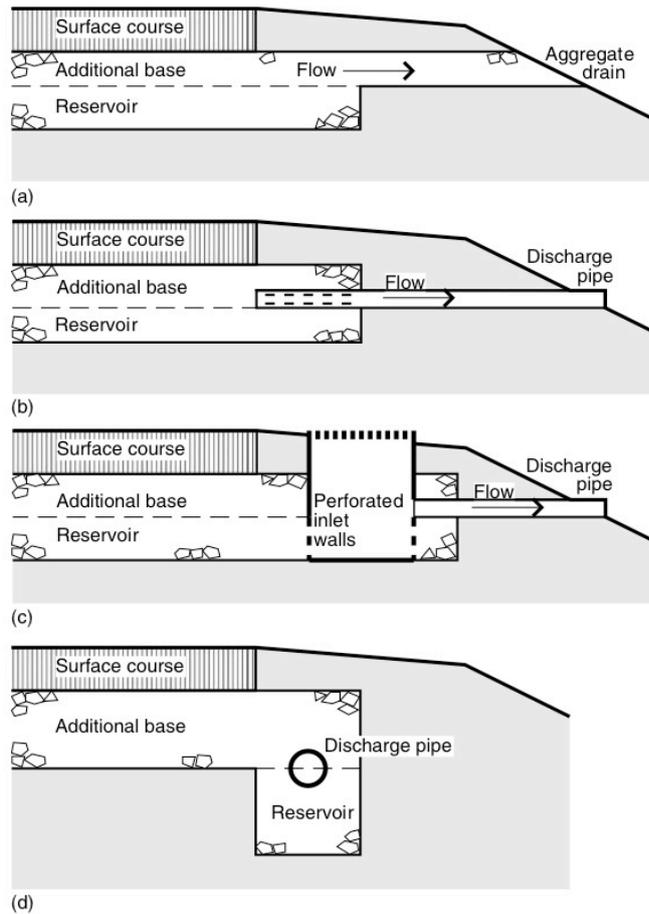


Fig. 2.3 varie tipologie di riserve permeabili

Al fine di dimensionare correttamente gli elementi costituenti la pavimentazione a masselli è opportuno l'utilizzo di modelli matematici che prevedano il comportamento della struttura, questi modelli generalmente assimilano la pavimentazione al terreno considerandone il comportamento idrodinamico e tenendo in considerazione opportuni parametri che ne adattano la reazione. Un modello recente è quello di James, distribuito sotto il nome di PC-SWMM for permeable pavements; esso tiene in considerazione il deflusso superficiale e la profondità di stagnazione nella "riserva".

3.5 Grandezze e coefficienti pavimentazioni permeabili

al fine di poter prevedere il comportamento idraulico della pavimentazione è necessario valutarne alcune caratteristiche in laboratorio o in sito.

3.5.1 Conduttività idraulica satura K

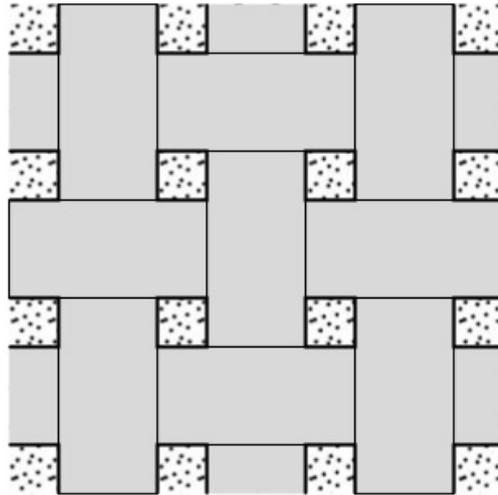


Fig. 2.6 Layout di montaggio masselli

La conduttività idraulica satura é la permeabilità in condizioni sature dell'insieme della pavimentazione, sotto un gradiente unitario in pressione, essa é funzione della porosità del materiale della pavimentazione e degli strati sottostanti ed é espressa in metri/sec o cm/ora.

In laboratorio é possibile stabilire il K anche della sola pavimentazione mediante prove standardizzate ASTM (D2434) D3385 D5093. In caso di layout di posa particolari (Fig 2.6) é possibile determinare K mediante la formula:

$$K_{tot} = K_{solido} \cdot \left(\frac{A_{solida}}{A_{tot}}\right) + K_{fill} \cdot \left(\frac{A_{fill}}{A_{tot}}\right)$$

Dove:

- K_{solido} Conduttività della sola pavimentazione senza vuoti
- K_{fill} Conduttività degli inerti che riempiono le parti vuote
- A_{tot} Area totale della pavimentazione
- A_{solida} Area della sola parte occupata dai masselli
- A_{fill} Area della sola parte occupata dagli inerti

É interessante confrontare il K di alcune pavimentazioni di uso comune (Tab 3.1)

Tab. 3.1 K per varie superfici

Tipo di superficie	K m/s	K cm/h
Aggregato 2,5 cm	0,34	125000
granulometria da 0,2 a 2 mm	$1,6 \cdot 10^{-3}$	3250
masselli su limo (10 anni)		0,5 - 2,5
Masselli OpenJointed riempimento sabbia 0,2-0,5 appena posto in opera		23
Masselli OpenJointed riempimento sabbia 0,2-0,5 dopo 6 anni		10
Griglie a celle aperte con riempimento 2/5mm dopo 1 mese dalla posa		23
Griglie a celle aperte con riempimento 2/5mm dopo 2 anni dalla posa		16
Griglie a celle aperte con riempimento 2/5mm dopo 4,5 anni dalla posa		12
Griglie a celle aperte con riempimento 2/5mm dopo 8 anni dalla posa		10
Griglie a celle aperte con riempimento 1/3mm dopo 2 anni dalla posa		12
Griglie a celle aperte con riempimento 0/2mm dopo 2 anni dalla posa		7
cls Poroso non vibrato in fase di posa		2250
cls Poroso vibrato in eccesso in fase di posa		5 - 60
Asfalto poroso appena installato		425 - 1250
Asfalto poroso dopo 4 anni dall'installazione		4 - 60

Nel comparare le superfici di interesse che risultano utilizzate in casi simili, si può notare che sebbene al momento iniziale della messa in opera le prestazioni dell'asfalto poroso risultino superiori con punte di oltre 1250 cm/h contro i 23 cm/h dei masselli, dopo 4 anni l'asfalto a causa dell'intasamento dei pori perde le sue prestazioni arrivando fino a 4 cm/h contro i 12 dei masselli stessi. Questo parametro è da considerare nei casi in cui l'uso dei masselli sia possibile (strade con velocità di percorrenza minori di 70 km/h). Si noti inoltre che i valori riportati tengono in considerazione il solo strato della pavimentazione tralasciando gli strati inferiori.

3.5.2 Coefficiente di Dilavamento (Runoff)

Le gocce di pioggia caduta possono non venire assorbite direttamente ma subire una sequenza di rimbalzi sulla superficie e creare un deflusso. Il rapporto fra la massa d'acqua precipitata che non viene assorbita dalla pavimentazione e quella che viene assorbita è definito coefficiente di dilavamento. Esso può essere misurato direttamente in sito o in laboratorio attraverso getti d'acqua che simulino una normale pioggia, è anche funzione dell'intensità dell'evento meteorico stesso e dell'inclinazione della pavimentazione. Il

coefficiente di dilavamento incide indirettamente sulla reale capacità di drenaggio del pavimento stesso; osservazioni effettuate su un asfalto poroso in una pavimentazione già in opera che presentava una conduttività idraulica satura di 42 cm/h , hanno dimostrato che piogge di intensità molto inferiore (9 cm/h) creavano comunque un deflusso delle acque. Valutando solo il coefficiente K la pioggia sarebbe dovuta essere totalmente assorbita. (Tab 3.2).

Tab. 3.2 Test effettuato su una pavimentazione reale

Conduttività idraulica satura K (cm/h)	42
Coefficiente runoff durante un evento meteorico di 9 cm/h	0,29
infiltrazione reale durante l'evento (cm/h)	6,25

I masselli autobloccanti presentano un coefficiente di dilavamento di 0,3 - 0,5, superiore agli asfalti porosi, questo dovuto anche alla loro minore rugosità superficiale. (Tab 3.3)

Tab. 3.3 coefficienti di dilavamento su superfici comuni

Tipo di superficie	Coefficiente di dilavamento
Aggregati, varie granulometrie	0,3 - 0,7
Masselli OpenJointed con riempimento di aggregato 2-20	0,3 - 0,5
Masselli a Celle aperte tipo "ChecherBlock" con terreno inerbito	0 - 0,27
Masselli a celle aperte tipo "Turf" terreno sabbioso con erba tipo "Bermuda"	0.18 - 0.36
Masselli a celle aperte tipo "Turf" terreno torboso con erba tipo "Kentucky"	0 - 0,56
Asfalto Poroso appena posato	0.12 - 0.40
Asfalto Poroso dopo 3 anni dalla posa	0,18 - 0,29
Asfalto non poroso	0,73 - 0,95

In casi in cui é bene evitare il più possibile flussi di acqua e l'installazione lo permette si possono utilizzare le pavimentazioni grigliate in masselli, la presenza di una ampia superficie erbosa permette un forte ritenzione delle gocce attestandosi su valori di dilavamento su masselli a celle aperte tra 0 e 0,27.

3.5.3 Tempo di corrivazione

Durante un determinato evento meteorico, il picco della portata del flusso di dilavamento che raggiunge la parte più bassa della pavimentazione e quindi i sistemi atti alla captazione delle acque, é influenzato dalla velocità del flusso attraverso la superficie e

le distanze che esso deve percorrere. In molti modelli idrodinamici la velocità dipende dal tempo di corrivazione: esso é il tempo che impiega la goccia che cade nel punto più lontano ad arrivare alla sezione di bocca del bacino, nel nostro caso gli elementi captanti. Il picco della portata di deflusso aumenta con l'aumentare della velocità quindi con il diminuire del tempo di corrivazione.

Il tempo di corrivazione sulle pavimentazioni porose può essere calcolato per via teorica applicando opportuni modelli matematici. Un modello di calcolo di semplice utilizzo é quello che deriva dalla equazione di Manning:

$$T_c = \frac{0,007 \cdot (nL)^{0,8}}{[(P_2)^{0,5} s^{0,4}]}$$

dove:

- T_c = tempo di corrivazione;
- n = Coefficiente di Manning;
- L = lunghezza del percorso;
- P_2 = pioggia in 24 ore con tempo di ritorno di 2 anni, flusso superficiale;
- s = pendenza della superficie;

E' interessante valutare i vari valori del coefficiente n e la loro incidenza sui tempi, le superfici delle pavimentazioni porose, soprattutto se vegetate, permettono un aumento notevole del coefficiente n , aumentando così il tempo di corrivazione e il picco del flusso di dilavamento che é necessario smaltire. Per molte pavimentazione porose non presenti in tabella possiamo desumere valori intermedi di n tra le pavimentazioni non porose e quelle inverdite (Tab. 3.4).

Tab. 3.4 Coefficienti di Manning per varie superfici

Tipo di superficie	N
Pavimentazione con erba tipo "Bermuda"	0,41
Pavimentazione con erba di altro tipo	0,24
Pavimentazione a masselli openjointed	0,03
Pavimentazione in cls o asfalto	0,01

Un secondo fattore rilevante all'interno della equazione é la quantità di flusso di dilavamento sulla superficie espresso da P_2 , se lo "spessore" del flusso di dilavamento é basso, generato quindi a parità di evento meteorico da un runoff basso, la parte a contatto

con le asperità della pavimentazione sarà maggiore quindi avrà maggiore difficoltà nello scorrere aumentando così il tempo di corrivazione.

Immettendo tali valori nella formula ed utilizzando anche i relativi coefficienti di dilavamento si può verificare che una pavimentazione porosa può quadruplicare il tempo di corrivazione rispetto ad una tradizionale.

3.6 Trattamento delle acque e inquinanti

La dimensione delle pavimentazioni stradali e la quantità di veicoli che le usano, rendono queste superfici una parte importante nel fenomeno dell'inquinamento in ambito urbano. Su pavimentazioni impermeabili il deflusso superficiale trascina gli inquinanti non trattati direttamente nell'ambiente. Quando una pavimentazione ha accumulato inquinanti durante un periodo di secco, essi tendono ad essere maggiormente concentrati durante il dilavamento dovuto alla prima pioggia. Le pavimentazioni porose permettono il trattamento dell'acqua durante la fase di infiltrazione e stoccaggio nei vari strati costituenti. In generale, le pavimentazioni permeabili si comportano come filtri nel trattamento di oli, particolato e vari inquinanti durante il normale uso; questi trattamenti includono la separazione delle particelle solide e negli strati sottostanti, permettono la degradazione biochimica degli oli da parte dei micro organismi ivi stabiliti. Vi sono varie sostanze presenti sulle superfici viarie che possono essere particolarmente dannose per l'ambiente (Tab.3.5)

Tab. 3.5 Inquinanti comuni e rischi connessi

Inquinante	provenienza	Effetti se in quantità eccessiva
Oli	Motori delle auto	Privazione dell'ossigeno nelle acque
Nutrienti organici	Rifiuti organici, spazzatura	Proliferazione di alghe e diminuzione dell'ossigeno nelle acque
Particolati	scarichi dei mezzi; rifiuti organici, terreno	Turbidità delle acque, riduzione della crescita delle piante acquatiche; vettore di metalli pesanti inglobati
Metalli pesanti	Corrosione dei componenti delle vetture, scarichi dei mezzi, sali antigelo	Malattie degli organismi; riduzione capacità riproduttiva.
Cloro	Sali antigelo	Riduzione delle capacità riproduttive degli organismi acquatici
Batteri	Animali, zone di trattamento rifiuti	Rischio di Malattie

3.6.1 Olii e benzine

si ritrovano maggiormente in strade trafficate o in aree di parcheggio fortemente utilizzate [15], basse quantità si trovano anche in aree residenziali e parcheggi scarsamente frequentati, mentre non vi sono tracce di questi inquinanti su marciapiedi o piste ciclabili. Gli olii creano una patina sopra gli specchi d'acqua che ne inibisce l'ossigenazione provocando un indebolimento della flora e della fauna nei laghi e fiumi. Una pavimentazione porosa distrugge gli olii inquinanti attraverso l'attività biochimica dei batteri che colonizzano la pavimentazione stessa e gli strati di inerti inferiori come substrato di sviluppo. Molti batteri e funghi utilizzano gli idrocarburi come nutrimento provocandone la degradazione decomponendo queste sostanze complesse in più semplici elementi chimici i quali possono essere dispersi senza effetti dannosi nell'ambiente. La combinazione di aria, acqua, e cibo all'interno di pavimentazioni porose permettono la facile proliferazione delle colonie batteriche e di funghi rendendo nel tempo sempre più efficiente l'effetto biodegradante di queste strutture. La tipologia e l'attività delle colonie batteriche variano durante le stagioni in funzione dei nutrienti presenti, durante i periodi caldi l'attività di biodegradazione aumenta come in presenza di maggiori quantità di olii; questo porta a considerare che in regioni con climi freddi l'attività di smaltimento di queste sostanze è minore. L'attività di biodegradabilità fu osservata indirettamente in un asfalto poroso sperimentale che, per questo tipo di situazione possiamo considerare equivalente alle pavimentazioni in massello, nel 1975 in Texas. L'Acqua percolata fu analizzata e si notò una trasformazione dei nitrati e una riduzione del carbonio organico che poteva essere attribuito solamente ad una attività microbica presente nella pavimentazione [16]. Uno studio più dettagliato è stato condotto [17] su pavimentazioni in masselli a celle aperte con erba. La popolazione microbica è stata osservata attraverso microscopi elettronici e si presenta come un biofilm costituito da diverse colonie batteriche. Varie prove hanno dimostrato che dal 97,6 al 99% di oli da motore e combustibili versati sulla pavimentazione venivano intrappolati e biodegradati. Il geosintetico che separava la sabbia di allettamento e lo strato di base fungeva da barriera per la filtrazione e risultava la zona in cui si concentrava la maggior parte degli olii introdotti e anche delle popolazioni batteriche, stabilendo così un nesso tra la presenza dei due; scendendo nello strato di base la densità sia di olio che di microorganismi diminuiva. I ricercatori monitoravano il processo di biodegradazione attraverso la produzione e la presenza di enzimi, biossido di carbonio, temperatura e ossigeno; si è rilevata inoltre una rapida proliferazione batterica a seguito di aggiunta di olii mostrando una efficienza di biodegradazione pari a prodotti

presenti sul mercato specificamente studiati, evidenziando così la notevole efficienza di questo tipo di pavimentazione. Per la stimolazione e l'aumento delle colonie batteriche é possibile inserire negli inerti di base granuli di carbone o argilla espansa e aggiungere in fase di posa del pavimento colonie di batteri sotto forma di polveri e stimolarne la crescita con opportuni nutrienti commerciali che possono essere inoltre utilizzati ad intervalli regolari in fase di manutenzione successiva della pavimentazione; questi prodotti in generale sono a base di nitrati e fosfati che stimolano la crescita e l'attività degli organismi.

3.6.2 Sostanze biologiche

L'eccesso di sostanze nutritive generalmente derivano da zona di stoccaggio rifiuti e dai veicoli addetti al trasporto, la parte preponderante é costituita da particelle solide. I nutrienti causano la proliferazione in ambiente acquatico di alghe la cui decomposizione priva l'acqua di ossigeno riducendo la biodiversità nelle comunità acquatiche sia di flora che di fauna.

3.6.3 Particelle solide di varia natura

Le particelle solide vengono depositate dall'atmosfera, cadono dalla vegetazione circostante, disperse dai mezzi che transitano e si depositano sulle superfici urbane e quindi sulle pavimentazioni, esse in caso di pioggia vengono dilavate ed entrano nelle acque di scarico. La presenza di queste particelle crea torbidità nelle acque e altri tipi di inquinamento nel caso in cui all'interno di queste particelle siano presenti sostanze chimiche o metalli pesanti come piombo, zinco cadmio e nickel che derivano sia dalla corrosione che dalle parti soggette ad usura.

Una pavimentazione a masselli permeabile, sia essa costituita da masselli porosi o celle con inerbimento, comincia la sua azione di filtrazione delle particelle sulla superficie: inizialmente vengono trattenuti gli ioni metallici adsorbiti dal materiale costituente i blocchetti [18], la cattura delle particelle comincia tra i granelli di sabbia dei primi strati, inizialmente le particelle più grosse vengono trattenute lasciando le particelle più fini scorrere verso gli strati inferiori; questo processo riduce progressivamente la capacità di drenaggio della pavimentazione. Le particelle che non sono state filtrate possono essere accumulate sul fondo della pavimentazione nella zona della riserva e si possono infiltrare nel terreno nel caso in cui la pavimentazione non sia dotata di un drenaggio oppure, in quest'ultimo caso, possono venire trasportate in impianti per la depurazione dell'acqua. Le particelle in una pavimentazione di questo tipo risultano accumularsi in due zone particolari la superficie e il fondo della base, la parte intermedia risulta la zona con meno accumulo.

Al fine di ottimizzare la capacità filtrante é consigliato [19] di l'uso di sabbie rivestite da ossidi, esse sono trattate industrialmente in modo da creare su granuli film di varia natura chimica conferendogli varie caratteristiche. Queste sabbie possono essere utilizzate sia come parte del materiale costituente la base sia in appositi fossi di drenaggio perché in grado di adsorbire con efficacia gli ioni metallici e filtrare le particelle solide. Osservazioni in Francia su pavimentazioni porose costituite da riserva separata da

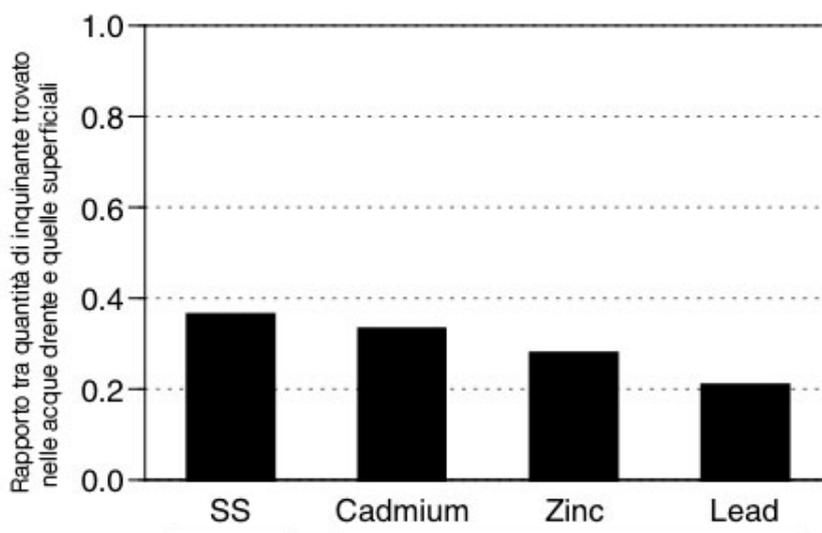


Fig. 3.7 percentuale di inquinante residuo nelle acque trattate da pavimentazione drenante

geotessuto e drenata sul fondo da apposite tubazioni.

La figura 3.7 mostra il rapporto tra gli inquinanti misurati nell'acqua del deflusso superficiale con quelli dell'acqua proveniente dalle tubazioni di drenaggio. A seguito della filtrazione gli inquinanti in oggetto risultano mediamente ridotti ad un 36% di quelli sulla superficie e risultano le particelle più fini della parte superficiale. I metalli adsorbiti vanno dal 21 al 31 % degli iniziali. Per determinare dove gli inquinanti si siano fermati dopo il filtraggio e dopo qualche anno di funzionamento della pavimentazione, i ricercatori hanno proceduto ad un campionamento di materiale superficiale attraverso il trattamento della superfici con spazzatrici aspiranti e dalla base e dalla fondazione attraverso il recupero del materiale. L'analisi é stata effettuata in tutte le particelle minori di 2 mm, il risultato per il piombo é stato considerato rappresentativo di tutti i metalli studiati, esso principalmente si accumula con le particelle sulla superficie e alla base dello strato di base (Fig. 3.8). Come si nota solo una piccola quantità penetra nel suolo, presentando valori che sono risultati solo leggermente superiori a quelli naturali presenti in zona.

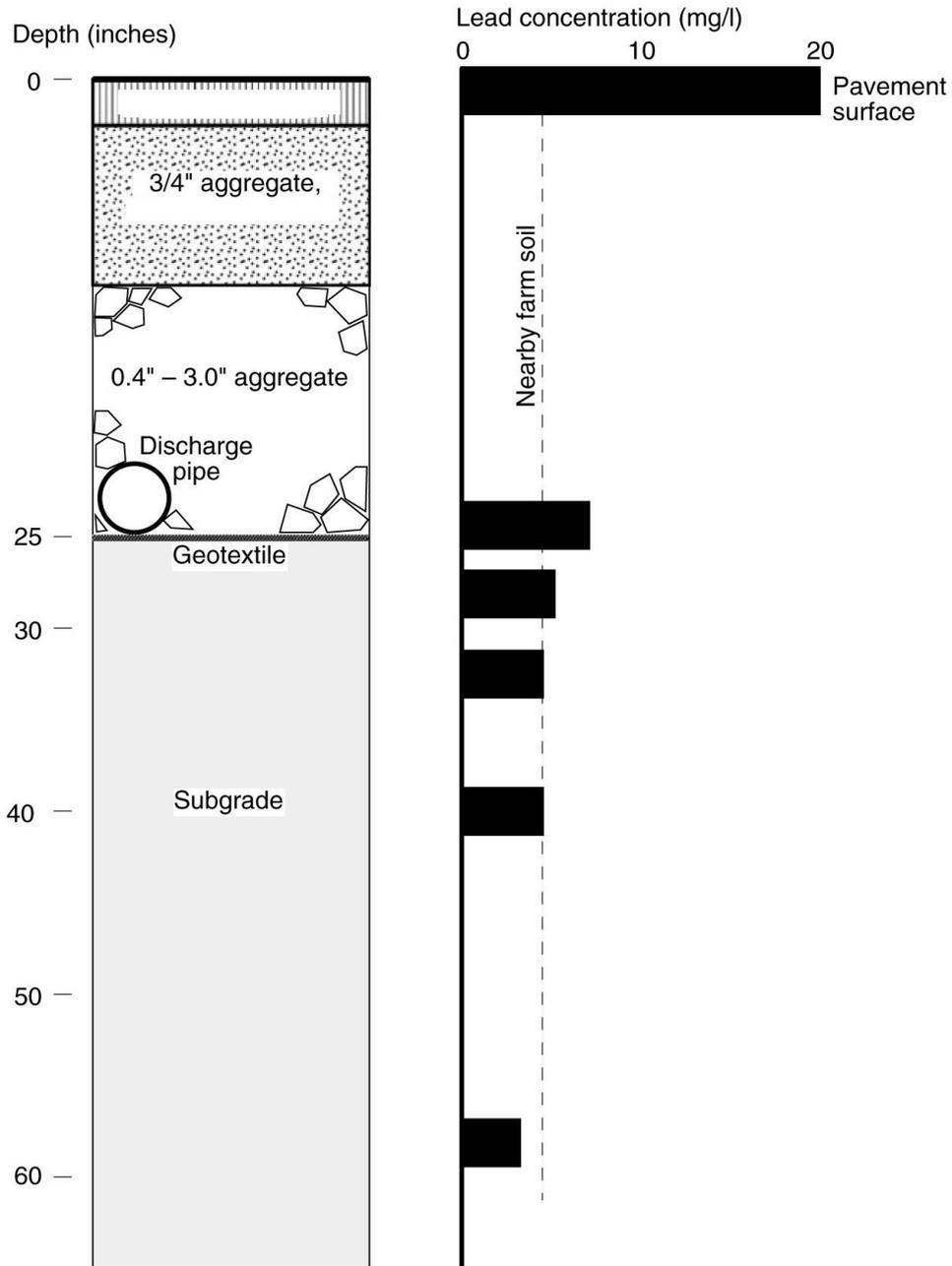


Fig. 3.8 quantità di piombo trovata alle varie profondità

3.6.4 Cloro

Il Cloro deriva dallo scioglimento del sale usato per lo sghiacciamento delle strade usato in inverno, esso si scioglie rapidamente a contatto con l'acqua, lo ione risultante non si associa con particelle normalmente presenti, questo fatto rende l'inquinante particolarmente difficile da rimuovere con le pavimentazioni porose filtranti rendendole inefficaci. Pur essendo utilizzato in periodi invernali è possibile trovare concentrazioni molto alte in zone limitrofe all'utilizzo anche nel periodo in cui non viene usato. Il cloro inibisce l'assorbimento dell'acqua da parte delle piante e ne riduce la crescita producendo

danni alle radici. L'inefficacia delle pavimentazioni porose è pari a quella di altri sistemi passivi.

3.7 Capacità filtrante degli inquinanti del terreno di fondazione

Anche i primi strati del terreno sotto lo strato di fondazione possono contribuire alla filtrazione degli inquinanti prima che essi si disperdano nelle falde acquifere. La CEC (cation exchange capacity) indica la capacità del terreno nella rimozione di agenti inquinanti dall'acqua. La CEC dei terreni può andare da 2.0 meq (milliequivalenti per 100 grammi di terreno) della sabbia ai 20 meq per alcune argille (Brandy 1974). La CEC va moltiplicata per lo spessore del suolo che si desidera interessare alla collaborazione nella rimozione degli agenti. Generalmente per un terreno normale sono sufficienti alcuni cm per la ritenzione di molti tipi di inquinanti come olii inquinanti e nutrienti. Se dovesse essere necessario limitare il più possibile la penetrazione di sostanze nel terreno per determinate criticità (presenza superficiale di falda) è possibile sostituire i primi strati del terreno con altri tipi avendo maggiore CEC come le argille. Alcune linee guida statunitensi consigliano di avere terreni con CEC di almeno 5 meq per uno spessore di 50 cm.

3.8 Fotocatalisi nelle pavimentazioni a masselli

L'aria nelle zone urbane é fortemente inquinata dagli ossidi di azoto (NO_x) contenuti nei gas di scarico degli autoveicoli. La fotocatalisi, è il fenomeno naturale per cui una sostanza, chiamata fotocatalizzatore, attraverso l'azione della luce naturale o artificiale, attiva un processo ossidativo che porta alla trasformazione di sostanze organiche e inorganiche nocive in composti innocui. La fotocatalisi è quindi un acceleratore dei processi di ossidazione che già esistono in natura, possiamo quindi dedurre che i residui della fotocatalisi possono essere ritenuti assolutamente trascurabili, essa permette inoltre una più rapida decomposizione degli inquinanti evitandone l'accumulo. Il fotocatalizzatore maggiormente utilizzato in edilizia é il biossido di titanio TiO₂ che viene solitamente miscelato all'interno degli impasti cementizi o in vernici utilizzati per il trattamento delle superfici. Le sostanze sensibili alla fotocatalisi sono:

- Composti inorganici: NO_x; SO_x; CO; NH₃; CH₃S; H₂S;
- Composti organici clorurati: diossine; cloro benzene; cloro fenolo;
- Composti organici: CH₃OH; C₂H₅OH; CH₃COOH; CH₄; C₂H₆, C₃H₈; C₂H₄; C₃H₆; C₆H₆; fenolo; toluene; etilbenzene; o-xilene; mxilene; fenantrochinone
- Pesticidi: Tradimefon; Pirimicarb; Asulam; Diazinon; MPMC; atrazina, Altri composti: Batteri; virus; PM.10; [20]

Si evidenzia la proporzionalità lineare fra abbattimento degli NO_x e concentrazione di TiO₂ in prove condotto in laboratorio (Fig. 3.9)

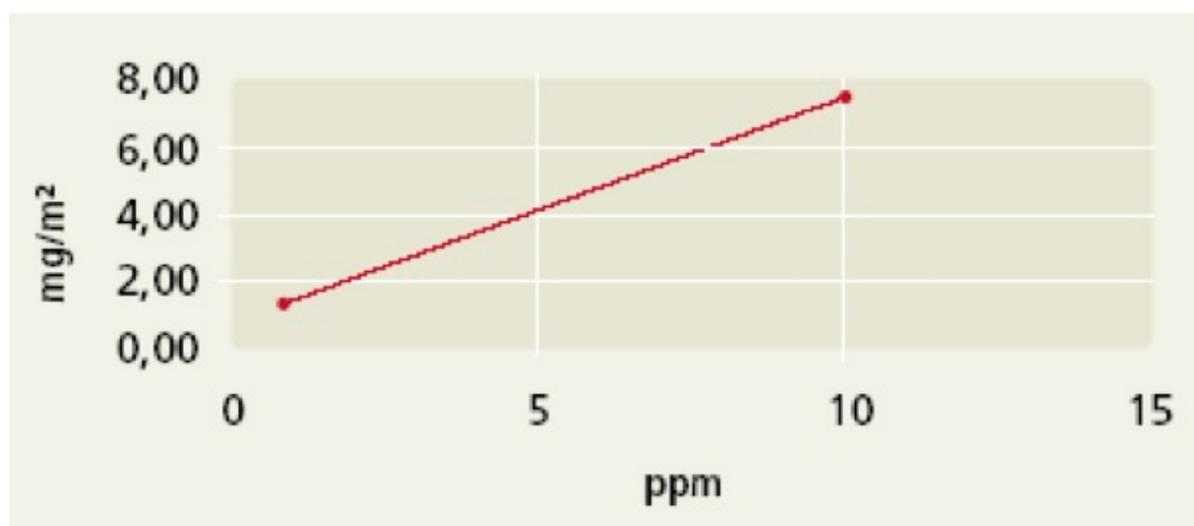


Fig 3.9 quantità di NO_x rimosse in funzione della concentrazione nel massello di TiO₂

Aumentando il tempo di esposizione di una piastrella trattata con vernici fotocatalitiche ai raggi UV, si ottiene un abbattimento più elevato di NO_x (Fig. 3.10).

Il biossido di titanio agisce come fotocatalizzatore, accelerando, in presenza di luce, le reazioni di ossidazione degli inquinanti che vengono a contatto con la superficie cementizia che lo contiene.

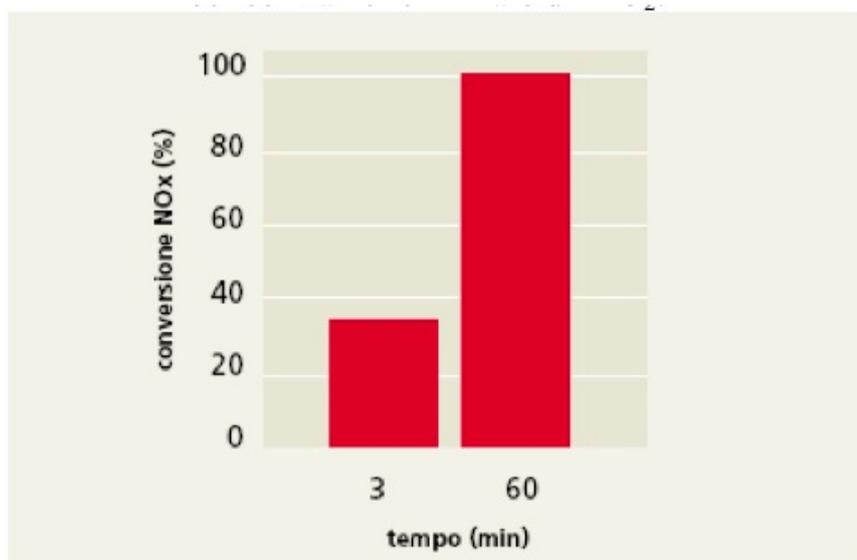


Fig. 3.10 quantità di ossidi trasformati in rapporto al tempo di esposizione

I prodotti della reazione di foto ossidazione, vengono mineralizzati diventando comuni sali inorganici quali nitrati, solfati e carbonati di calcio e dilavati dall'acqua piovana.

[21] Sono state effettuate prove di laboratorio sulla fotoconversione degli NO_x su strati di (Fig. 3.11):

- TiO₂ mescolato con cemento (5% del peso del cemento);
- Miscela di cemento senza fotocatalizzatore;

Le prove di laboratorio effettuate su campioni di masselli hanno mostrato riduzione degli agenti inquinanti fino all' 80%; le prove sono state effettuate con apparecchiature omologate presso il CNR (fig 3.12)

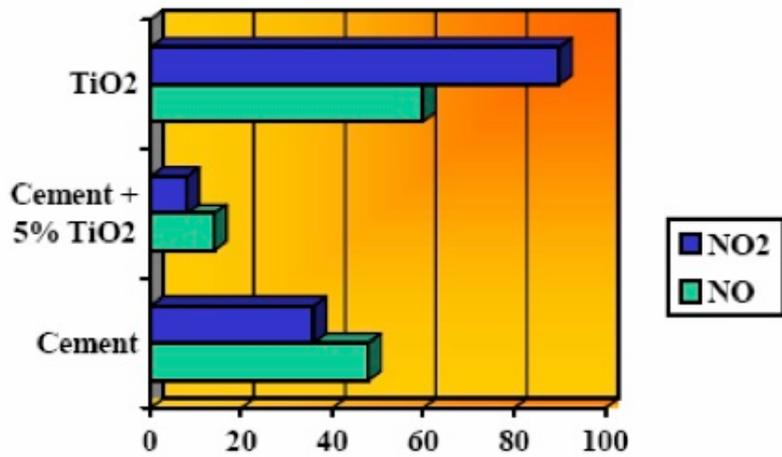


Fig. 3.11 Fotoconversione degli ossidi di azoto

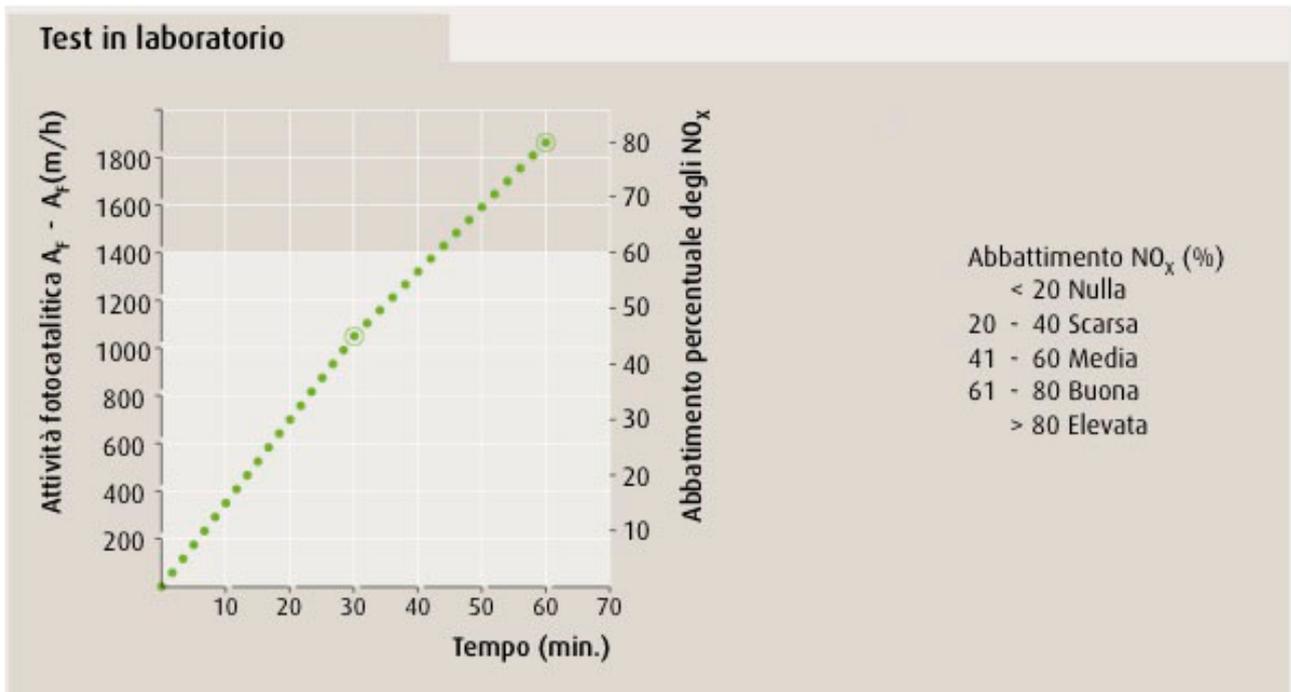


Fig. 3.12 Test effettuato dal CNR

Verifiche sperimentali sono state effettuate anche in sito, i risultati si differenziano da quelli prodotti in laboratorio a causa dell'influenza degli agenti atmosferici e sono notevoli anche in considerazione delle diverse condizioni di irraggiamento solare (Tab 3.6).

Tab. 3.6 Prova effettuata sul campo su pavimentazione fotocatalitica da ARPA e CNR

Inquinanti	% Abbattimento
P.M.	47
NOx	67
SOx	47
Aldeidi Totali	64
Nitrati	74
Lieviti e muffe	44

La rimozione del NO_x in funzione del grado di umidità dell'aria é stata testata per valutarne le prestazioni in diverse condizioni climatiche in range di umidità tra il 10 e 80% , gli ossidi di azoto vengono rimossi dimostrando che possono essere utilizzati in normali condizioni atmosferiche; a livelli superiori le prestazioni diminuiscono probabilmente a causa dell'interferenza della acqua adsorbita con la funzione fotocatalitica del TiO₂ (Fig. 3.13). [22]

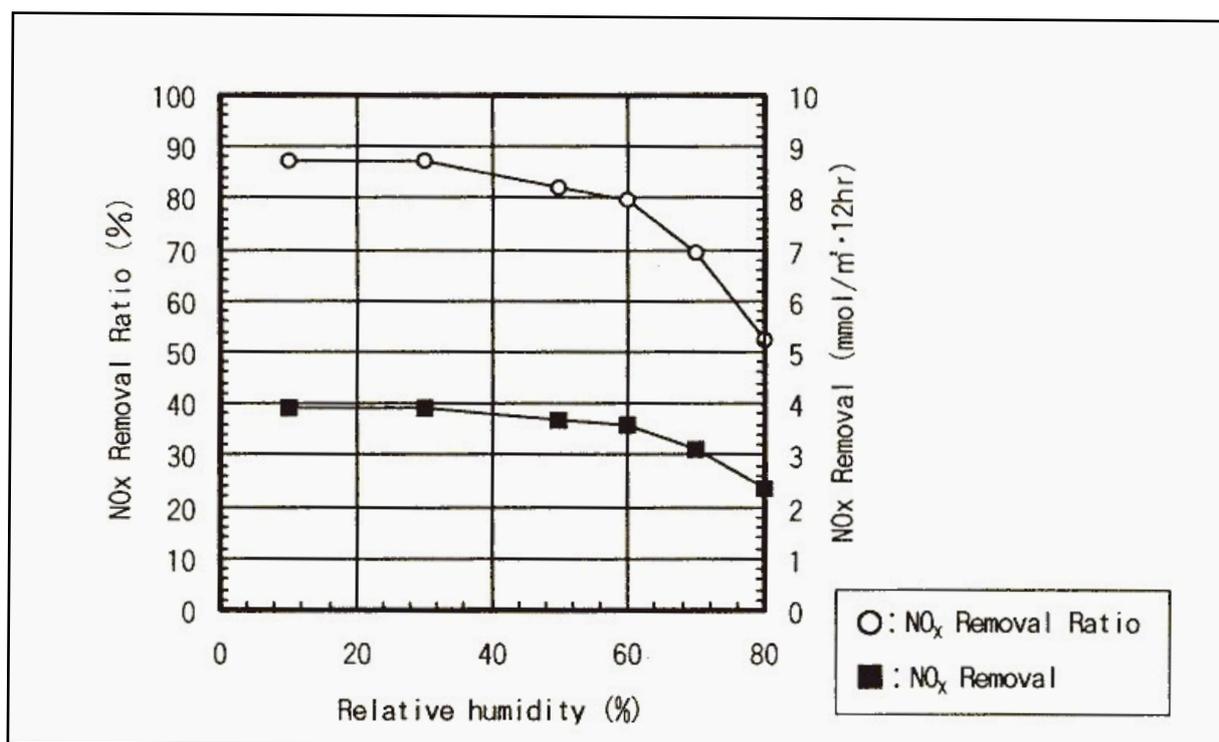


Fig. 3.13 Rimozione degli NO_x in funzione dell'umidità

Gli studi effettuati con procedure sperimentali dagli esperti di fotocatalisi (CNR Ferrara), di qualità dell'aria (Centro di Ricerca di ISPRA e il CNR di Roma) e di emissioni inquinanti da materiali (ITC ex I.C.I.T.E), dimostrano come sia possibile un'efficace abbattimento degli NO_x. I migliori risultati finora riportati indicano che 1000 m² di

superficie fotocatalitica è in grado di abbattere gli inquinanti presenti in un volume di circa 200.000 m³ per 10 ore. La durata dell'attività fotocatalitica non si esaurisce poiché il TiO₂ agisce come catalizzatore permettendo le reazioni di ossidazione senza consumarsi, l'azione fotocatalitica si esaurirebbe solamente asportando meccanicamente la finitura superficiale contenente il fotocatalizzatore. Dopo ripetuti cicli di abbattimento di NO_x non si nota alcuna diminuzione dell'attività fotocatalitica superficiale.

Affinché l'azione fotocatalitica possa funzionare, la superficie delle pavimentazioni in massello non devono essere ricoperte da altri materiali. Dalle prove effettuate sul campo non si sono osservati significativi cali di attività dovuti alla presenza dei normali prodotti da traffico. In caso di pioggia il velo d'acqua che riveste la superficie riduce l'attività fotocatalitica. Tuttavia, grazie all'azione della pioggia stessa, l'inquinamento in queste giornate, è decisamente inferiore e l'acqua ripulisce la pavimentazione dai sali risultanti dall'azione fotocatalitica, gli acidi risultanti dalle reazioni come l'acido nitrico viene dilavato sottoforma di ioni nitrati innocui che permettono anche la fertilizzazione del sottosuolo.

La durata è uguale a quella delle pavimentazioni realizzate con i masselli tradizionali.

Sul mercato è possibile trovare molti masselli costituiti da cls in cui viene miscelato in fase di produzione l'ossido di titanio, nel caso però di pavimentazioni esistenti, è possibile procedere con il rivestimento delle stesse con prodotti premiscelati in polvere composti da cemento fotocatalitico, inerti silicei di granulometria selezionata e additivi speciali; l'impasto dà luogo ad una malta adesiva che può essere applicata sulle superficie della pavimentazione; una soluzione di questo tipo è da considerare non durevole nel tempo e può inibire la capacità drenante di masselli in cls poroso.

Le pavimentazioni in massello con cls fotocatalitico hanno la capacità di autopulirsi a causa delle reazioni indotte e dalla variazione di idrofilia del TiO₂, riducendo ulteriormente i costi di manutenzione. il vantaggio delle pavimentazioni in masselli nella riduzione dei NO_x è che:

- I masselli vengono utilizzati su superfici all'esterno dove vi è una forte presenza di luce e piogge necessarie per l'attivazione e la rigenerazione della superficie stessa;
- I masselli vengono installati proprio vicino alla fonte della produzione dell'inquinante, dando la possibilità di reagire prima che essi vengano sparsi nell'atmosfera;
- Non è necessario occupare aree supplementari per l'installazione di dispositivi per l'abbattimento degli inquinanti;

Considerando che un veicolo dotato di catalizzatore è caratterizzato da un rateo di emissione per ossidi di azoto corrispondente a circa 0,25 g/km, è abbastanza agevole

determinare che l'abbattimento risultate da 1 km² di rivestimento fotocatalitico (30 T/km² all'anno, circa), corrisponderebbe ad una percorrenza di 120 Milioni di km:

$$30 \text{ t/km}^2 / (0,25 \cdot 10^{-6} \text{ t/km}) = 120 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Assumendo una percorrenza media veicolare nel traffico urbano di 10.000 km/anno, la quantità di ossidi di azoto assorbita corrisponderebbe a quella emessa da 12 000 autoveicoli:

$$30 \text{ t/km}^2 / (10 \cdot 000 \text{ km} \times 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ t/km}) = 12 \cdot 000 \text{ veicoli [21]}$$

3.9 Tipi di masselli drenanti

La grande varietà di forme e dimensioni dei masselli permette di bilanciare in modi differenti le varie esigenze che si creano nello sviluppo di una pavimentazione porosa sia dando priorità alla resistenza ai carichi dovuti al traffico pesante oppure favorendo la permeabilità. I masselli in utilizzo per le pavimentazioni sono di vari tipi:

- Masselli con giunti stretti;
- Masselli a giunti aperti o "OpenJoint";
- Masselli a celle aperte o griglie "Opencell";
- Masselli a giunti spazati

3.9.1 Masselli con giunti stretti

Vengono utilizzati per pavimentazioni impermeabili, ne esistono versioni studiate da molte aziende composte da cls poroso che permettono una filtrazione delle acque

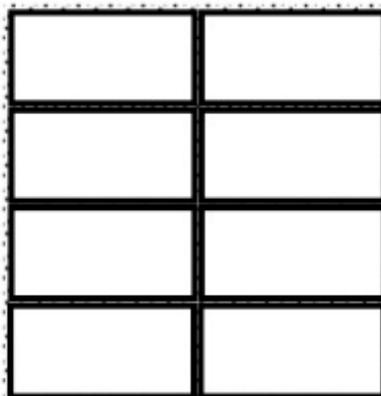


Fig. 3.15 Disposizione di masselli drenanti senza distanziatori

attraverso il materiale stesso, i vantaggi risiedono nella maggiore uniformità superficiale della pavimentazione in opera, agevolando quindi il transito dei mezzi e in relazione alla filtrazione di sostanze inquinanti permettono una maggiore ritenzione di queste ultime nei

primi strati, di contro c'è un minore coefficiente di filtrazione e un più facile intasamento dei pori rendendo necessario una manutenzione più frequente. (Fig. 3.15)

3.9.2 Masselli a giunti aperti o "OpenJoint"

I masselli a giunti aperti con bordi frastagliati, o utilizzati con distanziatori specifici permettono di avere ampie zone di vuoto che andranno riempite con aggregati di

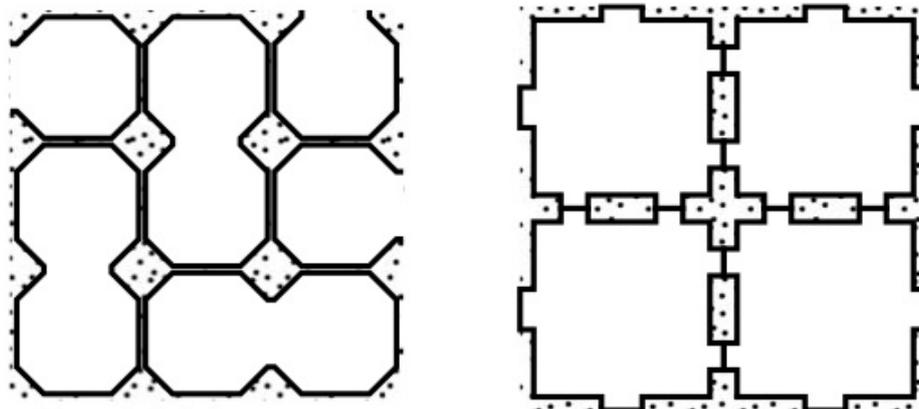


Fig. 3.16 Disposizione di masselli drenanti senza distanziatori

granulometria adatta, questi masselli solitamente sono costituiti di normale cls e lasciano la loro funzione di permeabilità all'ampiezza dei giunti e allo spazio creatosi, alcuni disegni sono tali che permettono a questi masselli di produrre in fase di installazione un forte interbloccaggio e quindi una adeguata resistenza anche a carichi elevati senza venir meno alla funzione drenante agevolata dalle aperture createsi. (Fig. 3.16)

2.9.3 Masselli a celle aperte o griglie

Le pavimentazioni a celle aperte sono state sviluppate nei primi anni 60 in Germania e si sono diffuse nel resto d'Europa e negli stati uniti tra la fine del 60 e gli inizi dei 70, le pavimentazioni a celle aperte sono costituite da masselli o piastre che presentano ampie aperture per tutto il loro spessore. (Fig. 3.17)



Fig. 3.17 Esempio di Blocco a celle aperte in opera con inerbimento o riempimento con inerti

Differiscono dai masselli a giunti aperti dal fatto che l'area delle aperture non é presente solamente fra un blocco e l'altro ma fa parte del massello stesso. Solitamente sono elementi prefabbricati di calcestruzzo e raramente é possibile trovare elementi gettati in opera. Sono masselli o piastre caratterizzate da una elevatissima percentuale di superficie atta al riempimento di materiale drenante di varia granulometria o di terreno per l'inerbimento, essi sono generalmente utilizzate in zone a basso traffico o in parcheggi. Vi é un forte vantaggio della presenza di inerbimento nelle pavimentazioni in masselli che possono ospitare questo tipo di riempimento (celle aperte o giunti larghi). (Fig. 3.17)

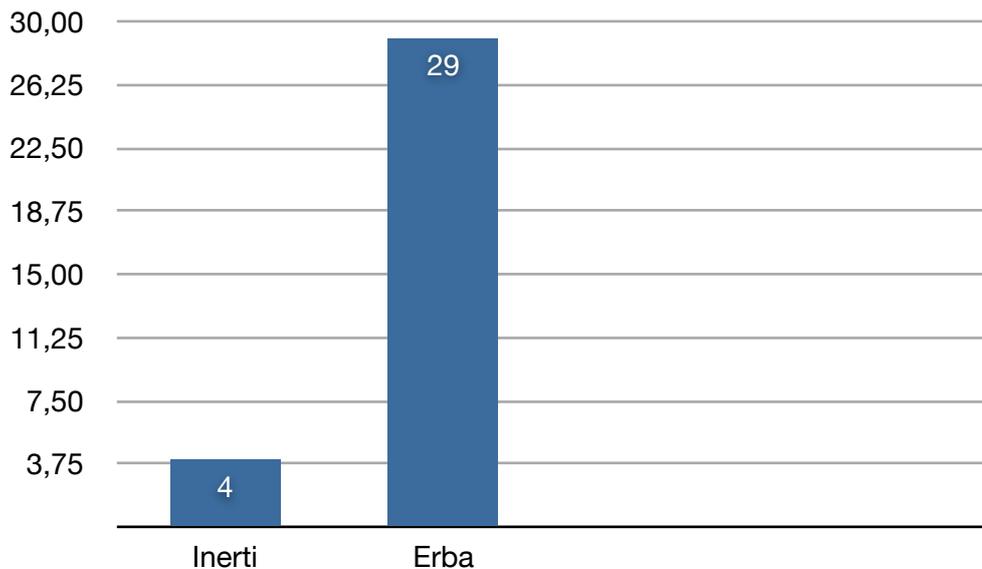


Fig. 3.18 Corrivazione in pavimentazioni con diversi tipi di giunti in ordinate il tempo é espresso in minuti

La presenza di soli aggregati e terreno pur avendo alti indici di permeabilità ha un basso indice di ritenzione idrica, limitando molto il coefficiente di dilavamento e quindi indirettamente limitandone virtualmente il coefficiente K. Per la crescita di piante all'interno dei giunti é necessaria una granulometria sabbiosa tollerata dalla vegetazione e che permetta una piccola ritenzione idrica, deve inoltre garantire una sufficiente areazione delle radici e deve essere resistente alla compattazione e alla formazione di croste superficiali. É possibile nello strato di allettamento e nello strato di base, aggiungere materiali porosi come lapillo vulcanico o argilla espansa che ne permettano un miglior adattamento. Le celle aperte sono riempite con aggregati la cui granulometria permette una forte permeabilità della superficie oppure possono essere completati con terreni per permettere la crescita vegetale. Le coste e i piedistalli di cui sono forniti questi elementi trasmettono il carico agli strati sottostanti e proteggono il materiale di riempimento dalla eccessiva compattazione e erosione. La presenza di solide porzioni di cls e di grandi aperture permette la grandissima porosità della superficie e contemporaneamente una resistenza sufficiente alla sopportazione del traffico, anche pesante, che vi transita. La presenza di terreno e erba all'interno delle ampie celle consente oltre che ad una forte riduzione del coefficiente di dilavamento superficiale anche di un importante beneficio per quello che riguarda l'effetto "isola riscaldante" nelle grandi superfici pavimentate. L'industria ha sviluppato diversi modelli di griglie per poter soddisfare svariate combinazioni nelle esigenze strutturali ambientali ed economiche oltre alla progettazione di pavimentazioni permeabili; il loro uso ha implicazioni sull'aspetto, sulla accessibilità pedonale e la manutenzione del verde. La norma che riguarda le specifiche delle pavimentazioni a celle aperte é la ASTM c 1319, in essa é specificato lo spessore, il materiale, la resistenza e gli assorbimenti delle griglie in opera, inoltre specifica che la durabilità della pavimentazione va dimostrata con prove sul campo con la durata di almeno di 3 anni nello stesso ambiente in cui si intende usare quel tipo di massello. Solitamente le griglie sono particolarmente pesanti e resistenti creando così pavimentazioni particolarmente durevoli. Generalmente l'aggregato usato per lo strato di base é il 57, esso va posato in strati e compattato ogni volta, vista la dimensione dei masselli occorre una base rigida necessaria per prevenire la rottura e lo spostamento verticale degli stessi considerando anche che a differenza dei masselli autobloccanti in questo tipo di elementi non é previsto nessun fenomeno di ingranamento. É possibile e consigliato l'uso di geosintetici permeabili o impermeabili a seconda del tipo di utilizzo della struttura che permettano anche l'eliminazione della contaminazione degli inerti della base da parte del terreno di fondazione. Lo strato di allettamento comunemente é

costituito da aggregati con curva n°8, perché soddisfa il criterio di filtro rispetto al n°57, non è necessario l'uso di geosintetici di separazione, finita la base vengono stesi circa 2,5 cm di allettamento fortemente compattato per riempire i primi cm dello strato di base, successivamente al termine di questa operazione vengono posati altri 2,5 cm di allettamento senza compattazione ma con la sola staggiatura quindi vengono posati i masselli su di essa. Nel caso in cui le granulometrie utilizzate siano a rischio di contaminazione è necessario posare un opportuno geosintetico tra i due strati. I masselli vengono vibrati con appositi strumenti per consolidare il tutto. Sebbene non sia presente l'effetto ingranamento è necessario distanziare di qualche mm i masselli per evitare che i micromovimenti causati da vibrazioni producano sforzi sui masselli creando crepe e rotture. I bordi di contenimento sono necessari solo in caso di montaggio su piani inclinati o dove siano previsti particolari sforzi tangenziali, nelle altre situazioni di posa il peso e la dimensione degli elementi a griglia sono sufficienti alla loro stabilità; da considerare che questo tipo di pavimentazione è usata generalmente in zone a bassissima densità di traffico o a parcheggi con uso poco intenso. Al termine del posizionamento è possibile riempire gli ampi spazi con la stessa granulometria dell'allettamento che solitamente è fortemente permeabile oppure si può procedere con appositi strati idonei a permettere la vegetazione. Il montaggio abbinato a erba e piante resistenti al calpestio va effettuata riempiendo le cavità delle celle con un terreno vegetale sabbioso procedendo ad una modesta compattazione, è necessario lasciare almeno 8 mm dalla superficie finita della pavimentazione per evitare una eccessiva pressione dei pneumatici sul suolo e quindi sulle piante stesse. Particolare attenzione va posta sull'accessibilità da parte di pedoni e carrozzelle su questo tipo di superficie, la presenza di forti discontinuità crea disagi e pericoli. Nel caso di semina dell'erba è necessaria l'irrigazione nelle prime fasi di sviluppo tenendo presente anche che in periodi caldi, la presenza delle parti di cls dei masselli, crea un forte riscaldamento del terreno e una rapida essiccazione dello stesso. Questa pavimentazione inerbita richiede generalmente la stessa manutenzione dei tappeti erbosi inclusa l'irrigazione, fertilizzazione e il taglio periodico.

3.9.4 Masselli a giunti spaziati

Meno importanti al fine di pavimentazioni sono i masselli spaziati, solitamente di pietra naturale e in cls che ricordano queste forme, vengono montati con grandi spazi fra essi garantendo una grande permeabilità ma una scarsa portanza e una superficie finita molto irregolare sono adatti esclusivamente a passaggi pedonali. (Fig. 2.19)



Fig. 2.19 Esempio di Masselli a giunti spaziosi

3.10 Riempimento dei giunti nelle pavimentazioni a masselli impermeabili

Per ottenere una permeabilità adeguata i giunti o le frastagliature devono essere larghe a sufficienza per poter essere riempite di inerti idonei, vengono considerate di larghezza sufficiente quelle maggiori di 6/7 mm, questa considerazione esclude quindi dalla classificazione di pavimentazioni in masselli permeabili quelle con giunti minori ad eccezione fatta per l'utilizzo di masselli in materiale permeabile.

3.10.1 Materiale di riempimento dei giunti

E' importante il tipo di aggregati utilizzati nel riempimento dei giunti in relazione con il coefficiente di filtrazione K i dati [23] sono stati misurati su una superficie reale di pavimentazione a masselli con differenti materiali di riempimento dei giunti e mostrano in ordinate il K mentre in ascisse il range della dimensione delle particelle nelle varie miscele di inerti utilizzate. (Fig.2.20)

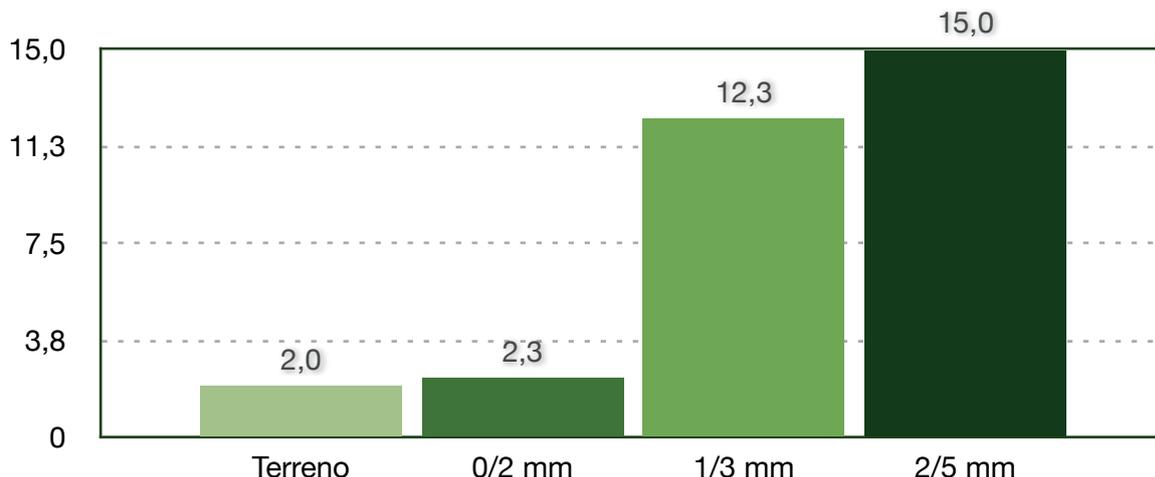


Fig. 3.20 Relazione fra coefficiente di infiltrazione K espresso in cm/h sulle ascisse e alcune granulometrie di inerti usate nei riempimenti

La granulometria 2/5mm produce la maggiore permeabilità mentre il terreno la minore, va considerato però che quest'ultimo viene utilizzato per la semina di erba e questa, disucendo drasticamente il coefficiente di runoff a causa della ritenzione dell'acqua e l'impedimento della corrivazione della stessa, migliora molto le prestazioni complessive della pavimentazione.

Sono state messe in relazione alcune curve granulometriche di inerti classificate nel sistema ASTM. Il n° 8 è la granulometria più opengraded, porosa e permeabile, i grandi vuoti al suo interno permettono un rapido drenaggio e una grossa immunità al fenomeno dell'intasamento da parte degli inquinanti e delle particelle di sporcizia, essa è quindi utilizzabile dove vi è la priorità di grandi drenaggi e durabilità della permeabilizzazione. (Fig. 3.21)

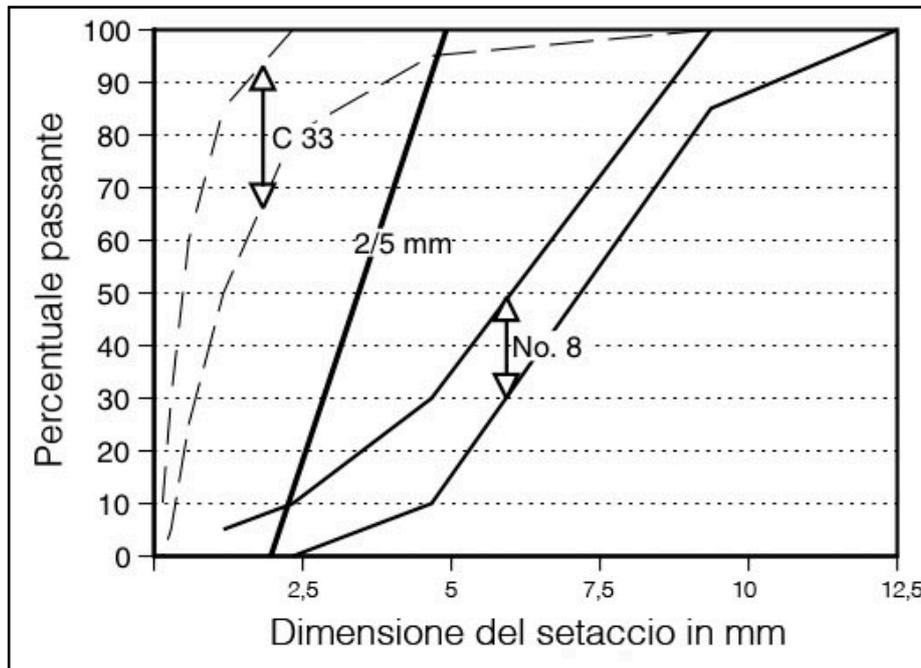


Fig. 3.21 granulometrie utilizzate nella posa dei masselli

Questo tipo di granulometria è sconsigliata in caso di masselli con giunti stretti, a causa dell'impossibilità di un perfetto riempimento creando un basso effetto di ingranamento e quindi una scarsa resistenza ai carichi del traffico; questa granulometria è da abbinare quindi a blocchetti frastagliati o a celle aperte. La 2/5 è comunemente usata in Europa per le pavimentazioni permeabili, sebbene più fine della n°8 essa ha un range più stretto nella granulometria e ha una assenza di particelle fini, permettendo un'alta percentuale di vuoti e la possibilità di utilizzo nei blocchetti a giunti stretti con un sufficiente effetto di ingranamento. I vuoti in questa granulometria oltre che permettere un'adeguata permeabilità sono sufficientemente stretti per trattenere le particelle di detriti, di contro questa granulometria è soggetta alla formazione di vegetazione e di un più rapido intasamento. La curva C33 viene solitamente utilizzata per la pavimentazioni in masselli non permeabili, la curva molto ripida nella parte iniziale indica una grande presenza di particelle fini rendendo la sua permeabilità molto bassa. In una pavimentazione a masselli permeabile questa granulometria deve essere evitata. Un evidente caso di errato utilizzo della sabbia di sigillatura dei giunti è quello di "Castaic lake water conservatory". [14] Lo scopo di questo parcheggio era dimostrare la possibilità del riutilizzo delle acque di filtrazione per l'irrigazione delle piante in una zona con meno di 20 cm/annui di pioggia senza l'utilizzo di apporti esterni di acqua. I masselli utilizzati sono del tipo a doppio ottagono, la parte più bassa è stata chiusa con un cordolo prefabbricato di cls mentre quella più alta di quota da un cordolo gettato di circa 50 cm di larghezza, le pendenze sono state disegnate per portare l'acqua filtrata alle zone piantumate del parcheggio. I

giunti sono stati sigillati con inerti con granulometria c33. Dopo 6 anni dalla messa in opera i masselli erano perfettamente ingranati e non presentavano disallineamenti orizzontali o verticali mostrando un'eccellente resistenza ai carichi. Il coefficiente K della pavimentazione però risultava molto diminuito rispetto al momento della costruzione, si notavano due zone distinte: la parte in alto presentava valori ancora alti mentre in quella limitrofa alle zone piantumate (più bassa di quota) gli aggregati presentavano una percentuale di materiale fine molto elevata e una crosta superficiale che impediva l'infiltrazione. La spiegazione più probabile è che le particelle fini a causa del dilavamento provocato dal flusso superficiale per via del runoff della pavimentazione, ha dilavato le particelle più fini creando l'occlusione del resto dei giunti. La riparazione è avvenuta con la rimozione dei vecchi inerti e la sostituzione con granulometrie più idonee.

3.11 Relazione fra infiltrazione e resistenza ai carichi della pavimentazione

In funzione del tipo di uso a cui è soggetta la pavimentazione è necessaria una corretta progettazione al fine di renderla maggiormente permeabile oppure resistente all'usura e ai carichi; attualmente la massimizzazione della stabilità e della filtrazione non è possibile, solamente l'uso di determinati masselli o aggregati favorisce una sola funzione.

Un buon compromesso può essere raggiunto usando masselli frastagliati con forme complesse e granulometrie grandi, la resistenza della pavimentazione persa per via del minore ingranamento può essere recuperata in parte attraverso un maggior dimensionamento e una maggiore attenzione nella costruzione dello strato di base. Un esempio di questo tipo di intervento è quello del parcheggio "Mickel Field in Wilton Manors, Florida" (Fig 3.22) [14], non essendo presente un sistema fognario adeguato era necessario una pavimentazione molto permeabile che garantisse l'utilizzo anche in caso di forti precipitazioni, l'uso intenso del lotto ne richiedeva anche una buona resistenza meccanica. La scelta è caduta su masselli con disegno a doppio ottagono con protuberanze per l'ingranamento, installati su un allettamento di sabbia di 2,5 cm su una base di roccia frantumata in accordo con gli standard "Florida DOT". I bordi sono stati gettati dopo la posa dei masselli in modo da avere perfetta aderenza e non è stato necessario il taglio o la modifica di quest'ultimi. Il riempimento dei giunti è stato effettuato con sabbia calcarea a spigoli vivi approssimativamente di 8 mm con una piccola percentuale di passante fine. La granulometria risulta molto opengraded, porosa e permeabile, essa riempie comodamente le frastagliature del blocco ma non riesce a riempire i giunti in maniera corretta.

Sebbene secondo le linee guida questo tipo di installazione non dava risultati corretti dal punto di vista teorico-strutturale, dopo 6 anni di installazione i masselli risultavano ancora perfettamente allineati verticalmente e orizzontalmente e la permeabilità era pressoché identica a quella nel momento della messa in opera. L'alto spessore e la forma dei masselli, insieme ad una corretta installazione degli strati di base ha contribuito a sopperire la riduzione di ingranamento dovuta alla composizione strutturalmente errata degli inerti di riempimento.



Fig. 3.22 Mickel Field in Wilton Manors, Florida

3.12 Intasamento e recupero della permeabilità

E' stato analizzato il declino della permeabilità di installazioni con sabbia 2/5 , notando una forte diminuzione della stessa nel tempo; il risultato di questa diminuzione deriva da una combinazione di molti elementi come l'assestamento e la compattazione degli aggregati e l'accumulo di particelle estranee all'interno dei vuoti.

James e Gerrits (2003) rilevano che l'infiltrazione nelle pavimentazioni di masselli dopo 8 anni di posa può essere accresciuta in maniera sensibile con la sostituzione di circa 15 mm di aggregato di riempimento dei giunti. L'operazione risulta fattibile attraverso spazzole aspiranti. Dopo la rimozione é necessario il ripristino con materiale nuovo e pulito. Nel caso in cui le macchine spazzatrici non siano sufficienti alla rimozione per una

cementazione delle particelle della sabbia si rende necessaria la rimozione dei masselli e la posa in opera degli stessi con nuovo inerte. Il test é stato effettuato su una pavimentazione di masselli a doppio ottagono in Ontario. (Fig. 3.23)

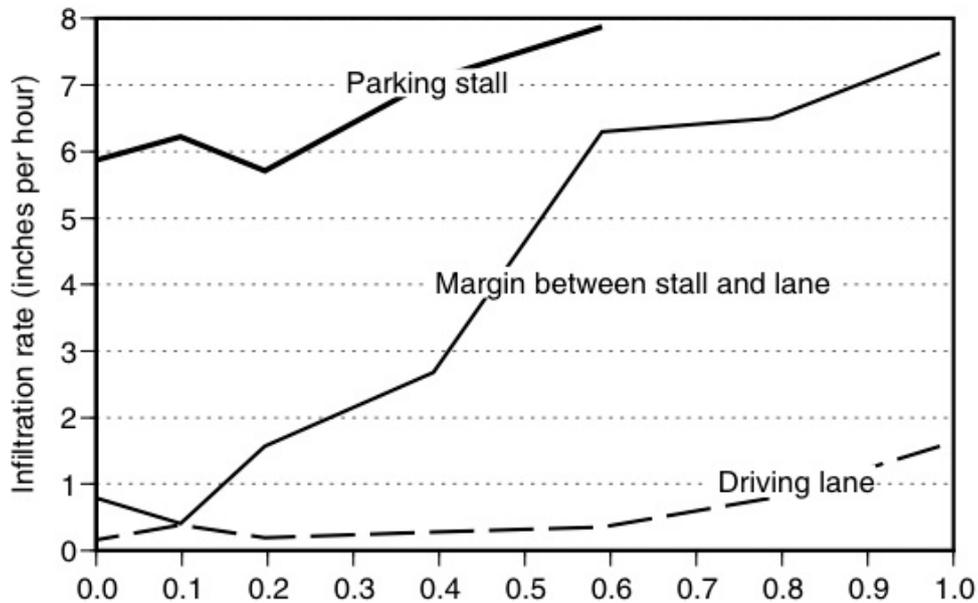


Fig. 3.23 Recupero della permeabilità.

Questa era stata sottoposta a molteplici operazione di rimozioni della neve e trattata con ghiaie antineve nel periodo invernale e pulita con spazzatrici. I coefficienti di filtrazione variavano a seconda della zona dell'area, che possono essere riassunte in tre zone interessanti: una facente parte la zona di parcheggio, una costituita dalle corsie e l'altra dal margine fra le due. I ricercatori hanno misurato le infiltrazioni in queste zone progressivamente durante le opere di ripristino. La zona dei parcheggi ha mantenuto una maggiore permeabilità negli anni e per il ripristino delle condizioni ottimali sono stati necessari pochi mm di sostituzione degli inerti. La corsia di guida ha peggiorato in maniera sensibile le prestazioni a causa del traffico elevato dall'alta presenza di particelle fini dovute all'usura dei veicoli e dalla presenza di sabbie antighiaccio, fortemente compattati dal passaggio dei veicoli stessi. Queste aree hanno raggiunto un grado di occlusione molto alto sia in densità che in profondità. Problema aumentato dal fatto che il miglioramento della permeabilità é stato scarso anche con sostituzione di inerte a profondità rilevanti. Una via intermedia é quella delle zone di separazione tra i due tipi che pur essendo ricche di particelle fini ed avere subito una forte diminuzione delle caratteristiche idrologiche, non ha subito il forte compattamento dovuto al passaggio degli pneumatici e dalle vibrazioni, il miglioramento quindi delle caratteristiche é evidente dopo i primi mm di sostituzione. Questi risultati dimostrano che, in caso di aree particolarmente

trafficate é necessaria una più frequente manutenzione riguardo la sostituzione della sabbia dei giunti al fine di evitare un forte addensamento delle particelle fini ed evitare quindi interventi più onerosi (riposa del pavimento) e il forte decadimento del potere di permeabilità.

3.13 Tipi e forme di masselli drenanti

3.13.1 Doppio quadro

Il blocco a doppio quadro é costituito da due quadri collegati (fig 3.24), la presenza di protuberanze lungo i bordi permette la presenza di giunti sufficientemente distanziati e ne facilita la posa in opera, la presenza degli smussi permette una ampia superficie drenante, le dimensioni del blocco sono di circa 100 mm x 200 mm, la forma rettangolare permette una disposizione in fase di installazione con schemi tipici dei masselli autobloccanti e consente di sfruttare di conseguenza la resistenza dovuta all'installazione a spina di pesce, cosa che non sarebbe fattibile nel caso fossero di forma ottagonale. Il canale centrale ha solo una funzione estetica, esso permette di mostrare una pavimentazione a masselli ottagonali.

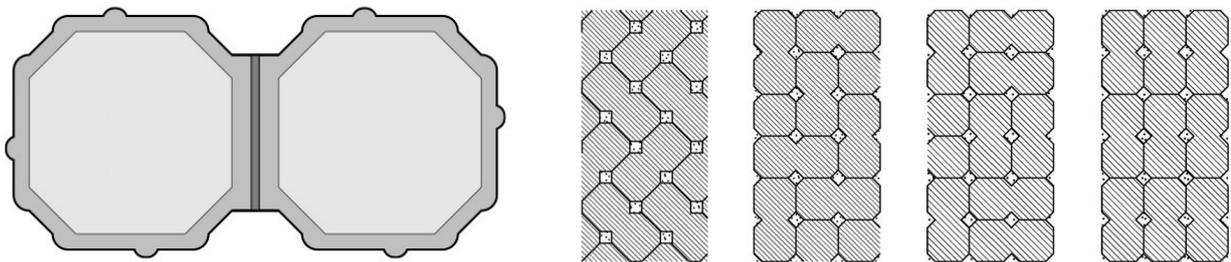


Fig. 3.24 Forma del blocco e tipologie di posa in opera

Gli smussi sono sufficientemente larghi per poter ospitare inerti con granulometria opengraded ma abbastanza piccoli per evitare la rimozione di esso da parte degli pneumatici.(Fig. 3.25)

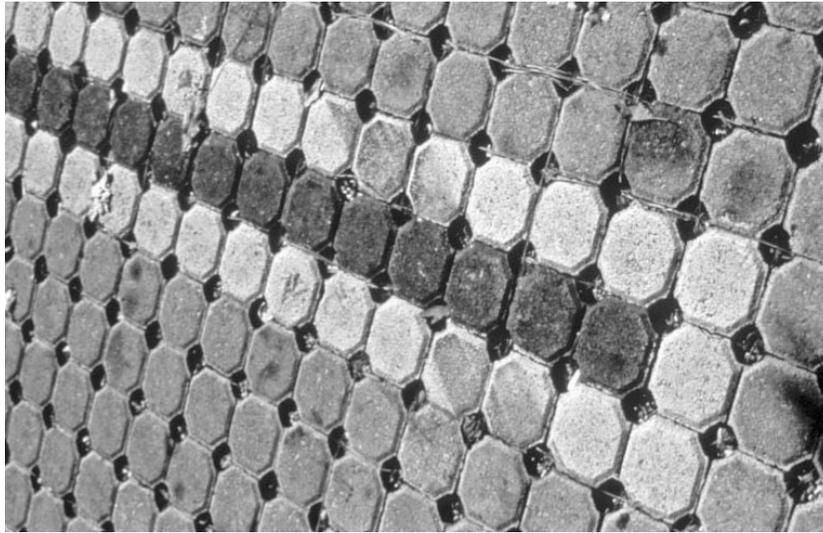


Fig. 3.25 esempio di posa di masselli a doppio quadro

Un esempio di installazione di questo tipo di masselli é il parcheggio presso “English Park in Atlanta”. Bordi sono stati gettati in opera e la granulometria della sabbia di riempimento é 2/5mm, lo spazio calcolato nella riserva permette di assorbire un evento atmosferico con un tempo di ritorno di 100 anni. Al fine di evitare percolamento negli strati inferiori si è provveduto ad utilizzare una membrana impermeabile collocata sopra il terreno di sottofondazione. Al fine di evitare la rottura della stessa a causa della pressione degli aggregati nella base si é proceduto con uno strato di sabbia protettivo posto direttamente sul geosintetico (Fig 3.26). Osservazioni negli anni seguenti all’installazione hanno confermato la buona permeabilità della pavimentazione e il corretto funzionamento della zona di riserva; l’ acqua proveniente dai tubi di drenaggio é presente con basse portate anche dopo molto tempo dalla fine dell’evento. Il costo dell’intervento é risultato maggiore rispetto alla soluzione con asfalto non drenante ma non si sono più avuti fenomeni di allagamento con impossibilità di accesso al parcheggio.

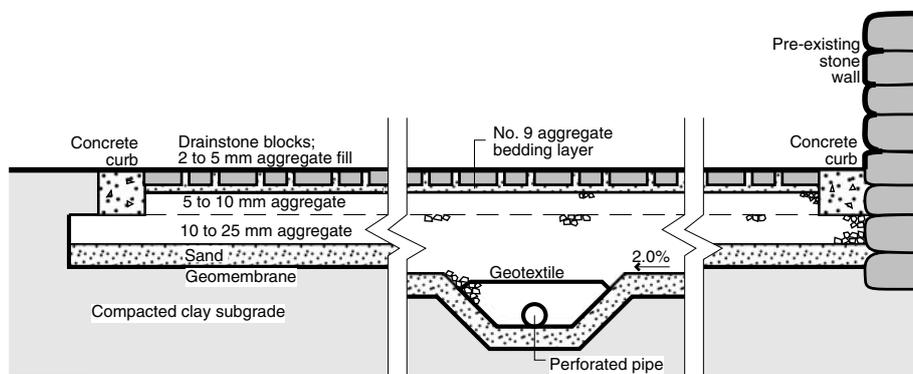


Fig 3.26 Sezione della posa nel parcheggio English Park, Atlanta

3.13.2 Triplo quadrato

Il blocco a triplo quadrato ha una forma particolarmente complessa che combina tre superfici quadrate con una serie di smussi e dentellature che permettono la creazione di ampie superfici drenanti e il rispetto in fase di installazione della larghezza dei giunti; questi masselli hanno una dimensione abbastanza ampia di circa 300 mm x 200 mm. (Fig. 3.27) L'installazione può avvenire con un solo schema che si tramuta, a causa della forma, in una sorta di herringbone. Su questi masselli sono state testate combinazioni di miscele

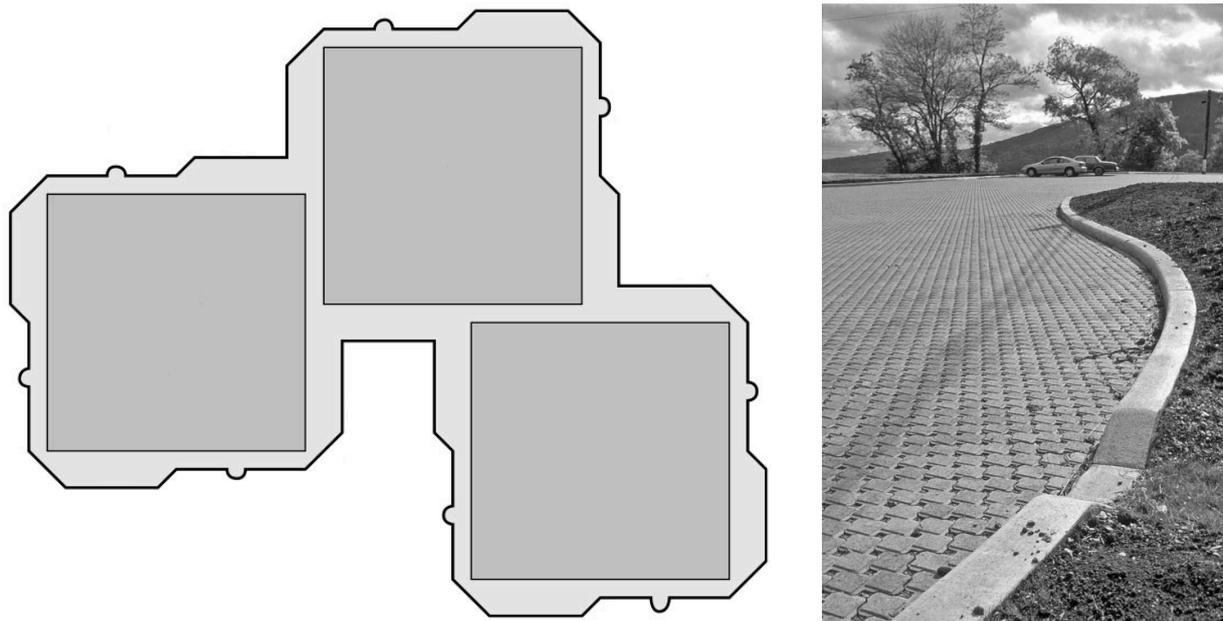


Fig 3.27 forma del blocco a triplo quadrato e esempio di installazione

di aggregati nella speranza di trovare una combinazione che potesse sfruttare il vantaggi drenanti di inerti opengraded e strutturali di particelle più fini.

I risultati hanno confermato che le miscele degli inerti provocano un peggioramento sia delle caratteristiche di permeabilità a causa del riempimento dei vuoti tra le particelle più grosse da parte di quelle fini, sia strutturale perché quelle di dimensioni maggiori impediscono un corretto riempimento dei giunti più sottili da parte delle particelle fini.

La granulometria che si è rivelata migliore per questo tipo di masselli è la n°5 perché in grado di riempire agevolmente i giunti. Le smussature presenti permettono l'uso della n. 8 ma dal punto di vista strutturale non viene garantito un sufficiente Ingranamento. (Fig. 3.28).

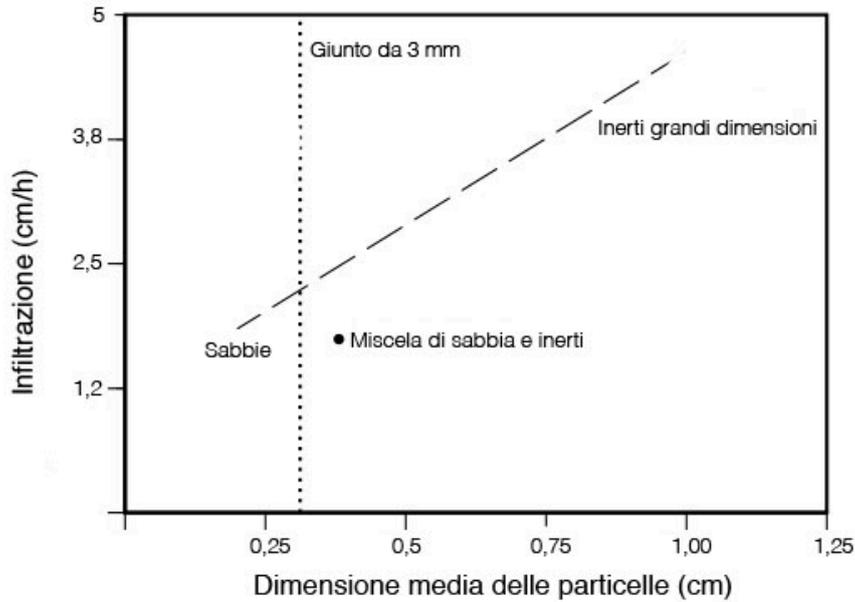


Fig 3.28 infiltrazione rispetto alla granulometria degli inerti

3.13.3 Rettangolari con dentellature

Il modello rettangolare con dentellature può essere rettangolare di 100 mm x 200 mm o quadrato di 100 mm x 100 mm, il vantaggio di questo blocco è che pur non avendo smussature, le dentellature presenti ai lati dello stesso creano ampi giunti su tutti e quattro i lati, questo permette di avere una grande superficie drenante. I giunti sono sufficientemente ampi da ospitare una granulometria n°10. (Fig 3.29) Una installazione (Fig 3.30) particolare è stata effettuata nella pavimentazione dei marciapiedi lungo il fiume Hudson a Manhattan, la presenza di numerosi alberi ha indotto una progettazione che permettesse il drenaggio nel sottosuolo delle acque meteoriche, la pavimentazione deve

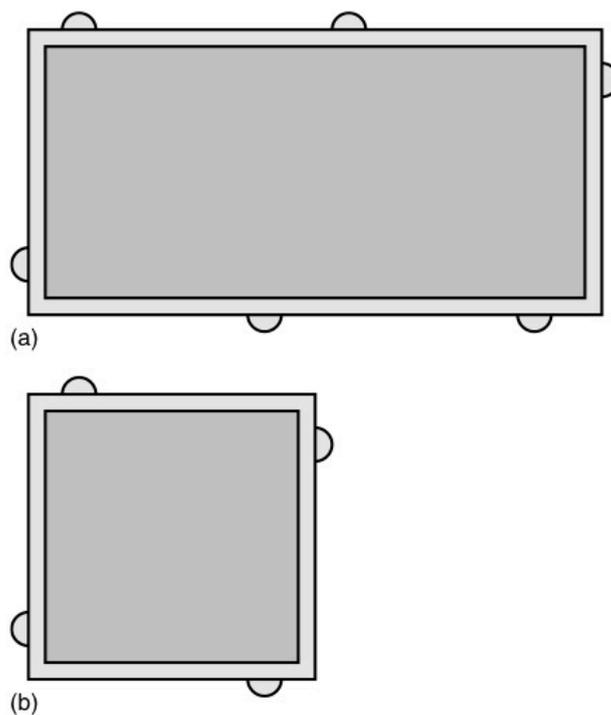


Fig. 3.29 Masselli rettangolari con dentellature

sopportare un intenso traffico pedonale e saltuariamente i mezzi per la manutenzione e pulizia. L'aggregato utilizzato per la base corrisponde alle specifiche ASTM C 330 che permettono anche una buona proliferazione delle radici mentre per la sabbia di riempimento dei giunti è stata utilizzata una granulometria ASTM n°10. Dopo un anno dall'installazione si è verificata la buona permeabilità della superficie e l'ottimo stato di vegetazione degli alberi dovuto all'arieggiamento e umidità presenti nelle radici per merito di una superficie permeabile.



Fig 3.30 Pavimentazione pedonale sulle rive del fiume Hudson

3.13.4 Doppio Ottagono

Il massello a doppio ottagono é formato dalla combinazione di due ottagoni che formano aperture rettangolari in corrispondenza delle smussature, le sue particolarità sono le protuberanze su uno solo dei due ottagoni e le aperture rettangolari che aumentano la superficie drenante. (Fig. 3.31)

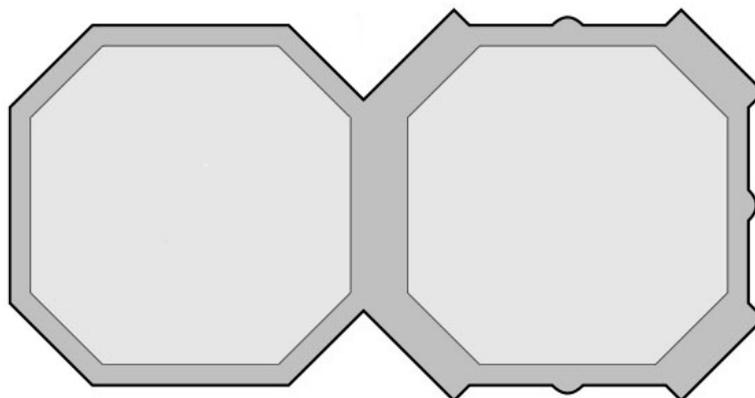


Fig. 3.31 Forma del blocco a doppio ottagono

La dimensione totale é circa 10 cm x 30 cm. Le smussature sono sufficienti a essere riempite con aggregato n°12. Una installazione é stata effettuata in una strada carrabile all'interno di una zona residenziale di 12 unità immobiliari (Fig. 3.32). La posa é stata effettuata su una base di circa 30 cm con una granulometria di circa 3 mm con un passante fine molto basso, lo strato di allettamento e di riempimento dei giunti é costituito da inerti di circa 5 mm; il terreno di fondazione é sabbioso e drenante. dopo 1 anno dalla costruzione non si sono avuti problemi strutturali, i masselli risultavano ben allineati sia verticalmente che orizzontalmente. La capacità drenante risultava eccellente in quasi tutta la superficie tranne in alcune zone dove gli spazi tra i masselli risultavano ostruiti da materiale fine; successive indagini hanno mostrato che le zone in oggetto erano state utilizzate come deposito di materiale per la costruzione di alcune abitazioni, i detriti dovuti a questi materiali e il passaggio di mezzi pesanti hanno contribuito all'intasamento della superficie drenante. Il recupero della funzione di smaltimento delle acque é stato effettuato attraverso l'asportazione dei primi millimetri di materiale contaminato e la sostituzione con inerti puliti.



Fig. 3.32 Strada pavimentata con masselli a doppio ottagono

3.13.5 Checkerblock

Questo tipo di massello rientra nella categoria delle celle aperte, esso é costituito da una serie di elementi troncopiramidali collegati fra loro da nervature (fig 3.33), l'insieme di

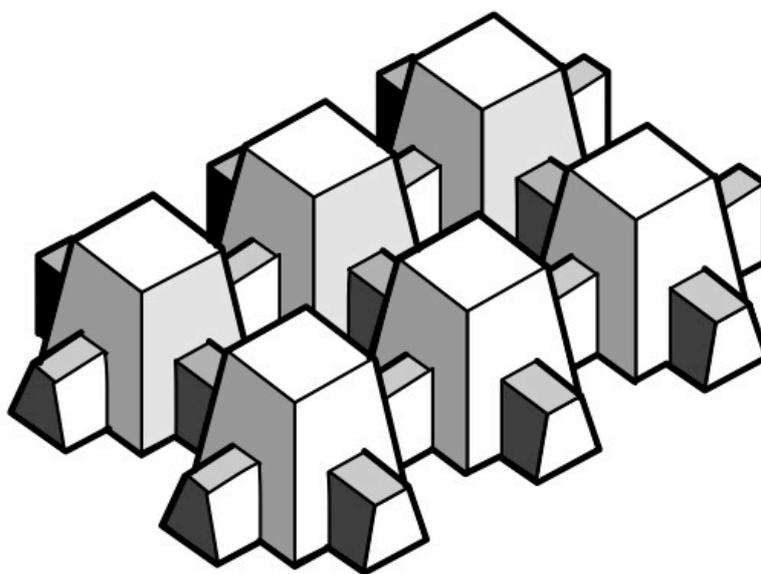


Fig. 3.32 modello del massello Checkerblock

questi elementi creano una serie di ampie zone che possono ospitare gli inerti e il terreno vegetato.

L'ampio volume lasciato per l'inserimento del terreno, rispetto alla massa di calcestruzzo fa sì che si abbia un minor riscaldamento della pavimentazione e una minore essiccazione del terreno vegetato rendendo meno difficoltosa la manutenzione e la persistenza dell'erba; lo svantaggio di questa soluzione è che i pneumatici più piccoli e morbidi possono penetrare e compattare il terreno eccessivamente. (Fig 3.34)

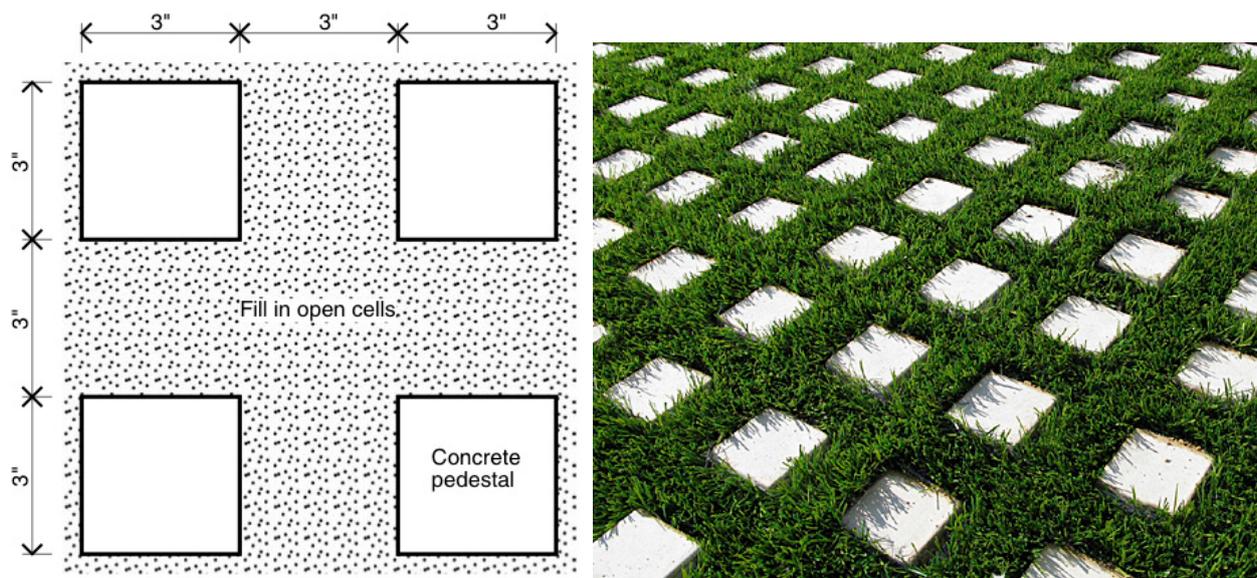


Fig. 3.34 Superficie pavimentata con masselli tipo Checkerblock

Le pavimentazioni di questo tipo risultano poco adattabili ai percorsi pedonali in virtù della loro disomogeneità superficiale in caso di utilizzo con erba, il problema può essere risolto utilizzando nei percorsi un inerte sufficientemente compattato rispettando il livello più alto dei masselli. La resistenza di questo tipo di massello è assicurata dalla presenza di armatura metallica all'interno delle nervature. Le dimensioni sono 50 cm x 50 cm x 10 cm. Osservazioni riportate su pavimentazioni realizzate con questo tipo di massello hanno dimostrato una buona condizione dal punto di vista strutturale, le parti a contatto con i pneumatici mostrano segni d'usura ed è visibile l'aggregato costituente il cls, non sono presenti disallineamenti verticali ed orizzontali nei masselli. Il manto erboso nelle zone trafficate, in particolare nelle corsie di guida, risulta totalmente assente e la quota del terreno a causa della compattazione si stabilizza 1 cm al di sotto del piano di calpestio. Sia l'accessibilità sia la filtrazione nelle zone sottoposte alla pressione dei pneumatici sono molto carenti. Questo tipo di blocco va quindi utilizzato in zone scarsamente trafficate dove si deve dare la priorità alla permeabilità e all'estetica in considerazione della grande percentuale di superficie libera a disposizione per l'inerbimento (75%).

3.13.6 Turfstone

Il Turfstone é un tipo di massello il cui disegno é ripreso da molti produttori. E' costituito da un solido reticolo diagonale in calcestruzzo con all'interno fori quadrati. (Fig. 3.35)



Fig. 3.35 Massello tipo TURFSTONE

Le celle a differenza di altri sistemi sono isolate tra loro, questo permette una superficie con grande accessibilità da parte di pedoni e mezzi con ruote di piccole dimensioni; dal punto di vista vegetativo, a causa dell' alta temperatura che si crea all'interno degli alveoli, l'attecchimento dell'erba risulta difficoltoso rendendo necessaria una costante irrigazione fino a quando le radici non abbiano raggiunto gli strati più profondi. In fase di utilizzo si é notato che la piccola dimensione delle aperture consente un corretto livellamento del terreno e i pneumatici non provocano compattazione del terren

L'irrigazione dovuta alle piogge risulta più che sufficiente in relazione al fatto che la superficie captante è molto più ampia rispetto a quella dei soli fori. La falciatura dell'erba è facilitata dalla superficie molto uniforme facilitando l'uso di macchine segaerba. Nella figura é visibile l'inverdimento su una pavimentazione con volume di traffico medio-basso. (Fig 3.36). L'Effetto heatisland risulta in confronto con altri masselli a celle aperte più

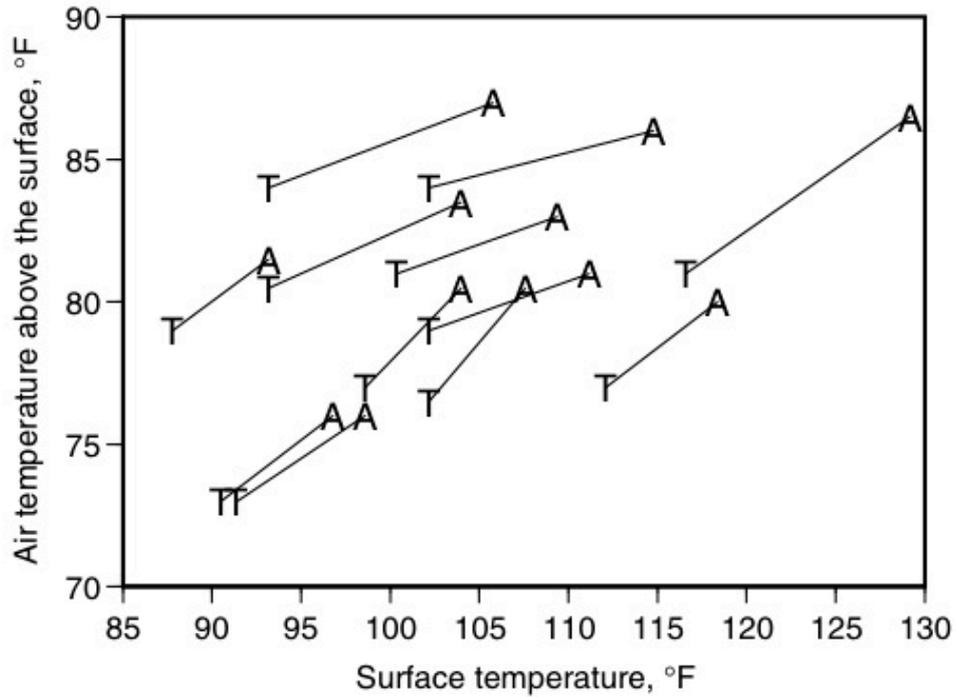


Fig. 3.37 confronto fra temperature dell'aria al di sopra di pavimentazione di asfalto e di turfstone

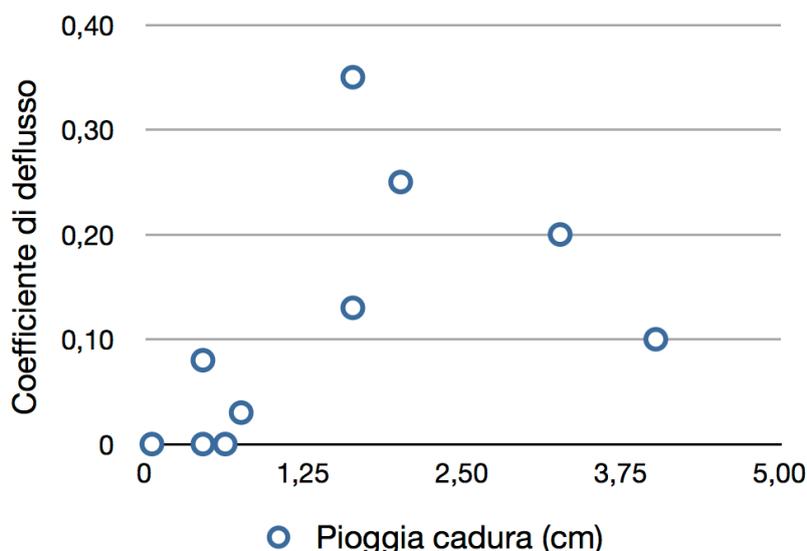
elevato. Varie misurazioni della temperatura effettuate su installazioni reali in confronto a quelle di una pavimentazione di asfalto limitrofa. Confrontando le varie misurazioni si può notare che sia l'aria al di sopra delle pavimentazioni, sia la superficie stessa risulta in tutti i casi molto inferiore nel caso di pavimentazione con masselli tipo turfstone. (Fig. 3.37)



Fig. 3.36 Pavimentazione con masselli turfstone in zona parcheggio

Prove sono state effettuate anche valutando il coefficiente di dilavamento durante 10 eventi naturali di varia intensità e durata durante l'estate e l'autunno. Durante gli eventi di bassa intensità la pavimentazione non ha prodotto runoff, a parità di intensità di pioggia alcuni eventi mostravano la presenza di acqua di deflusso in superficie, questo perché erano stati preceduti da giorni di alta umidità; evidentemente il terreno di riempimento era già molto umido diminuendo la sua capacità di assorbimento (Fig 3.38).

Fig. 3.38 test di runoff



3.13.7 Masselli gettati in opera

Queste pavimentazioni vengono gettate in opera attraverso apposite casseforme. A differenza delle altre soluzioni la pavimentazione non presenta giunti ed è totalmente collegata grazie anche ad una rete metallica elettrosaldata di idonea misura, questa la rende molto resistente anche a carichi di notevole intensità Fig 3.39. Lo spessore di questo tipo di installazione è di circa 12 cm e in funzione del disegno superficiale delle casseforme la superficie permeabile è variabile tra il 50 e il 54%.

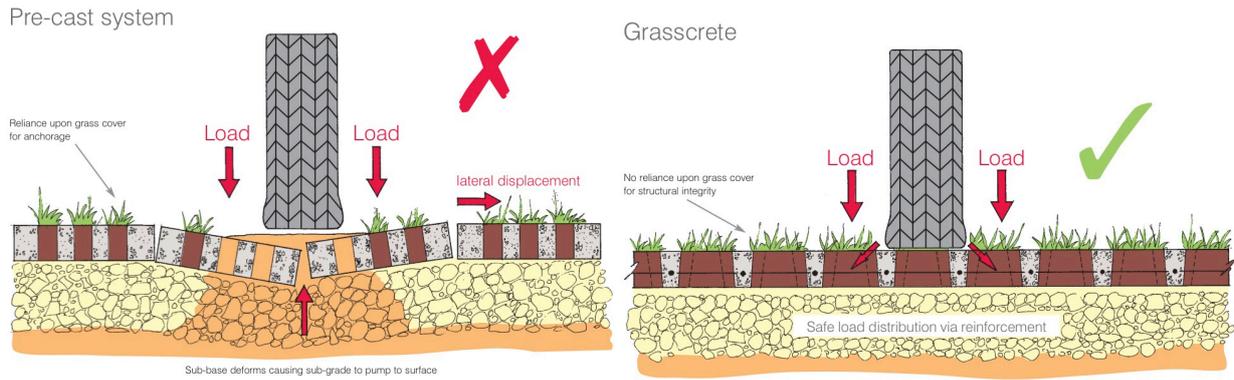


Fig 3.38 Confronto tra carichi su masselli prefabbricati e gettati in opera

Le fasi della preparazione di questa opera si riassumono nella:

Posa della cassaforma plastica sullo strato di allettamento precedentemente preparato (Fig 3.40)



Fig. 3.39 posa della cassaforma su strato di allettamento

La seconda fase consiste nella posa di rete elettrosaldada all'interno della cassaforma (Fig 3.41)

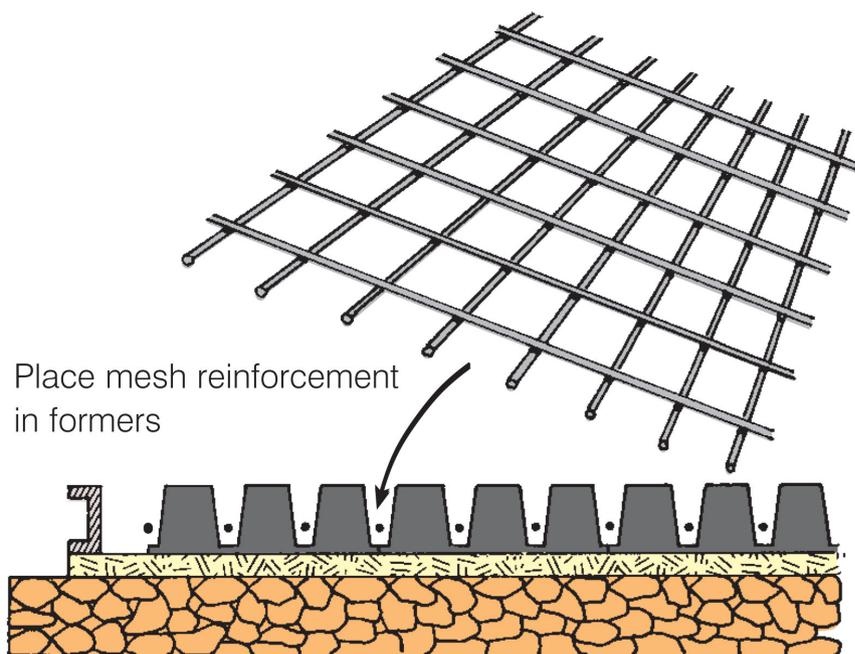


Fig. 3.41 posa della rete elettrosaldata

Terminata la posa, si procede al getto del cls di idonea resistenza e alla staggiatura dello stesso, utilizzando come livello superiore la parte più alta della cassaforma in modo da lasciare la parte plastica a vista (Fig. 3.42).



Fig. 3.42 Getto e staggiatura del cls

Quando il cls é sufficientemente indurito si procede con la fusione dei residui di casseratura attraverso l'uso di cannelli a gas (Fig. 3.43).



Fig. 3.43 Fusione della cassaforma

L'ultima fase consiste nel riempimento dei fori lasciati liberi con il materiale che si ritiene più idoneo per l'installazione, generalmente si utilizza un terreno sufficientemente sabbioso per permettere l'attecchimento dell'erba ma, nel caso si desideri una altissima permeabilità della superficie, si possono utilizzare inerti con grandi granulometrie (Fig. 3.44).

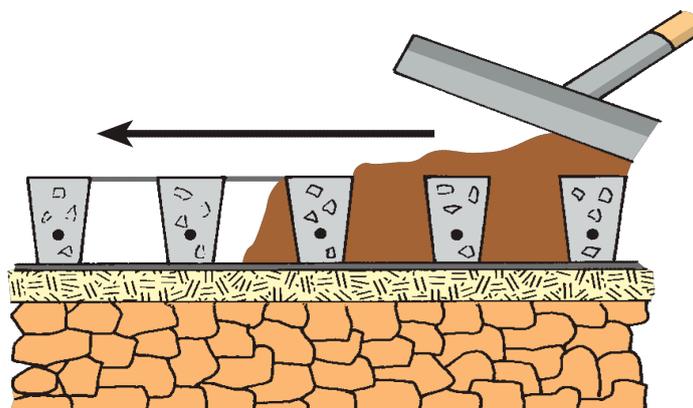


Fig. 3.44 riempimento della pavimentazione con materiale idoneo

3.14 Conclusioni

Con quanto sopra descritto si è voluto mettere in evidenza quanto sia importante l'utilizzo delle pavimentazioni in masselli permeabili in particolare nella gestione delle acque meteoriche in ambito urbano ottenendo vari vantaggi sia economici che ambientali. La possibilità del trattamento degli inquinanti in loco senza predisporre appositi impianti di depurazione; Il minor impatto su infrastrutture già esistenti: è possibile pavimentare aree senza incidere in maniera diretta su condotte già esistenti utilizzando pavimentazioni con alti tempi di corrivazione o attraverso l'uso di riserve. Le superfici drenate consentono una costante accessibilità limitando l'inagibilità dovuta ad allagamenti; l'uso di masselli a celle aperte riduce l'effetto heatisland dovuto a pavimentazioni in asfalto o cls soprattutto se di notevoli superfici; l'arricchimento delle falde acquifere consentito dalle riserve d'acqua ottenute dall'impiego di masselli permeabili e la conseguente infiltrazione nel terreno.

Sebbene il costo di questo tipo di opera risulti maggiore rispetto ad altre soluzioni, in molti casi prendendo in esame una visione complessiva dell'opera e dei vantaggi a breve e lungo termine che essa produce in relazione alla scarsa e relativamente facile manutenzione e al risparmio di molte opere accessorie, le pavimentazioni in masselli drenanti possono risultare vantaggiose nella maggioranza degli interventi.

Capitolo 4 Progettazione delle pavimentazioni in masselli

4.1 Premessa

I danni sulle pavimentazioni a masselli soggette a traffico si evidenziano attraverso la formazione di ormaie in modo del tutto analogo a quelle flessibili di conglomerati bituminosi, è così che possiamo misurare lo stato della sovrastruttura attraverso la profondità delle stesse. Il danno dovuto a crepe nei blocchetti è raro e generalmente non è causato dai carichi sulla pavimentazione ma da carichi impattivi di natura diversa e non viene quindi preso in considerazione nella progettazione. Come in tutte le pavimentazioni l'entità del danno dipende dal numero di assi che transitano e dal loro peso (ESALs), quindi direttamente anche dalla vita prevista della pavimentazione stessa; nel caso di pavimentazioni in masselli si calcola una vita tra i 20 e i 40 anni. Le pavimentazioni in masselli autobloccanti possono essere utilizzate anche in strade in cui la velocità massima però non sia superiore a 70km/h, questa condizione è generalmente verificata in strade urbane classificate secondo il codice della strada come categoria E e F e anche in altri contesti come strade private, di servizio o nelle intersezioni [24]. La progettazione della pavimentazione include quindi anche gli strati più profondi. Le pavimentazioni in masselli vengono assimilate alle sovrastrutture di tipo semirigido o flessibile, esse tendono ad accumulare gradualmente le deformazioni verticali, anche se le deformazioni permanenti sono molto più contenute rispetto a quelle del conglomerato bituminoso. Per effetto della discontinuità costituita dai giunti, tali pavimentazioni sono in grado di sopportare senza danni deflessioni elastiche molto maggiori di quelli ammissibili per le tradizionali pavimentazioni di tipo rigido o flessibile. E' importante sottolineare come le pavimentazioni in masselli tendono ad irrigidirsi sotto l'azione del traffico, per effetto dello sviluppo del fenomeno di ingranamento, portando ad una progressiva diminuzione, fino quasi all'annullamento, delle deformazioni permanenti.

Le pavimentazioni in masselli possono essere progettate attraverso metodologie empiriche che si basano sulla osservazione dei comportamenti storici delle pavimentazioni e metodologie analitico-meccanicistiche che permettono un'analisi del problema in esame attraverso simulazioni computerizzate del comportamento della pavimentazione.

4.2 caratteristiche e parti della pavimentazione a masselli

Le parti del corpo stradale più direttamente interessate dai carichi mobili si possono distinguere essenzialmente in [25]:

- sovrastruttura o pavimentazione;
- sottofondo.

4.2.1 Sovrastruttura o pavimentazione

Indica la parte del corpo stradale costituita da un insieme di strati sovrapposti di seguito specificati, di materiali e di spessori diversi, aventi la funzione di sopportare complessivamente le azioni indotte dal traffico, di trasmetterle e distribuirle in modo attenuato al terreno di appoggio (sottofondo) o ad altre idonee strutture (ad esempio in corrispondenza di opere d'arte) nonché di garantire condizioni di sicurezza e di confortevolezza della circolazione stradale.

La sovrastruttura é normalmente composta dai seguenti strati:

- Strato superficiale;
- Strato di base;
- Strato di fondazione;

4.2.1.1 Strato superficiale

Strato immediatamente sottostante al piano viabile, destinato a far fronte alle azioni locali verticali e tangenziali indotte dai veicoli ed a trasmetterle con intensità attenuata agli strati sottostanti, nonché ad assicurarne le richieste caratteristiche di rugosità superficiale per garantire l'aderenza;

4.2.1.2 Strato di base

Strato intermedio, disposto tra lo strato superficiale e lo strato di fondazione. Esso é deve resistere ai carichi verticali trasmessi localmente dallo strato superficiale ripartendoli sui sottostanti strati di fondazione di minori qualità portanti. Se i carichi a cui é sottoposto sono ingenti e/o la qualità dello strato di sottofondo sia carente é possibile dividere lo strato in due in modo da coprire l'alto spessore con materiali differenti per motivi economici.

4.2.1.3 Strato di fondazione

Parte inferiore della sovrastruttura a contatto con il terreno di appoggio (sottofondo), avente la funzione di trasmettere ulteriormente le azioni verticali ripartendole attenuate al sottofondo; tale strato può mancare nel caso di sottofondi di portanza elevata.

4.2.2 Sottofondo

Si definisce sottofondo il terreno costituente il fondo di uno scavo o la parte superiore di un rilevato, avente caratteristiche atte a costituire appoggio alla sovrastruttura. Tale deve considerarsi il terreno fino ad una profondità alla quale le azioni verticali dei carichi mobili siano apprezzabili ed influenti sulla stabilità dell'insieme (di solito spessori nell'ordine di 30-80 cm)

La progettazione può essere effettuata seguendo linee guida basate sull'esperienza e prove effettuate nel tempo oppure può seguire calcoli basati su esperienze con modelli simulati.

4.3 Progettazione della pavimentazione secondo linee guida

Progettare una pavimentazione in massello significa progettare anche gli strati di base e della fondazione. Le fasi che compongono lo studio della pavimentazione comprendono:

- Definizione della categoria di traffico al quale è soggetta la nostra opera;
- Scelta del tipo di massello e schema di posa;
- Verifica della portanza del sottofondo o terreno di fondazione;
- Progettazione sovrastruttura;

4.3.1 Definizione della categoria di traffico

Al fine dell'utilizzo di questo tipo di pavimentazione è possibile classificare il traffico in 4 classi corrispondenti al numero di veicoli/giorno (Tab. 4.1)

Il traffico da prendere in considerazione è quello per senso di circolazione se la carreggiata stradale è superiore a 6 metri: se la carreggiata è di larghezza inferiore a 5 metri deve essere considerato il traffico complessivo nei due sensi di marcia; se la carreggiata è di larghezza compresa tra 5 e 6 metri deve essere considerato il 75% del traffico complessivo nei due sensi di marcia. Per quanto riguarda le applicazioni per piazzali di movimentazione e stoccaggio containers, porti e/o aree di smistamento, il metodo di dimensionamento universalmente riconosciuto e di riferimento è quello stabilito dalla "British Ports Association - The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and other Industries".

Nel caso di applicazioni molto pesanti in ambito aeroportuale, quali le aree di stazionamento e rullaggio negli aeroporti di prima categoria, si può applicare il metodo della "Civil Aviation Authority - The use of pavers for aircraft pavements - CAA Paper 96001, London".

Tab. 4.1 Definizioni classi di carico

Classe di traffico	Numero di mezzi pesanti con carico utile >5t	Numero di veicoli di peso complessivo >3,5 t	Numero totale di veicoli senza distinzioni e di carico	Descrizione
1	-	-	-	Spazi esclusivamente pedonali; parchi, piscine, marciapiedi; piste ciclabili
2A	-	2	50	Aree cortilive; strade di accesso a lottizzazioni con meno di 10 alloggi; spazi urbani pedonali con accesso a veicoli di servizio; parcheggi residenziali
2B	-	10	200	Strade di accesso a lottizzazioni da 10 a 300 alloggi; strade urbane pedonali con accesso veicoli di servizio per le consegne; parcheggi pubblici, commerciali.
3A	25	30	500	Strade urbane o simili, soggette ad un traffico massimo di 500 veicoli/giorno per senso di circolazione senza distinzione di carico
3B	50	60	700	Strade urbane o simili, soggette ad un traffico massimo di 700 veicoli/giorno per senso di circolazione senza distinzione di carico; parcheggi o aree di manovra lenta di mezzi pesanti (fino a 60 veicoli al giorno di peso complessivo > 3,5 t)
3C	100	125	1000	Strade urbane o simili, soggette ad un traffico massimo di 1000 veicoli/giorno per senso di circolazione senza distinzione di carico; parcheggi o aree di manovra lenta di mezzi pesanti (fino a 125 veicoli al giorno di peso complessivo > 3,5 t)
4	>100	>125	>1000	Strade urbane o simili, soggette ad un traffico di oltre 1000 veicoli/giorno per senso di circolazione senza distinzione di carico; parcheggi o aree di manovra lenta di mezzi pesanti (oltre 125 veicoli al giorno di peso complessivo > 3,5 t)

4.3.2 Scelta del tipo di massello e schema di posa

Per la trasmissione degli sforzi tra elementi contigui attraverso i giunti è evidente che quanto maggiore è tale numero tanto maggiore è la capacità di distribuzione del carico, quindi l'efficienza dei masselli come strato di rivestimento della pavimentazione a parità di orientamento di posa, dimensioni e spessore del massello stesso. La scelta dello schema di posa in opera e di orientamento dello stesso rispetto alla direzione del traffico prevalente condiziona altresì in modo importante la distribuzione delle sollecitazioni. Con riferimento alla figura 4.1 si osservi anzitutto come una disposizione di masselli con assi perpendicolari alla direzione del traffico trasferisca le sollecitazioni principalmente su solo due dei quattro lati disponibili, mentre una disposizione inclinata di 45° rispetto a tale direzione consenta di sfruttare al meglio tutta la superficie laterale disponibile.

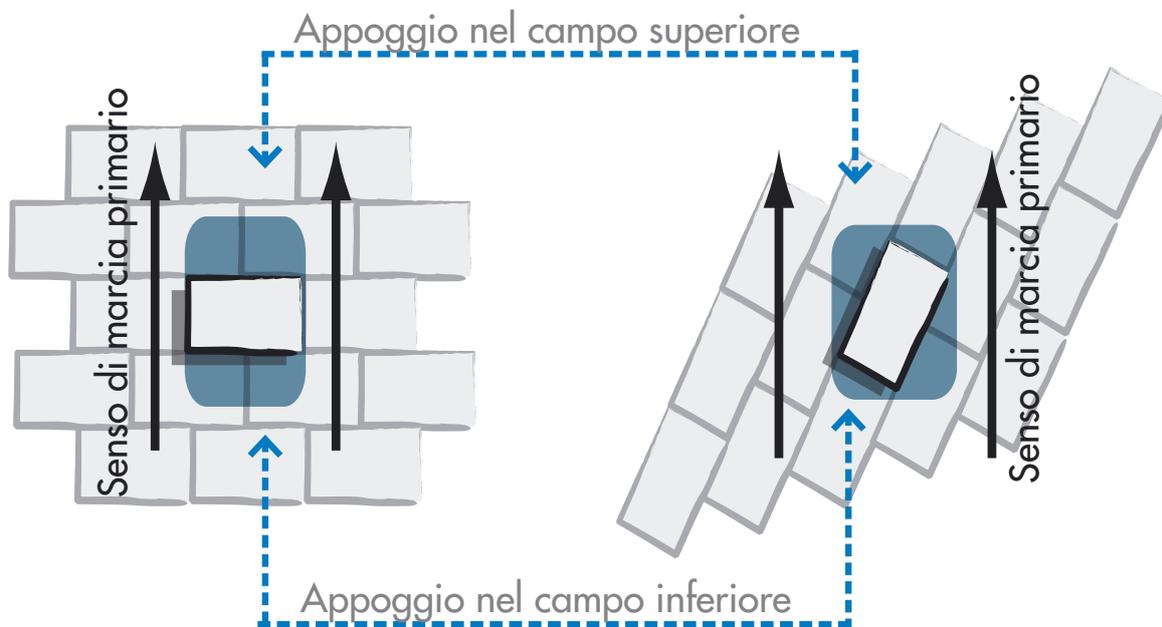
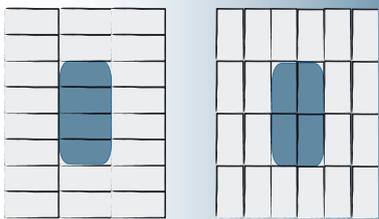
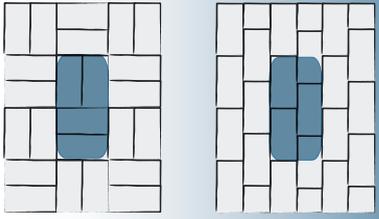
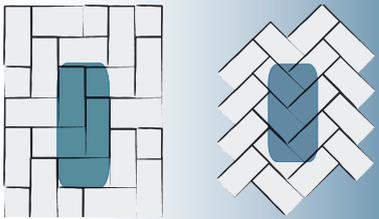


Fig. 4.1 trasferimento dei carichi in funzione della posa

Una ulteriore considerazione deve essere fatta sull'opportunità, all'aumentare della severità di carico, di eliminare la presenza di linee continue di giunti: infatti, per effetto delle sollecitazioni orizzontali (sterzate, frenate, accelerazione degli autoveicoli), se ne osserverebbe il progressivo disallineamento (creep). La variazione dell'ampiezza dei giunti, connessa al fenomeno, è particolarmente dannosa in quanto determina nel tempo la riduzione della capacità di trasmissione dei carichi e quindi dell'autobloccanza. Indipendentemente dalla loro forma, che può essere variabile per motivi estetici o funzionali, l'altezza dei masselli può variare da 4,4 a 10 cm. La scelta tra queste differenti altezze è in funzione della destinazione d'uso della superficie pavimentata e quindi della

classe di traffico. Oltre a considerazioni estetiche, lo schema di posa deve essere progettato in funzione della destinazione d'uso della pavimentazione, considerando le differenti distribuzioni delle sollecitazioni associate a diversi orientamenti del massello. Mentre un tipo di posa "a sorella", cioè con giunti contigui, è adatta per pavimentazioni pedonali o occasionalmente carrabili, pose "a correre" o a "spina di pesce" sono indicate per destinazioni carrabili. Nella tabella 4.2 è possibile determinare in funzione della classi di carico ricavata dalla tabella 4.1 sia lo spessore del massello che lo schema di posa più adatto.

Tab. 4.2 Schemi e spessori dei masselli in funzione della classe di traffico

Classe di traffico		Spessore minimo del massello (cm)	Prescrizioni per lo schema di posa dell'opera	
1		4,5		nessuna
2	A	6		
	B			senza linee continue dei giunti nel senso principale di circolazione
3	A	8		
	B			a lisca di pesce o sistema equivalente
	C			
4		10		

4.3.3 Verifica della portanza del sottofondo

Si definisce sottofondo il terreno costituente il fondo di uno scavo o la parte superiore di un rilevato, avente caratteristiche atte a costituire appoggio alla sovrastruttura. Tale deve considerarsi il terreno fino a una profondità alla quale le azioni verticali dei carichi mobili siano apprezzabili e influenti sulla stabilità dell'insieme (di solito spessori nell'ordine di 30-80 cm). Il sottofondo viene detto migliorato quando viene integrato con materiale arido (correzione granulometrica) o quando viene trattato con modesti quantitativi di legante tali da modificare, anche temporaneamente, le sole proprietà fisiche della terra (quali il contenuto naturale di acqua, la plasticità, la costipabilità, l'indice CBR). Il miglioramento in alcuni casi può essere ottenuto mediante opere di drenaggio, ovvero con l'ausilio di geosintetici. Il sottofondo viene detto stabilizzato quando il legante è in quantità tale da conferire alla terra una resistenza durevole, apprezzabile mediante prove di trazione e flessibile proprie dei materiali solidi. Il legante impiegato è normalmente di tipo idraulico o idrocarburico.

Prima di progettare la sovrastruttura della pavimentazione è necessario verificare la portanza dei sottofondi. Le prove più comuni per questo tipo di valutazione sono:

- Prove penetrometriche;
- Prove CBR;
- Prove di carico con piastra;
- Prova Falling Weight deflectometer (FWD);

Le caratteristiche di portanza del sottofondo devono essere verificate in condizioni di umidità rappresentative delle condizioni climatiche più sfavorevoli. Il valore minimo del modulo di deformazione del sottofondo al fine di utilizzare le linee guida e non rientrare in un calcolo specifico è di 30 N/mm²

In caso di superfici limitate, per cui risulterebbe dal punto di vista economico inadeguato intervenire con prove sperimentali di cui sopra, la portanza del sottofondo può essere valutata osservando il comportamento del suolo sottoposto al passaggio di un mezzo pesante (asse da 13 t) e confrontare i risultati con la tabella 4.2

Tab. 4.2 Classe di portanza con prova empirica

Classe Portanza	Esame visivo del comportamento sotto carico (asse da 13 t)	M_d N/mm ²
0	Circolazione impossibile: terreno non adatto sottofondo molto deformabile	$M_d \leq 15$
1	Formazione ormaie dietro l'asse di prova	$15 < M_d \leq 30$
2	Nessuna ormaia dietro l'asse di prova: poco deformabile	$30 < M_d \leq 50$
3	Nessuna ormaia dietro l'asse di prova: poco deformabile	$50 < M_d \leq 120$
4	Nessuna ormaia dietro l'asse di prova: molto poco deformabile	$120 < M_d \leq 250$
5	Nessuna ormaia dietro l'asse di prova: per niente deformabile	$M_d > 250$

Quando il sottofondo non raggiunge lo standard minimo richiesto é possibile intervenire in vari modalità:

- Trattamento di stabilizzazione del terreno;
- Sostituzione del materiale rimosso dal sottofondo con altri più idonei;

4.3.3.1 Trattamento di stabilizzazione del terreno

Il processo di stabilizzazione consiste nel mescolare le terre argillose con calce e/o cemento di apporto, in quantità tale da modificarne le caratteristiche fisico-chimiche (granulometria, sensibilità all'acqua, umidità) e meccaniche, così da renderle idonee per la formazione di strati che dopo il costipamento presentino adeguata resistenza meccanica e stabilità all'azione dell'acqua ed eventualmente del gelo. I suoli di natura ghiaio-sabbiosa sono generalmente migliorabili mediante un trattamento di stabilizzazione con cemento, in dosaggio compreso tra 3 e 9% sul peso del suolo secco.

I suoli di natura limo-argillosa necessitano invece di un trattamento preliminare a calce (idrata, oppure calce viva nel caso di terreni molto umidi), in dosaggi compresi tra 1 e 2%. Questo trattamento deve essere seguito dopo 24/48 ore da una stabilizzazione a cemento con dosaggi compresi tra 4 e 6%.

Mediante questi trattamenti è possibile ottenere un guadagno di portanza fino a 2 classi. In funzione del traffico e delle caratteristiche del suolo la profondità da trattare con stabilizzazione può variare da 20 a 40 cm.

4.3.3.2 Approfondimento dello scavo

La portanza può, in alternativa a quanto indicato nel punto precedente, anche essere aumentata realizzando una sostituzione del materiale asportato ; in funzione dei materiali impiegati e dello spessore si possono ottenere diversi livelli di guadagno in portanza.

4.3.4 Progettazione della base e della fondazione

Quando si è ottenuto per il sottofondo il valore minimo di portanza si procede alla realizzazione della sovrastruttura (base e fondazione, se necessaria). La deformazione massima ammissibile, utilizzata ai fini del dimensionamento, varia in funzione della destinazione d'uso della pavimentazione, quindi del diverso livello di soddisfacimento delle prerogative richieste quale superficie viabile, e viene indicata per ogni categoria di traffico nella tabella 4.3.

Tab 4.3 dati di progetto per pavimentazioni in masselli

Classe di traffico	deformazione ammissibile	Md minimo nello strato di base
1	15	30
2a	15	30
2b	12	50
3a	12	80
3b	10	120
3c	10	160
4	5	200

Il dimensionamento deve portare a definire la tipologia dei materiali da utilizzarsi e gli spessori degli strati costituenti la sovrastruttura in modo che gli stessi rimangano funzionali per tutta la durata utile di vita della pavimentazione, senza che gli sforzi superino quelli massimi ammissibili sul sottofondo. La scelta del tipo di sezione viene effettuata attraverso la tabella 4.5.

Come si vede, ad ogni classe corrisponderà un possibile schema di installazione e uno spessore minimo dei masselli utilizzati, la forma articolata o parallelepipedica del massello non risulta influire in maniera importante sulle prestazioni, quindi non viene tenuta conto in fase progettuale se non per motivi estetici o economici. In caso di traffico leggero o pedonale l'installazione può avvenire per file parallele mentre per classi superiori è necessario utilizzare uno schema a spina di pesce. I numeri indicano lo spessore in cm.

Tab 4.5 Catalogo delle pavimentazioni in masselli
Classe di traffico

		Classe di traffico							
		1	2A	2B	3A	3B	3C	4	
Classe di portanza	5	Strati di fondazione e base non necessari							
	4	Strati di fondazione e base non necessari							Non prevista per la destinazione d'uso
	3	Strati di fondazione e base non necessari						Non prevista per la destinazione d'uso	
2							Non prevista per la destinazione d'uso	Non prevista per la destinazione d'uso	

Masselli Misto granulare Materiali riciclati

		Classe di traffico							
		1	2A	2B	3A	3B	3C	4	
Classe di portanza	5	Strati di fondazione e base non necessari							
	4	Strati di fondazione e base non necessari							
	3	Strati di fondazione e base non necessari							
2									

Masselli Misto cementato Conglomerato cementizio Misto granulare

Occorre distinguere tra 2 casi:

- la realizzazione di una sovrastruttura di tipo flessibile (materiali non legati);
- la realizzazione di una sovrastruttura di tipo semirigido (materiali legati).

4.3.4.1 Sovrastrutture flessibili

Una sovrastruttura di tipo flessibile è realizzata con materiali naturali non legati. In questo caso si deve tener conto di vari fattori:

- il massimo sforzo verticale in corrispondenza del piano di appoggio della sovrastruttura sul sottofondo al momento dell'apertura al traffico;
- la deflessione sotto carico e la deformazione ammissibile a livello del sottofondo durante la vita utile della pavimentazione e tenendo conto dei fenomeni di fatica;
- gli spessori minimi degli strati di materiali utilizzati per la costruzione della sovrastruttura.

4.3.4.2 Sovrastrutture semirigide

Una sovrastruttura di tipo semirigido è realizzata con misto cementato o calcestruzzo. Il comportamento rigido è caratterizzato dal funzionamento "a lastra" della sovrastruttura, che induce uno sforzo di trazione alla base dello strato.

Il principio di dimensionamento consiste quindi nel mantenere lo sforzo di trazione nella sovrastruttura inferiore a quello ammissibile per il materiale utilizzato.

In questo caso i criteri di dimensionamento sono i seguenti:

- Lo sforzo di trazione ammissibile negli strati della sovrastruttura, tenuto conto dei fenomeni di fatica;
- Gli spessori minimi degli strati di materiali utilizzati per la costruzione della sovrastruttura.

I materiali più comunemente impiegati per la realizzazione di tali strati sono:

- Misti granulari (materiale non legato);
- Materiali riciclati (materiale non legato);
- Misto cementato (materiale legato);

4.3.4.3 Misti granulari

Il misto granulare è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego, eventualmente corretta (migliorata) mediante l'aggiunta o la sottrazione di determinate frazioni granulometriche per migliorarne le proprietà fisico meccaniche. Nella sovrastruttura stradale il misto granulare è impiegato per la costruzione di strati di fondazione e di base. Gli aggregati grossi (trattenuti al crivello da 5 mm) e gli aggregati fini sono gli elementi lapidei che formano il misto granulare.

L'aggregato grosso deve essere costituito da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce di cava o di origine alluvionale, da elementi naturali a spigoli vivi o arrotondati. Tali elementi possono essere di provenienza o di natura diversa purché soddisfino i requisiti della tabella 4.4.

Tab 4.4 requisiti per aggregato grosso nei misti granulari

Parametro	metodo test	fondazione	base
Los Angeles	UNI EN 1097-2	≤ 40%	≤ 40%
Micro Deval umida	UNI EN 1097-1	-	≤ 25%
Quantità di frantumato		-	≥ 60%
Dimensione massima	UNI EN 933 - 1	63 mm	63 mm
Sensibilità al gelo	CNR 80/80	≤ 30%	≤ 20%

L'aggregato fine deve essere costituito da elementi naturali o di frantumazione che possiedano le caratteristiche di cui alla tabella 4.5.

Tab 4.5 requisiti per aggregato fine nei misti granulari

Parametro	metodo test	fondazione	base
Equivalente in sabbia (ES)	UNI EN 933 - 8	≥ 40%	≥ 50%
Indice plastico	UNICEN ISO/TS 17892-12	≤ 6 %	non plastico
Limite liquido		≤ 35 %	≤ 25 %
Passante al 0,075 mm	UNI EN 933 - 1	≤ 6 %	≤ 6 %

La miscela di aggregati per la realizzazione del misto granulare deve avere una composizione granulometrica contenuta nei fusi della fig 4.2 per lo strato di base e 4.3 per strati di fondazione. La dimensione massima dell'aggregato non deve in ogni caso superare la metà dello spessore dello strato di misto granulare ed il rapporto tra il passante al setaccio UNI 0,075 mm ed il passante al setaccio UNI 0,4 mm deve essere inferiore a 2/3.

Il misto granulare è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego, eventualmente corretta (migliorata) mediante l'aggiunta o la sottrazione di determinate frazioni granulometriche per migliorarne le proprietà fisico meccaniche. Nella sovrastruttura stradale il misto granulare è impiegato per la costruzione di strati di

fondazione e di base. Gli aggregati grossi (trattenuti al crivello da 5 mm) e gli aggregati fini sono gli elementi lapidei che formano il misto granulare.

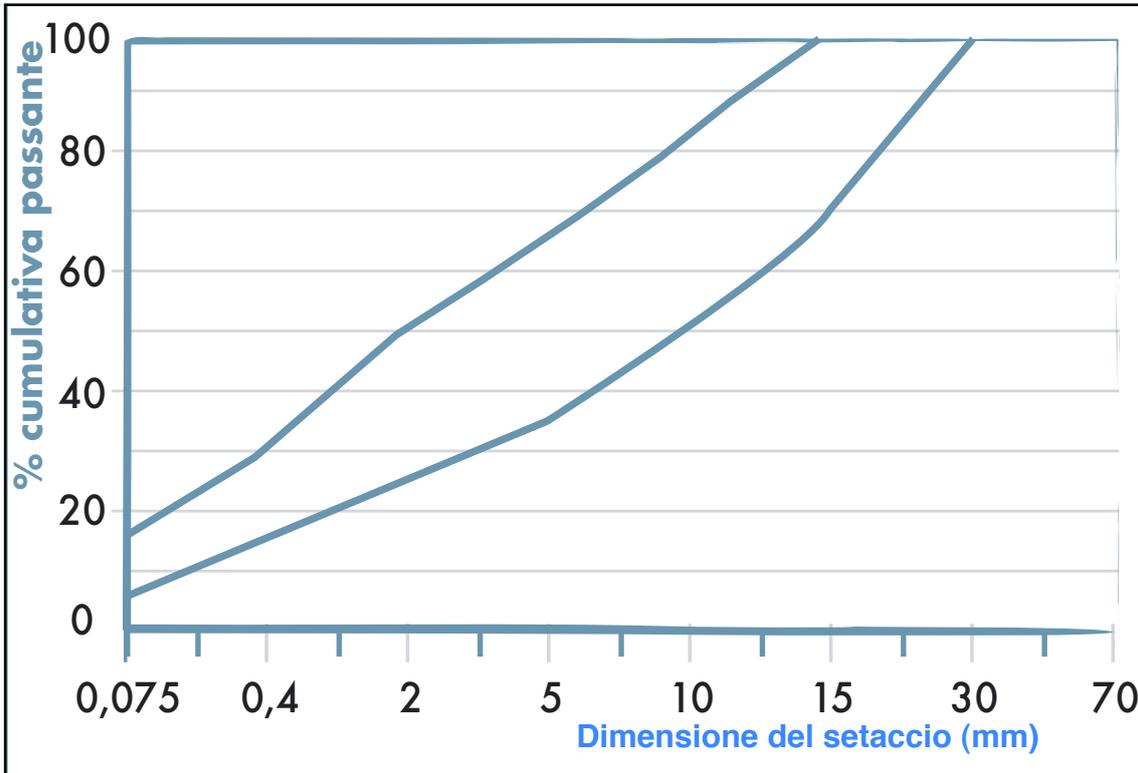


Fig. 4.2 Fuso granulometrico per misto granulare (strati di base)

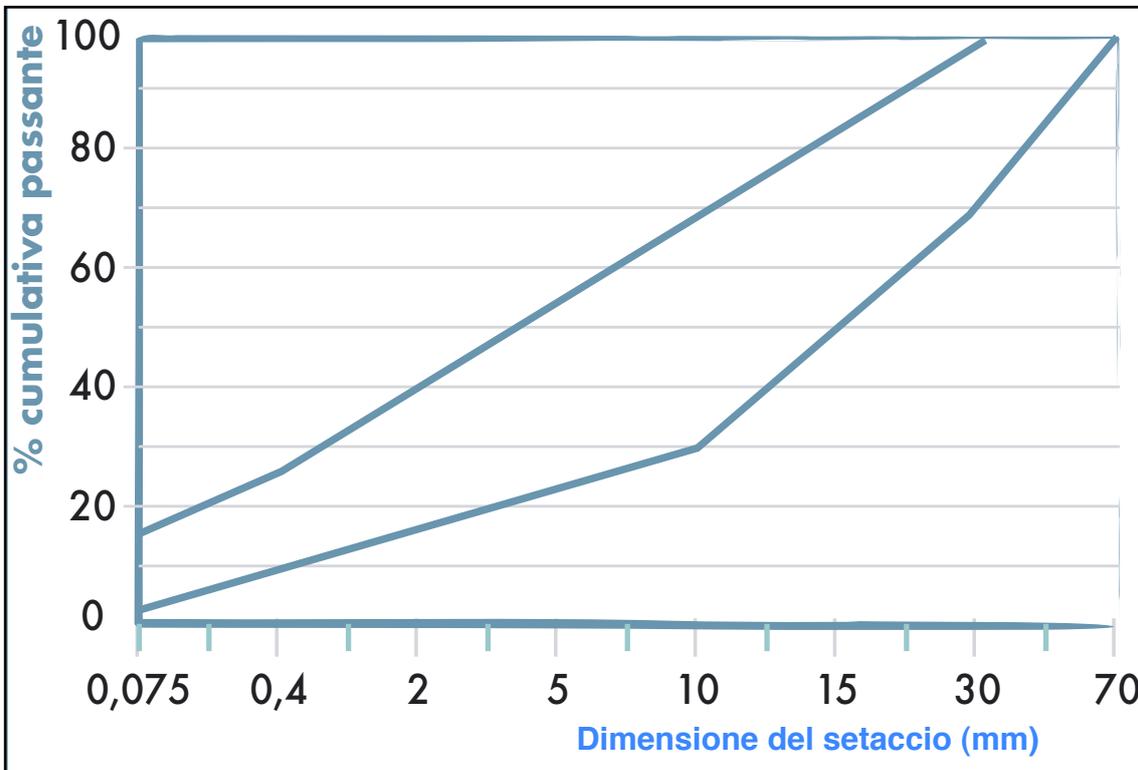


Fig. 4.3 fuso granulometrico per misto granulare per strati di fondazione

4.3.4.4 Materiali riciclati

Si considerano materiali riciclati quelli provenienti da attività di demolizione o di scarto di processi industriali, trattati in impianto di lavorazione ai sensi del D.M. 05/02/1998 n.72 e successive modifiche e integrazioni. I materiali provenienti dall'attività di costruzione e di demolizione sono prevalentemente costituiti da laterizi, murature, frammenti di conglomerati cementizi anche armati, rivestimenti e prodotti ceramici, scarti dell'industria di prefabbricazione di manufatti in calcestruzzo anche armato, frammenti di sovrastrutture stradali o ferroviarie, intonaci, allettamenti di posa, materiali lapidei provenienti da cave autorizzate o da attività di taglio e lavorazione. I materiali di scarto provenienti dai processi industriali sono prevalentemente costituiti da scorie e loppe d'altoforno, esclusivamente di nuova produzione e, comunque, non sottoposte a periodi di stoccaggio superiori a 1 anno. I materiali riciclati possono venire miscelati tra loro ed anche con terre naturali, in modo da favorirne il riutilizzo nelle costruzioni stradali con conseguenti benefici economici ed ambientali. La variabilità di provenienza dei componenti impone di caratterizzarli qualificandoli per lotti o partite omogenee, allo scopo di evitare una non uniformità di comportamento.

4.3.4.5 Misto cementato

Il misto cementato è una miscela composta da aggregati lapidei di primo impiego (misto granulare), trattata con cemento (in quantità solitamente compresa tra il 3 ed il 5% sul peso totale) ed acqua, confezionata in idonei impianti fissi. La miscela deve assumere, dopo un adeguato tempo di stagionatura, una resistenza meccanica durevole ed apprezzabile mediante prove eseguibili su provini, anche in presenza di acqua o gelo. Gli aggregati sono gli elementi lapidei miscelando i quali si ottiene il misto granulare che costituisce la base del misto cementato. L'aggregato grosso (trattenuto al crivello da 5 mm) deve essere costituito da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce lapidee, da elementi naturali tondeggianti, da elementi naturali a spigoli vivi. Tali elementi possono essere di provenienza o di natura diversa purché, per ogni tipologia, risultino soddisfatti i requisiti alla tabella 4.6. L'aggregato fine deve essere costituito da elementi naturali o di frantumazione che possiedano le caratteristiche di cui alla tabella 4.7. Il cemento da impiegare di norma deve essere di tipo normale 32,5 oppure ad alta resistenza 42,5 e soddisfare alle norme e requisiti di accettazione di legge. E' escluso l'impiego di cementi a rapido indurimento. La miscela di aggregati (misto granulare) da adottarsi per la realizzazione del misto cementato deve avere una composizione granulometrica contenuta nel fuso della figura 4.4.

Tab 4.7 requisiti per aggregato fine nei misti cementati

Parametro	metodo test	
Equivalente in sabbia (ES)	UNI EN 933 - 8	$30 \% \leq ES \leq 60\%$
Indice plastico	UNICEN ISO/TS 17892-12	non plastico
Limite liquido	UNICEN ISO/TS 17892-12	$\leq 25 \text{ mm}$
contenuto di rocce tenere, alterate e scistose	CNR 104/84	$\leq 1 \%$
contenuto di rocce degradabili o solfatiche	CNR 104/84	$\leq 1 \%$
contenuto di rocce reagenti con alcali del cemento	CNR 104/84	$\leq 1 \%$

L'acqua con cui viene eseguito l'impasto deve essere esente da impurità dannose e da materie organiche. Le quantità di acqua e legante con cui effettuare l'impasto vengono determinate sperimentalmente in laboratorio, confezionando provini cilindrici normalizzati, sui quali si determinano il peso volume del secco (o densità del secco) e il carico di rottura a compressione. Il valore della resistenza a compressione, determinata secondo le modalità di cui al B.U. 29/1972 del CNR, dopo 7 giorni di stagionatura deve risultare non inferiore a 3 e non superiore a 7 N/mm². Nel caso in cui il misto cementato debba essere impiegato in zone in cui l'azione del gelo non è occasionale, si debbono porre in atto ulteriori indagini e provvedimenti suggeriti dalle condizioni locali di impiego onde evitare l'ammaloramento del misto per effetto del gelo.

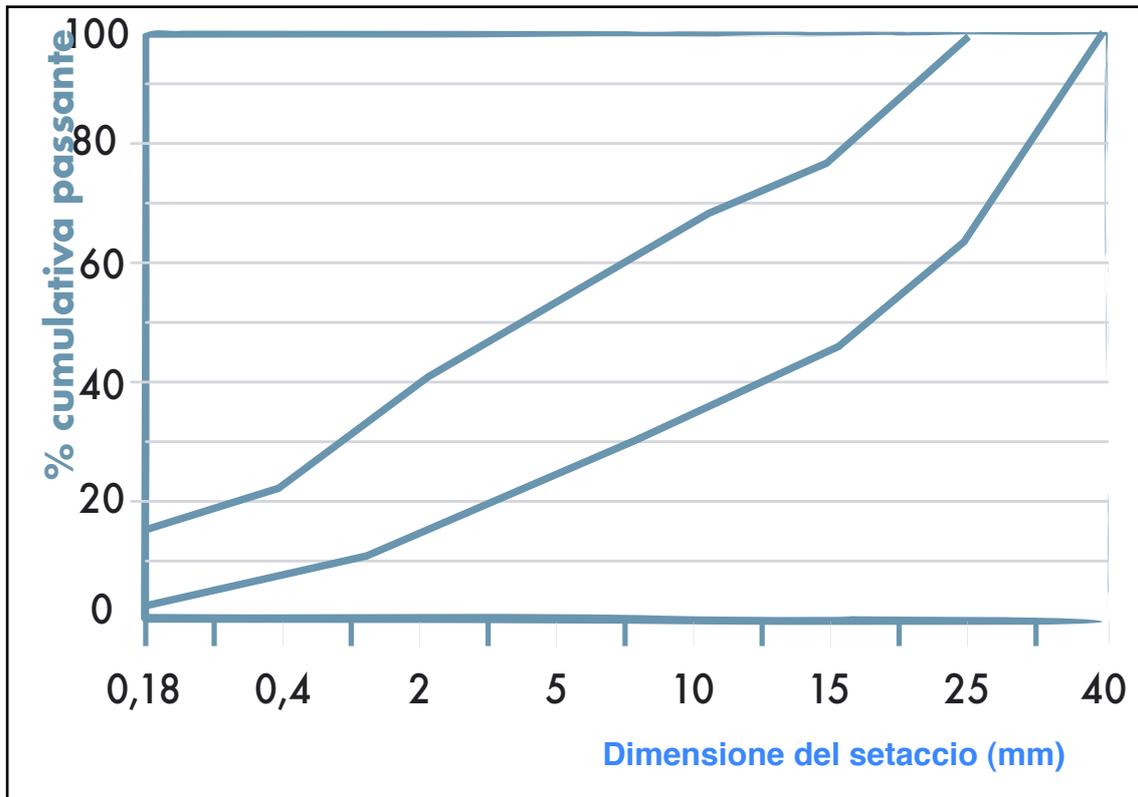


Fig. 4.4 Fuso granulometrico aggregati per misto

Tab 4.6 requisiti per aggregato grosso nei misti cementati

Parametro	metodo test	
Los Angeles	UNI EN 1097-2	$\leq 30\%$
contenuto di rocce reagenti con alcali del cemento	CNR 104/84	$\leq 1\%$
Quantità di frantumato		$\geq 30\%$
Dimensione massima	UNI EN 933 - 1	40 mm
Sensibilità al gelo	CNR 80/80	$\leq 30\%$

4.4 Linee guida statunitensi

Le linee guida statunitensi per la progettazione delle PMA sono pubblicate nel documento (ASCE/TDI 58-10) “Structural design of interlocking Concrete pavement for Municipal streets and Roadways (ASCE 2010)” [26], questo standard viene utilizzato per lo studio di pavimentazioni soggette fino a 10000000 di ESALS con velocità dei veicoli fino a 70 km/h. Lo schema che riassume il processo logico di progettazione (Tab 4.7):

Tab 4.7 schema per la progettazione secondo ASCE/TDI 58-10



4.4.1 Stima degli assi equivalenti

il primo passo consiste nella stima attraverso indagini trasportistiche degli assi equivalenti (ESALs) attesi sulla pavimentazione, la vita utile di queste pavimentazioni viene solitamente progettata per periodi dai 20 ai 40 anni, essa viene calcolata in base anche alle risorse economiche disponibili. La stima viene effettuata considerando il probabile aumento del traffico negli anni avvenire rispetto al momento della misurazione.

4.4.2 Identificazione tipo di terreno e categoria

Consiste nella identificazione e caratterizzazione dello strato di terreno, il modulo di resilienza M_r (AASHTO t-274) é utilizzato per determinare la resistenza del terreno e solitamente viene determinato attraverso test di laboratorio; altre prove per la caratterizzazione del suolo includono la prova CBR (ASTM D1883) e R (ASTM2844). Per l'utilizzo di questa linea guida i vari parametri vengono desunti empiricamente specificando per ogni tipo di terreno osservato una categoria di appartenenza (Tab 4.8) che riassume le categorie del terreno di fondazione classificandole in 8 classi. , le caratteristiche di drenaggio sono desunte ma al fine di una corretta stima dei parametri è necessaria una osservazione del terreno più approfondita.

Tab 4.8 classificazione tipi di

Category No.	Unified Soil Classification	Brief Description	Drainage Characteristics	Susceptibility to Frost Action
1	Boulders/cobbles	Rock, rock fill, shattered rock, boulders/cobbles	Excellent	None
2	GW, SW	Well graded gravels and sands suitable as granular borrow	Excellent	Negligible
3	GP, SP	Poorly graded gravels and sands	Excellent to fair	Negligible to slight
4	GM, SM	Silty gravels and sands	Fair to semi-impervious	Slight to moderate
5	GC, SC	Clayey gravels and sands	Practically impervious	Negligible to slight
6	ML, MI	Silts and sandy silts	Typically poor	Severe
7	CL, MH	Low plasticity clays and compressible silts	Practically impervious	Slight to severe
8	CI, CH	Medium to high plasticity clays	Semi-impervious to impervious	Negligible to severe

4.4.3 Drenaggio nel terreno di fondazione

Attraverso osservazioni in sito é possibile stimare il drenaggio del suolo, il tempo trascorso é tabulato in tabella 4.9, il terreno in esame verrà diviso in tre classi di drenaggio che serviranno per il passo successivo.

Tab 4.9 drenaggio del suolo

Quality of Drainage	Time to Drain	Soil Category No. from Table 3
Good	1 day	1,2,3
Fair	7 days	3,4
Poor	1 month	4,5,6,7,8

4.4.4 Stima delle caratteristiche del terreno

Determinata quindi dal precedente passo la capacità drenante con l'utilizzo della tab. 4.9 si procede alla caratterizzazione del suolo attraverso i valori di M_r , R e del valore CBR tab. 4.10 attraverso la combinazione della categoria del suolo desunta dalla tab. 4.8 e dalle capacità drenanti di tab. 4.9.

Tab. 4.10 valori del modulo resiliente di R e del CBR per i suoli

Category	Drainage								
	Good			Fair			Poor		
	M _r (MPa)	R	CBR	M _r (MPa)	R	CBR	M _r (MPa)	R	CBR
1	90	21	13	80	19	11	70	16	9
2	80	19	11	70	16	9	50	11	5
3	70	16	9	50	11	5	35	7	3
4	50	11	5	35	7	3	30	6	2
5	40	8	4	30	6	2	25	4	2
6	30	6	2	25	4	2	18	3	1
7	27	5	2	20	3	1	15	2	1
8	25	4	2	20	3	1	15	2	1

4.4.5 Scelta del tipo di base

Determinate le caratteristiche del terreno é possibile scegliere le caratteristiche della base utilizzando la tab 4.11, é possibile determinare i vari spessori in funzione dei tipi di basi disponibili nel quaderno della pavimentazioni della guida, essa permette di calcolare le basi in:

- Misto granulare;
- Misto cementato;
- Misto asfaltato;
- Misto cementato;
- cls.

Tab. 4.11 Spessore strati di base

ASPHALT TREATED BASE THICKNESSES (mm) (80% reliability)												
Pavement Drainage	ESALs (x 1,000)	10	20	50	100	200	500	1,000	2,000	5,000	10,000	
	Caltrans Traffic Index	5.2	5.7	6.3	6.8	7.4	8.3	9.0	9.8	10.9	11.8	
Layer Type												
Category 1	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	175
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	200
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
Category 2	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	200
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	150	275
Category 3	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	0	150	275
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	150	300	450

Tab. 4.11 Spessore strati di base

GRANULAR BASE THICKNESSES (mm) (80% reliability)												
Pavement Drainage	ESALs (x 1,000)	10	20	50	100	200	500	1,000	2,000	5,000	10,000	
	Caltrans Traffic Index	5.2	5.7	6.3	6.8	7.4	8.3	9.0	9.8	10.9	11.8	
	Layer Type											
Category 5	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	125	175	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	150	275	375	550	700
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	125	175	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	200	275	375	500	700	825
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	275	325	450	600	775	925
Category 6	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	125	175	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	200	275	375	500	700	825
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	275	325	450	600	775	925
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	150	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	175	275	375	475	600	750	950	1100
Category 7	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	250	300	425	550	750	875
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	125	200	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	250	350	425	550	700	875	1050
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	125	175	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	225	350	450	550	700	825	1025	1200
Category 8	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	275	325	450	600	775	925
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	125	200	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	250	350	425	550	700	875	1050
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	125	175	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	225	350	450	550	700	825	1025	1200

Tab. 4.11 Spessore strati di base

GRANULAR BASE THICKNESSES (mm) (80 % reliability)												
Pavement Drainage	ESALs (x 1,000)	10	20	50	100	200	500	1,000	2,000	5,000	10,000	
	Caltrans Traffic Index	5.2	5.7	6.3	6.8	7.4	8.3	9.0	9.8	10.9	11.8	
	Layer Type											
Category 1	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	150	225	350
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	175	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	150	275	375
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	200	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	175	325	450
Category 2	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	175	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	150	275	375
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	200	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	175	325	450
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	175	300	450	600
Category 3	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	200	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	0	175	325	450
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	175	300	450	600
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	150	200	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	200	325	450	625	750
Category 4	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	175	300	450	600
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	150	200	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	200	325	450	625	750
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Unbound Dense-graded Base	100	100	125	175	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	200	275	375	500	700	825

Tab. 4.11 Spessore strati di base

ASPHALT TREATED BASE THICKNESSES (mm) (80% reliability)												
Pavement Drainage	ESALs (x 1,000)	10	20	50	100	200	500	1,000	2,000	5,000	10,000	
	Caltrans Traffic Index	5.2	5.7	6.3	6.8	7.4	8.3	9.0	9.8	10.9	11.8	
Layer Type												
Category 7	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	150	250	425	575
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	125	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	150	250	375	575	725
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	125	200	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	250	375	525	725	900
Category 8	Good	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	100	175	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	0	150	275	475	625
	Fair	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	100	125	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	150	250	375	575	725
	Poor	Pavers and Bedding	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Asphalt Treated Base	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Unbound Dense-graded Base	100	100	100	125	200	150	150	150	150	150
		Unbound Dense-graded Subbase	0	0	0	0	0	250	375	525	725	900

4.4.6 Scelta del tipo di materiali

Il quinto passo del processo di progettazione riguarda la scelta del tipo di aggregati per lo strato di base, lo standard permette l'uso di materiali sciolti o con leganti.

4.4.6.1 Materiali della base

Per sottofondi senza leganti gli aggregati devono essere di frantoio, nel caso in cui non vi siano prescrizioni particolari in capitolato è consigliata la granulometria prescritta dalla ASTM D 2940 (tabella), la richiesta minima è 80% CBR, una perdita massima del 60% secondo il test CSA A23.2-29A (micro deval abrasion) e una perdita del 40% secondo la prova ASTM 131 o CSA A23,2-17A (prova los Angeles). Lo spessore minimo della base (con aggregati non legati) è di 100 mm per pavimentazioni soggette a meno di 500000 ESALs mentre è di 150 mm per traffici superiori a 500000 ESALs.

le basi costituite da materiale legato possono essere a base di conglomerato bituminoso (ATB) o cementizio (CTB); per gli ATB é consigliato avere una stabilit  alla prova Marshall di 8000N (ASTM D5 o AASHTO t-49), mentre per CTB é richiesta una resistenza minima a compressione non confinata con maturazione a 7 giorni di 4,5 MPa (ASTM D4320 e D4219). Lo spessore minimo per i sottofondi legati é di 100 mm é necessario usare il legante opportuno in relazione alle condizioni climatiche della zona.

4.4.6.2 Materiali di fondazione

Per quanto riguarda la scelta dei materiali dello strato di fondazione in assenza di prescrizioni specifiche é possibile usare le prescrizioni della ASTM D2940; i requisiti minimi sono 40% alla prova CBR e un indice di plasticit  massimo di 10 con un limite liquido di 25 (ASTM D4318 AASHTO T-90).

Importante é la compattazione del sottofondo che deve essere almeno il 95% della prova Proctor standard (AASHTO T-99 o ASTM D1557) per terreni coesivi e il 95% della prova Proctor modificata (AASHTO T-180 o ASTM D 1557) per terreni non coesivi. La profondit  reale di compattazione deve essere di almeno 300mm, terreni con Mr minore di 31 MPa devono essere soggetti alla valutazione di un eventuale sostituzione con materiali pi  adatti; si fa notare nelle guide che la compattazione di tutti gli strati é un'operazione fondamentale nelle procedure per la costruzione delle pavimentazioni e bisogna prestare particolare attenzione alle zone vicino ai cordoli, pozzetti, altre strade dove l'operazione mediante macchine vibrocompattatrici risulta pi  difficile.

4.4.6.3 Materiali dello strato di allettamento

Lo spessore della sabbia di allettamento deve essere inferiore ai 25mm dopo la compattazione, strati molto sottili non producono in fenomeno di LOCKUP ottenuto dalla migrazione della sabbia all'interno dei giunti durante la compattazione iniziale mentre uno strato pi  grosso porterebbe ad una possibile instabilit  dei blocchetti. La granulometria della sabbia di allettamento deve essere conforme alla ASTM c33, é sconsigliato l'utilizzo di brecce o polvere di roccia.

La sabbia nei giunti é responsabile dell'ingranamento verticale e del trasferimento del carico per taglio fra i masselli, essa pu  essere pi  fine della sabbia di allettamento e dovrebbe rientrare nella granulometria della ASTM c144 o CSA A179 con un 100% di passante al setaccio n 16 (1.18mm) e non pi  del 5% al n 200 (0,075mm), nel caso di utilizzo della stessa sabbia di allettamento per i giunti bisogna prevedere una compattazione pi  energica in fase di installazione.

4.4.5 Scelta del tipo di masselli

I masselli devono soddisfare le specifiche dell'ASTM C936 (in Italia UNI EN 1338), per questo standard il rapporto lunghezza/spessore deve essere al massimo 3:1 e lo spessore minimo di 80mm, l'installazione corretta è secondo lo schema Herringbone a 90° o 45° (spina di pesce). Come precedentemente affermato anche queste guide non considerano strutturalmente differente il comportamento tra le varie forme di blocchetti considerandoli quindi equivalenti.

4.5 Analisi FEM delle pavimentazioni in masselli

Per molti anni, la progettazione delle pavimentazioni in masselli autobloccanti si é basata esclusivamente su metodi sperimentali e su esperienze maturate riguardo al comportamento di opere precedentemente realizzate; tuttavia, recentemente il metodo FEM per le analisi é stato sempre più utilizzato. Il metodo risulta molto interessante specialmente quando il modello meccanicistico della pavimentazione tiene in considerazione il comportamento non lineare e coesivo dei materiali granulari utilizzati nelle pavimentazioni.

L'analisi elastica, che é la base del comportamento lineare, offre le basi per la comprensione del comportamento delle tensioni e delle deformazioni, tuttavia questo tipo di modellazione comporta delle limitazioni, questo perché il comportamento reale del tipo di materiali in uso nelle pavimentazioni non può essere descritto in termini di diretta relazione tra sforzo e deformazione. L'idea chiave é di valutare le tensioni e le deformazioni sotto carichi dovuti ai vari mezzi al fine di poter prevedere la vita utile della pavimentazione oppure calcolare gli spessori necessari e la composizione dei vari strati per raggiungere le prestazioni adeguate all'opera. Un requisito necessario al fine di un corretta simulazione é l'acquisizione di valori precisi caratterizzanti i materiali oggetto di studio e l'utilizzo di un modello di comportamento il più aderente possibile alla realtà.

4.6 Comparazione fra diversi tipi di modellazione

Una analisi globale del comportamento delle pavimentazioni in masselli é stato condotto attraverso quattro tipi di modellazione:

- Bidimensionale lineare;
- Bidimensionale non lineare;
- Tridimensionale lineare;
- Tridimensionale non lineare;

Al fine di determinare l'accuratezza delle analisi svolte é stata effettuata una comparazione tra gli sforzi verticali ottenuti dalle simulazioni e quelli derivanti da una prova di laboratorio con un modello reale di pavimentazione. Le analisi sono state effettuate con il modellatore ANASYS.[27][28]

Sono stati utilizzati tre metodi al fine di analizzare il comportamento del modello:

- Modified slab analysis [29]
- Layer elastic analysis [30]
- Finite element analysis [31]

la limitazione dei precedenti é la non considerazione delle discontinuità esistenti in una pavimentazione a masselli e assumono che la modellazione sia fatta in termini di materiali omogenei e continui, tuttavia la modellazione dello strato dei masselli viene realizzata considerandoli elementi discreti con i propri carichi e spostamenti e considerando la trasmissione degli sforzi attraverso i giunti.

Il caso preso in considerazione per lo studio e il confronto dei modelli precedentemente indicati é uno studio di traffico su pavimentazioni di masselli [16]. Le tensioni dopo 10000 cicli di carico sono state misurate con vari sensori posti sotto i masselli, sotto la sabbia di allettamento, sotto lo strato di base e a 470mm sotto il piano viario.

4.6.1 Caratteri geometrici e fisici del modello utilizzato

lo schema delle modellazioni bidimensionali e tridimensionali sono riportati in fig. 4.4.

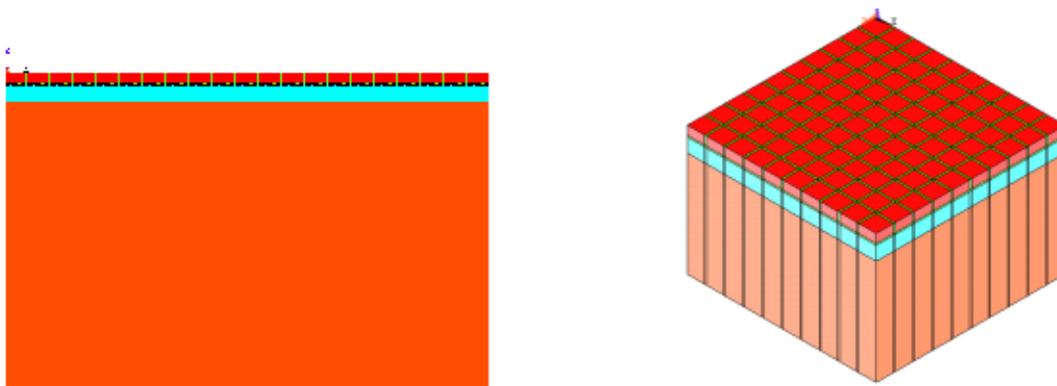


Fig. 4.4 schema dei modelli 2D e 3D della pavimentazione

Il modello 2D é composto da 21 masselli di 20 cm di larghezza e 10 cm di spessore, lo spessore dello strato di allettamento é 2 cm e lo strato di base 16 cm, lo strato di suolo é limitato a 122 cm; nel modello 3D la larghezza della superficie é di 218 cm x 218 cm ed é composta da 100 masselli di 20 cm x 20 e 10 di spessore. Le dimensioni e i vincoli del modello sono stati calcolate in modo da non avere effetti dei bordi limitati sulla simulazione stessa. Le proprietà dei materiali immessi nel modello matematico rispecchiano quelle costituenti il modello fisico della sperimentazione presa come riferimento. Tab 4.11

Tab. 4.11 caratteristiche dei materiali coinvolti nel test

strato	E (Mpa)	ρ (kN/m ³)	ν	C (kN/m ²)	ϕ (deg)
Masselli di cls	2500	20	0,3		
Sabbia di allettamento e riempimento	350	18	0,35	10	30
Strato di base	225	18	0,35	10	30
Sottofondo	225	18	0,35	10	30

4.6.2 Risultati delle simulazioni FEM

La Tab 4.12 indica i valori delle tensioni valutate con i quattro tipi di modellazione e i valori reali misurati.

Tab. 4.12 tensioni verticali alle varie profondità

Posizione	analisi 2D lineare (kPa)	analisi 2D non lineare (kPa)	analisi 3D lineare (kPa)	analisi 3D non lineare (kPa)	Misure sperimentali (kPa)
Sotto i masselli	300	328	257	302	300
sotto strato allettamento	330	340	146	164	150
sotto strato di base	208	232	100	108	100
470mm sotto il piano	109	113	47	48	45

Nel caso della analisi bidimensionale, anche se c'è una certa concordanza tra i valori numerici delle tensioni sotto ai masselli rispetto al valore sperimentale, si nota una forte differenza negli strati inferiori; la ragione di questa discordanza è probabilmente dovuta alla incapacità del modello bidimensionale di modellare il comportamento discontinuo tridimensionale dei masselli.

Nel caso della simulazione tridimensionale si è verificata una buona concordanza tra i risultati ottenuti, quelli calcolati con approssimazione lineare e non lineare; considerando il grande impegno di calcolo necessario per la simulazione tridimensionale con comportamento non lineare si afferma che ai fini dello studio e della progettazione delle pavimentazioni può essere sufficiente un approccio tridimensionale lineare.

4.7 Analisi parametrica di una pavimentazione con metodo FEM 3D non lineare

Basandosi su una modellazione tridimensionale con comportamento non lineare é stato studiato il comportamento di una pavimentazione composta da masselli in cls posati secondo uno schema di posa herringbone. Valutata in una prima fase l'attendibilità del modello attraverso misure comparate con un test in laboratorio, si é proceduto ad uno studio parametrico agendo sulle variabili della pavimentazione stessa quali larghezza dei giunti, dimensioni dei masselli, resistenza dei masselli e spessore dei masselli al fine di elaborare un modello valido ai fini della progettazione della pavimentazione.[28]

4.7.1 Modello in esame

Il modello in esame (Fig.4.5) ha larghezza di 755mm altezza 755 mm e una profondità di 450 mm; esso é costituito da masselli di 106 mm di larghezza 212 mm di lunghezza e 80 mm di spessore, posati secondo uno schema herringbone.

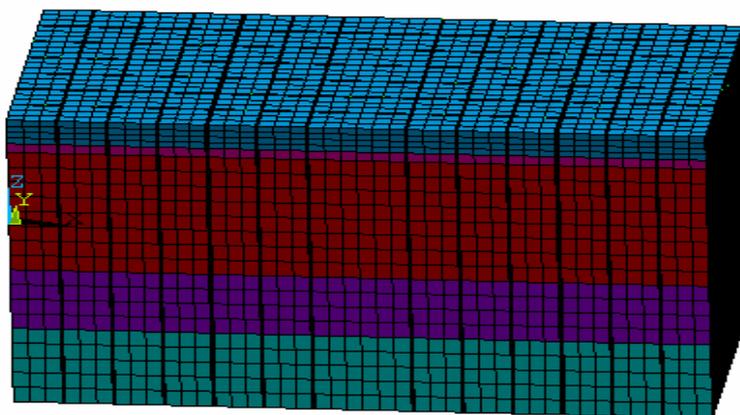


Fig. 4.5 Modello tridimensionale in esame

La pavimentazione é modellata secondo una combinazione di elementi solidi (masselli,giunti, base e sottofondo) separati da elementi di contatto.

il carico applicato é uniforme e circolare e applicato sul piano dei masselli mentre le proprietà dei materiali utilizzati nel modello sono quelle di tab.4.11.

4.7.2 Verifica del modello

Al fine di valutare la correttezza del modello matematico si é provveduto a realizzare in laboratorio un test su una pavimentazione costruita con masselli e caratteristiche omologhe a quelle del modello. i risultati derivanti confermano l'attendibilità della modellazione (Fig. 4.6)

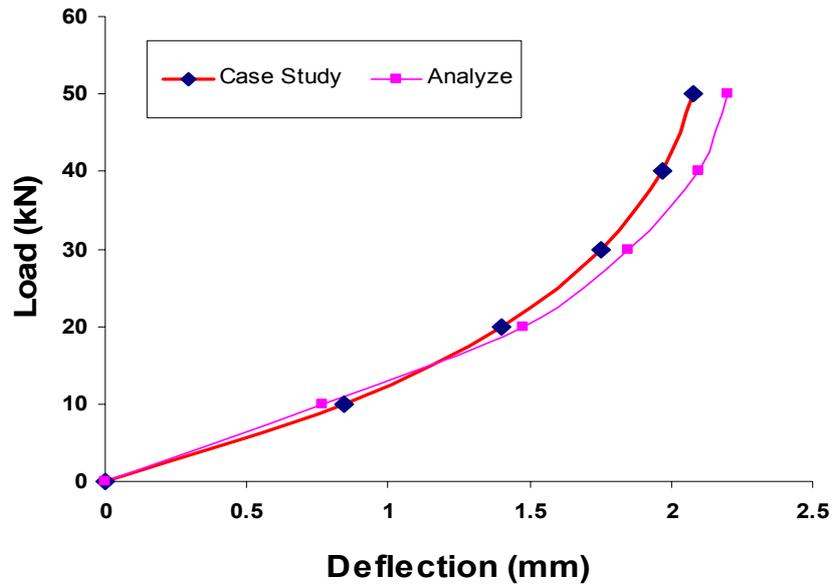


Fig.4.5 comparazione fra cedimenti nel modello matematico e in laboratorio

4.7.3 Studio parametrico

i seguenti risultati sono stati ottenuti variando il parametro in questione e ricalcolando i cedimenti dopo 10000 cicli di carico.

4.7.3.1 larghezza dei giunti

la Figura 4.6 mostra l'effetto della variazione di dimensione dei giunti a parità di tutti gli altri parametri del modello.

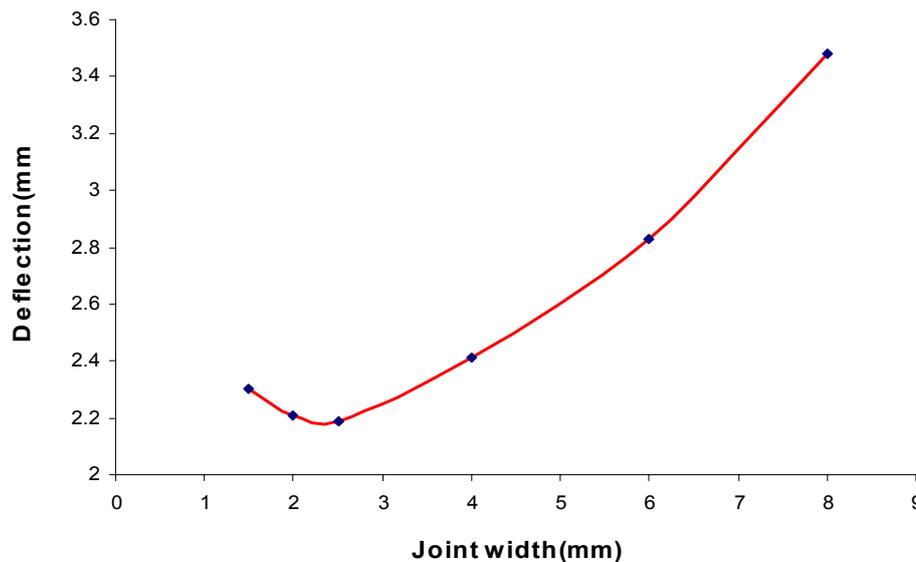


Fig. 4.6 Cedimento in funzione della larghezza dei giunti

Come si nota partendo da un giunto di 1,5 mm e aumentandone la larghezza il cedimento della pavimentazione diminuisce fino ad una larghezza di 2,3 mm al quale

corrisponde un cedimento di 2,15 mm; un successivo aumento comporta probabilmente una diminuzione dell' effetto di ingranamento con la conseguente diminuzione di rigidità dei giunti, una maggiore rotazione dei masselli e quindi una degradazione della pavimentazione stessa.

4.7.3.2 Dimensione dei masselli

Sono state analizzate tre dimensioni dei masselli aventi la stessa altezza, ogni test é stato effettuato secondo lo schema di posa herringbone. La figura 4.7 mostra la risposta della pavimentazione al cedimento in funzione della dimensione del massello.

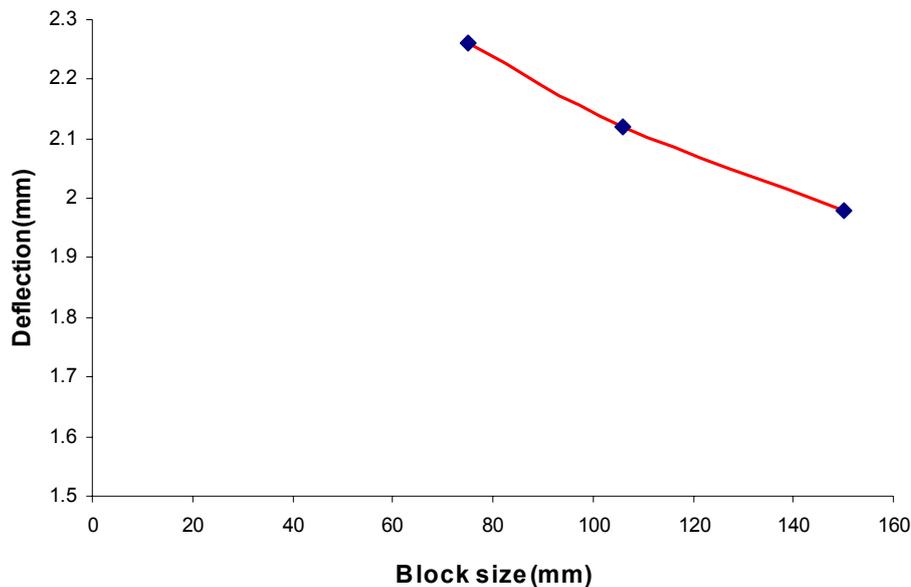


Fig. 4.7 Cedimento in funzione della dimensione dei masselli

I cedimenti minori si sono ottenuti con il crescere della dimensione, l'utilizzo di elementi di dimensioni maggiori crea quindi pavimentazioni con migliori performance. Bisogna comunque considerare il rapporto spessore/larghezza al fine di evitare sforzi flessionali eccessivi.

4.7.3.3 Resistenza dei masselli

L'analisi é stata condotta su tre differenti masselli con resistenze rispettivamente di 25, 30 e 42 MPa, i masselli sono posti in opera secondo lo schema herringbone. il cedimento é risultato praticamente uguale in tutti i casi. (Fig 4.8) La natura discontinua della pavimentazione e la dimensione piccola dei masselli provoca una deformazione flessionale trascurabile.

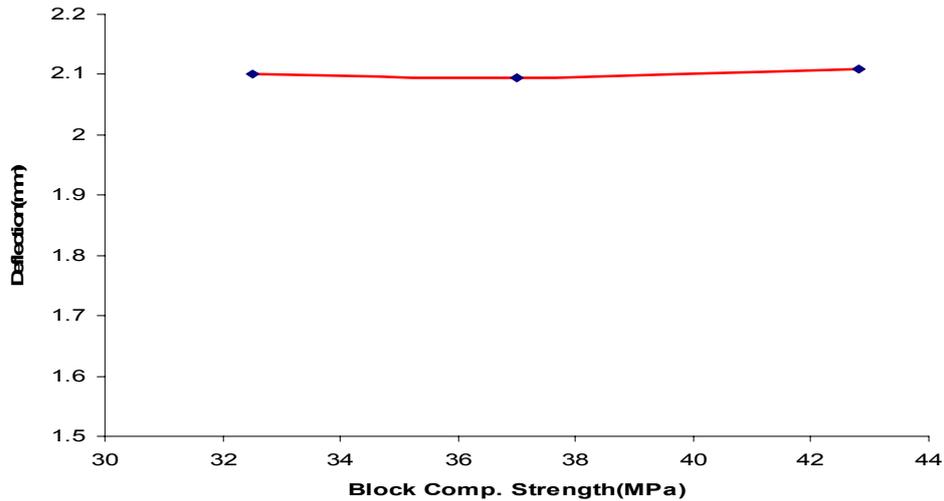


Fig. 4.8 cedimento in funzione della resistenza a compressione dei masselli

4.7.3.4 Spessore dei masselli

Sono stati testati 3 spessori di uso commerciale 100, 80 e 60mm i masselli sono posti in opera secondo lo schema herringbone. La differenza di cedimento fra i masselli di 60 e 100 mm é evidente (fig.4.9)

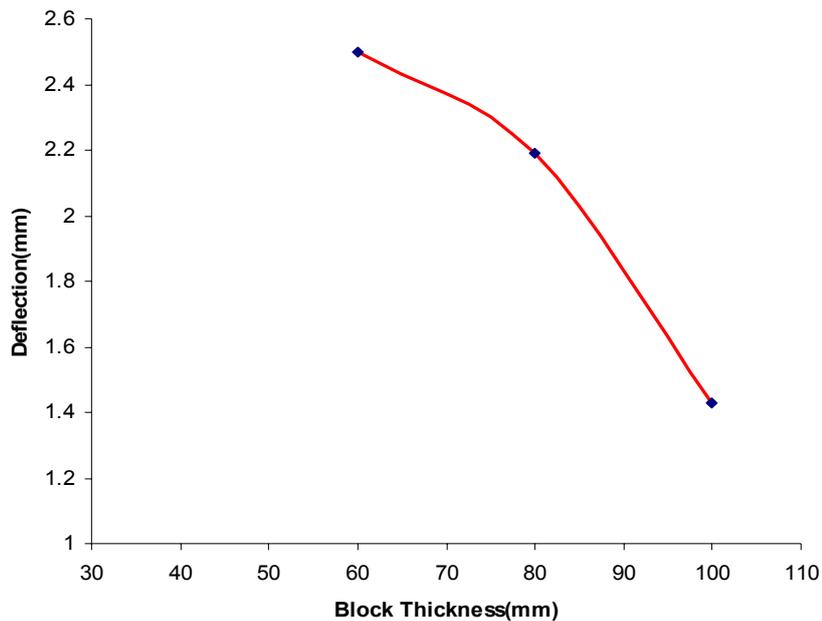


Fig. 4.9 Cedimento in funzione dello spessore dei masselli

Masselli con spessori maggiori hanno un'area di frizione maggiore e quindi le tensioni trasferite risultano più alte facendo collaborare i masselli in modo migliore.

4.8 Studio delle spinte orizzontali

L'analisi condotta nel paragrafo precedente ha condotto anche allo studio del meccanismo di ingranamento attraverso lo studio dei movimenti dei masselli (Fig 4.10)

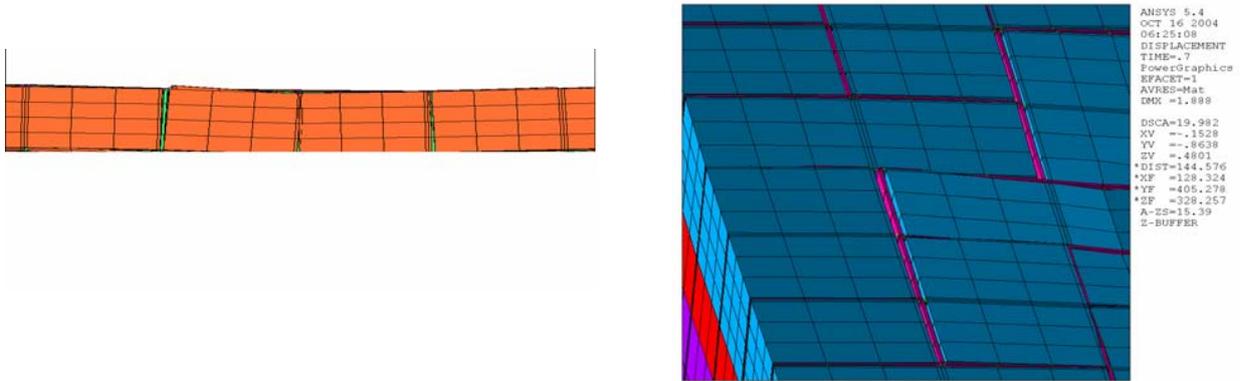


Fig. 4.10 Rotazione dei masselli

Sebbene le pavimentazioni in masselli risultino visivamente piane anche sotto ai carichi, i masselli che le compongono hanno piccole rotazioni che portano alla creazione di forti spinte orizzontali (Fig. 4.11) nei confronti dei masselli attigui.

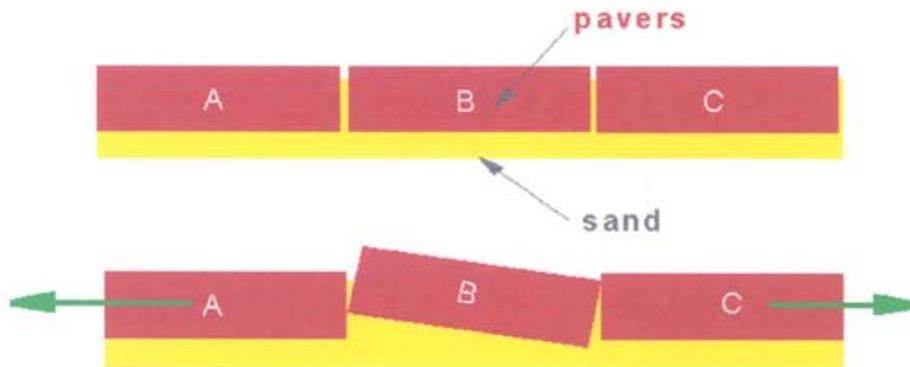


Fig. 4.11 spinte orizzontali tra masselli

Queste forze spiegano perché lo strato di masselli si comporti come una parte strutturale della pavimentazione e non come un semplice rivestimento.

4.9 Simulazione con carichi orizzontali

Lo studio dello stato di tensione e deformazione è stato condotto [32] con il metodo degli elementi finiti (FE) applicato ad un modello tridimensionale di una porzione della pavimentazione MAC 1.50 m x 1.50 m. La messa in opera del programma avviene in due fasi successive:

- Determinazione delle caratteristiche fisiche rientranti nel calcolo dell'energia, in particolare: il modulo di Young (E), il coefficiente di Poisson (μ) dei singoli strati, coesione e angolo di attrito interno, le forze di superficie agenti sul modello, per l'energia le condizioni al contorno del modello;
- Determinazione delle caratteristiche geometriche del modello.

La "mesh", cioè la scomposizione del continuo in elementi finiti, è realizzata su piani paralleli definendo il numero e la grandezza degli elementi costituenti il modello. Questa scomposizione è funzione della struttura reale, ma anche del grado di precisione cercato: più il numero degli elementi è grande, più precisi saranno i risultati. Il calcolo è stato eseguito con un modello costituito da elementi soggetti ad una carico normale gravante su un'area di impronta circolare con diametro 30 cm. Il sistema è stato vincolato impedendo gli spostamenti laterali e verticali su tutto il contorno. I vincoli di semplice appoggio agenti nel piano orizzontale, impediscono gli spostamenti dei masselli al contorno in senso laterale in modo da simulare le forze di confinamento che nella realtà, sono rappresentate dalla presenza di tutta la restante pavimentazione.

L'azione di confinamento e la traslazione verticale impedita sul contorno sono gli unici vincoli esterni a cui è soggetto il modello.

Il modello analitico è stato sottoposto a due forze :

- Un carico è di 40.000 N, applicato nei nodi centrali della mesh, ortogonalmente al piano della pavimentazione,
- Una forza tangenziale di 20.000 N (Fig 4.12).

Questo serve a simulare il comportamento della pavimentazione sollecitata da grossi carichi concentrati dove sono presenti veicoli pesanti in movimento, che sollecitano la pavimentazione con sforzi tangenziali dovuti alle manovre di accelerazione, frenatura, azioni centrifughe in curva, etc.

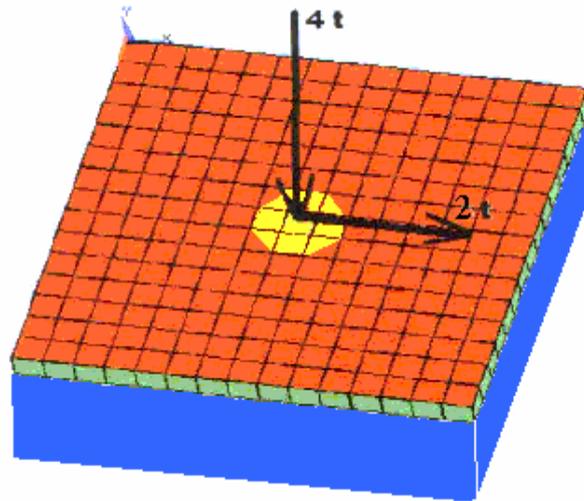


Fig. 4.12 Forze applicate nel modello

Nello studio sono stati considerati masselli di forma parallelepipedica (98mm x 192 mm, con spessore variabile e giunti di 2 mm), con diverse disposizioni, studiando una procedura automatica di discretizzazione del modello. Ciò rendeva necessario elaborare mesh differenti per ciascuna disposizione. Il problema è stato risolto con il graticcio mostrato in figura 4.13.

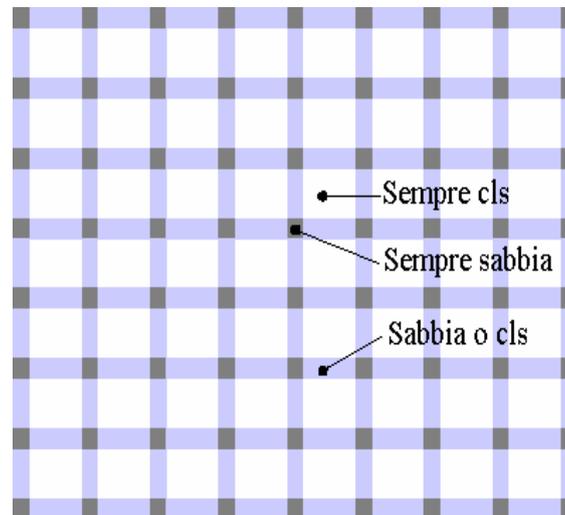


Fig. 4.13 Mesh modificabile del modello

Il modello è formato da bande sottili e bande più spesse (non in proporzione nella figura) che rappresentano rispettivamente lo spessore dei giunti e quello dei masselli. Ai quadrati più grandi sono sempre assegnate le caratteristiche dei materiali di cui sono formati i masselli (cls), a quelli più piccoli di forma quadrata le caratteristiche della sabbia dei giunti, mentre ai rettangoli formati dall'intersezione di una banda piccola ed una grande, sono state assegnate le caratteristiche del materiale dei giunti o del materiale dei masselli a seconda della diversa distribuzione assegnata alla pavimentazione. Con questo

artificio ogni possibile configurazione planimetrica dei masselli può essere facilmente elaborata cambiando le caratteristiche dell'elemento finito, a seconda dei casi. I masselli autobloccanti di forma rettangolare hanno la possibilità di essere disposti in svariati modi.

Sono state oggetto di studio quattro tra i più comuni schemi di posa, al fine di poter confrontare i risultati ottenuti. Le quattro disposizioni studiate sono mostrate nella figura 4.14

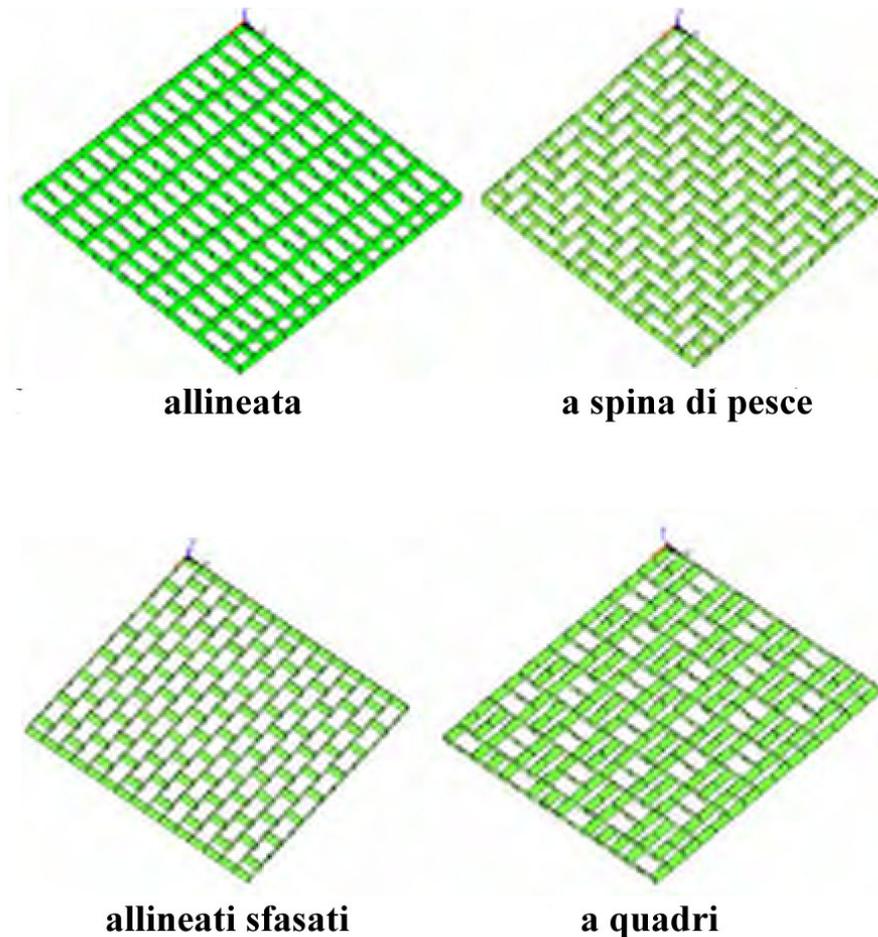


Fig. 4.14 Tipo di pose simulate

Nell'analisi ad elementi finiti i calcoli sono stati iterati modificando gli spessori dei masselli (6, 8 e 10 cm).

4.9.1 Verifica sperimentale

Al fine di verificare il modello numerico, sono state realizzate in laboratorio 3 pavimentazioni (configurazione a spina di pesce, allineata, a quadri) con la stessa geometria e gli stessi materiali dell'analisi FEM, ponendo particolare cura nella realizzazione dei giunti e nel confinamento laterale.

Per simulare il vincolo di contenimento esterno lungo il perimetro della pavimentazione, è stata costruita una cornice in profilati in acciaio tipo UPN. Tale cornice

ha la possibilità di essere regolata tramite la presenza di bulloni nei suoi quattro spigoli; essa permette di applicare alla struttura forze orizzontali di compressione lungo tutta la superficie perimetrale del modello. Il carico è stato applicato tramite una piastra circolare di 30cm di diametro, poggiata sulla parte centrale della struttura. Il supporto elasto-plastico è stato realizzato con due strati di materiale diversi. La verifica del modello si basa sul bacino di deflessione ottenuto nella simulazione FE e quello misurato in laboratorio (Fig 4.15) .

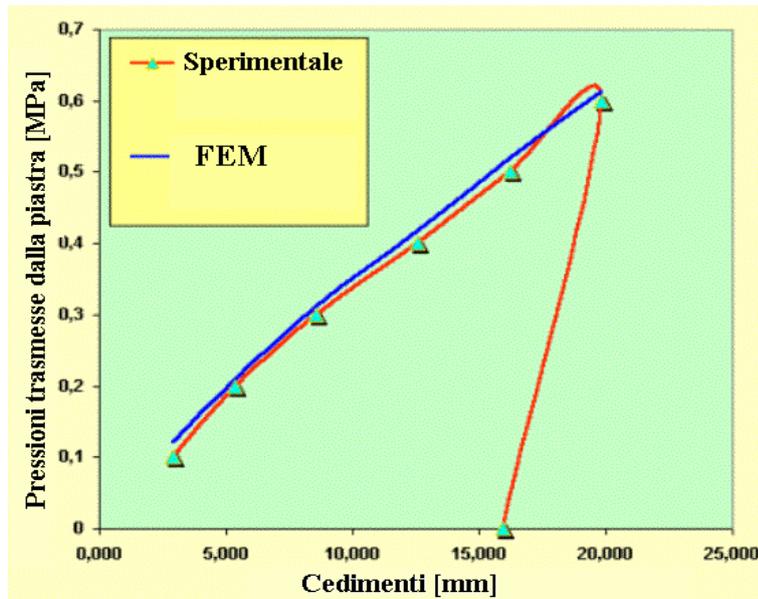


Fig. 4.13 Confronto fra simulazione e dati sperimentali

Sono state registrate discrepanze tra l'esperienza e la simulazione numerica FEM inferiori mediamente al 7%. Nel diagramma di figura 4.13 dove, nel piano pressioni-cedimenti sono riportate la curva sperimentale e quella ottenuta col metodo FEM. È stato necessario in qualche caso eliminare la parte superiore del diagramma che presenta un comportamento anomalo, questo è stato attribuito al fatto che l'eccessiva deformazione (superiore a 15 mm) arriva a coinvolgere la pavimentazione sottostante il supporto elasto-plastico.

4.9.2 Risultati

Le analisi sono state ripetute considerando 4 tipi di disposizioni dei masselli, 3 spessori del massello. Le figure 4.14, 4.15 e 4.16 si riferiscono alla distribuzione dei masselli a spina di pesce, con spessore di 6 cm

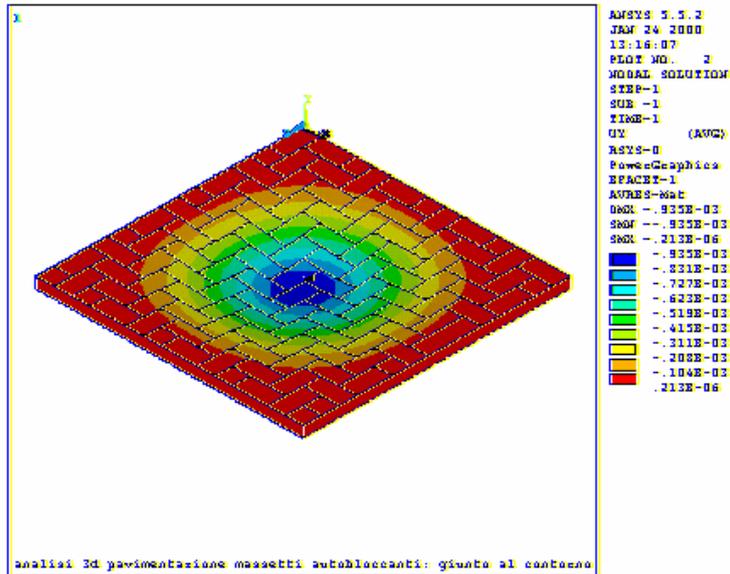


Fig. 4.14 Distribuzione dei cedimenti verticali

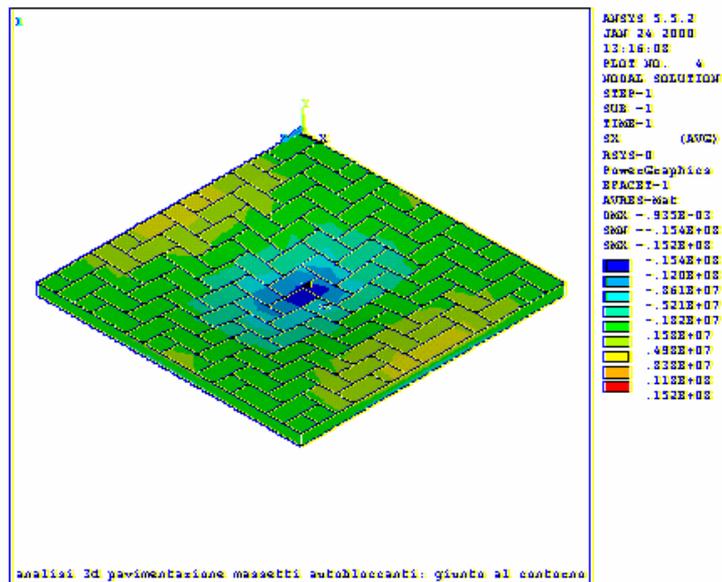


Fig. 4.15 Distribuzione delle tensioni orizzontali

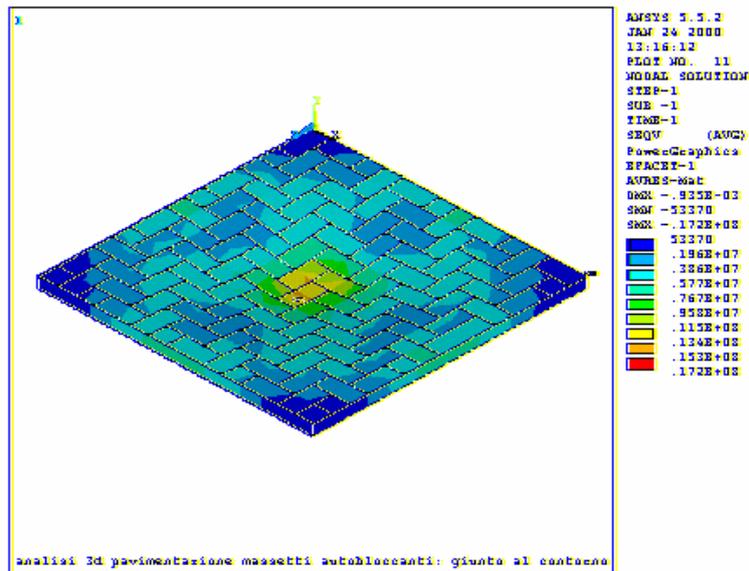


Fig. 4.16 Distribuzione delle tensioni verticali

Si osserva che il confinamento laterale consente alla pavimentazione di lavorare in modo uniforme, ciò significa che non solo i masselli in cui sono applicati i carichi subiscono un cedimento ma anche quelli adiacenti che collaborano, trasmettono le sollecitazioni. Al crescere dello spessore del massello la distribuzione degli sforzi è più uniforme e la deflessione massima diminuisce, grazie alla maggiore forza di attrito che si genera tra i masselli. La presenza anche di componenti orizzontali determina un comportamento più uniforme rendendo, per spessori superiori a 10 cm, il livello tensionale delle 4 configurazioni quasi coincidente (Fig 4.17).

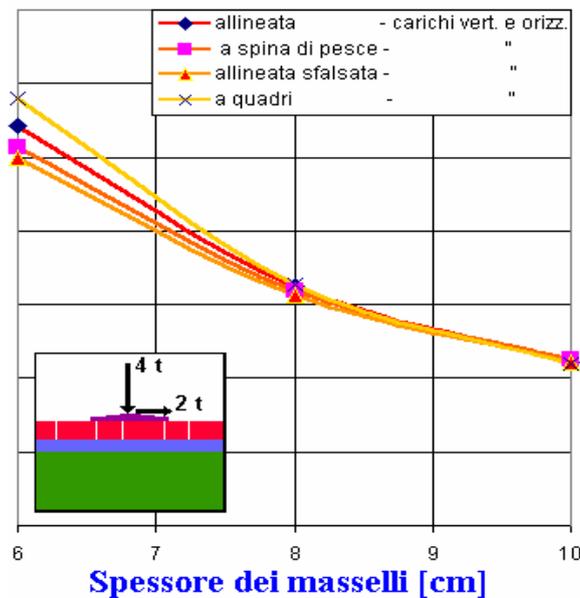


Fig. 4.17 Tensioni massime orizzontali

Le deflessioni massime sono quasi indipendenti dalla geometria di posa e assumono il valore di 9.45 mm per spessori del massello di 6 cm, si dimezzano (4.10 mm) per spessori di 8 cm e divengono 2.18 mm per spessori di 10 cm (Fig. 4.18).

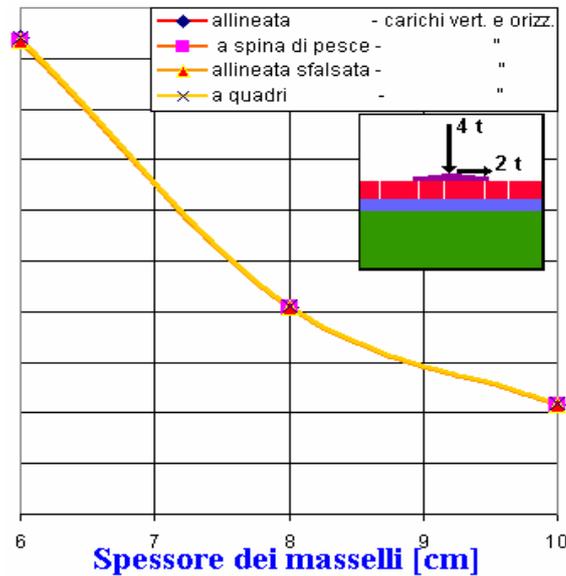


Fig. 4.18 Deflessioni massime verticali

Nelle sollecitazioni di taglio su un piano verticale in corrispondenza del giunto il comportamento peggiore si osserva per la configurazione a quadri, mentre per quella a spina di pesce si ottiene il valore inferiore. Quest'ultima manifesta, inoltre, al crescere dello spessore, ulteriori significative riduzioni (Fig. 4.19).

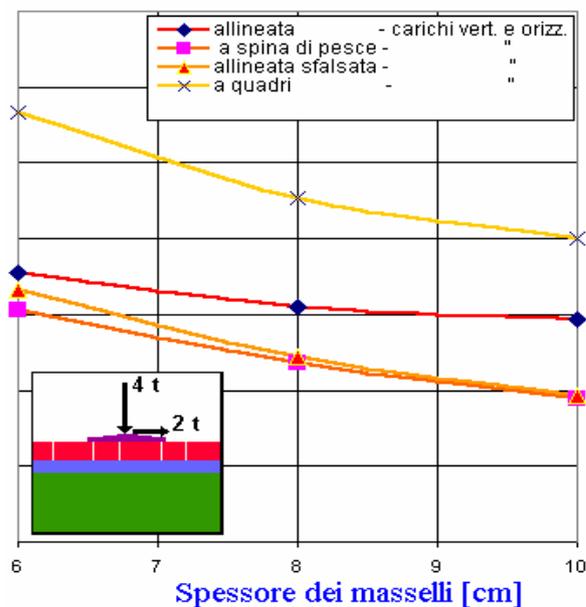


Fig. 4.19 Sollecitazioni di taglio su piano verticale

Valori eccessivi delle deformazioni angolari dei giunti intorno ad un asse verticale o orizzontale hanno come conseguenza la perdita di autobloccanza della pavimentazione e

l'insorgenza di sconnessioni che fanno decadere le prestazioni dell'intera struttura. In questa situazione il comportamento migliore si ha per la disposizione dei masselli a quadri (Fig 4.19, Fig.4.20).

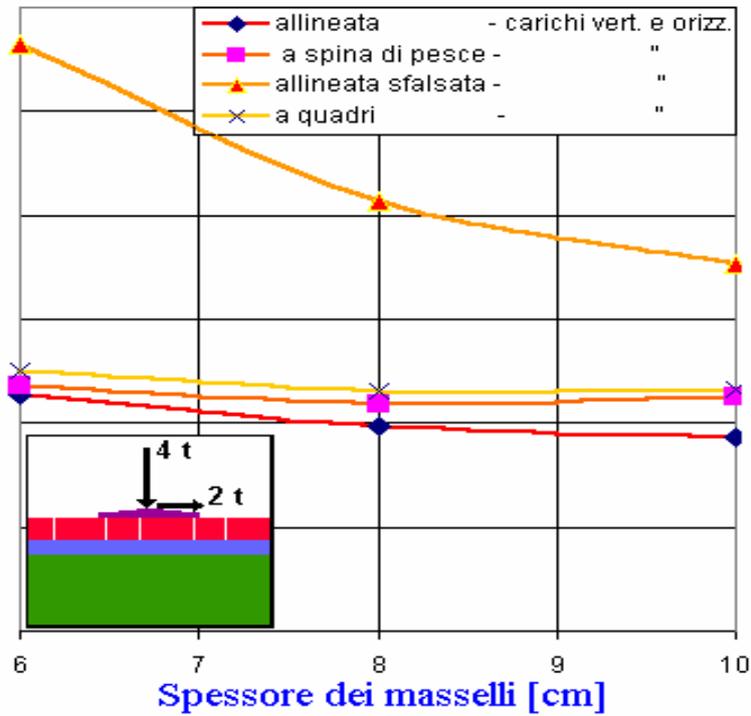


Fig. 4.19 rotazioni intorno all'asse verticale

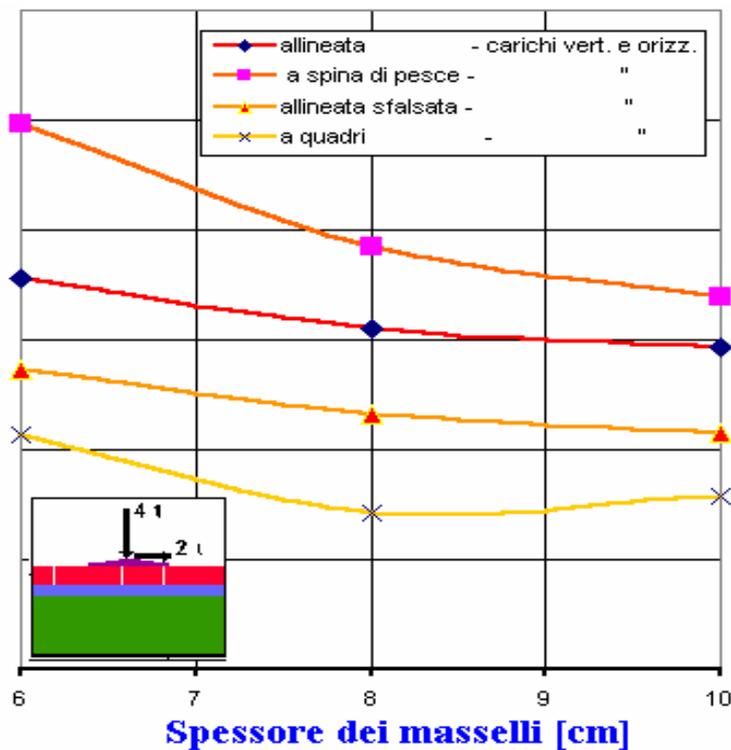


Fig. 4.20 Rotazioni intorno all'asse orizzontale

4.10 progettazione delle pavimentazioni secondo modelli FEM

Basandosi sui risultati delle analisi a elementi finiti, é possibile sviluppare un quaderno delle pavimentazioni.

4.10.1 Caratteristiche del sottofondo

Il sottofondo viene caratterizzato in termini di CBR quindi il modulo di elasticità E viene ricavato da questo valore attraverso una relazione ampiamente riconosciuta:

$$E = 10 \cdot \text{CBR}$$

dove il modulo E é espresso in MPa e CBR in %

4.10.2 dimensionamento dello strato di base

Usando i risultati ottenuti attraverso queste modellazioni é stata definita una relazione fra lo spessore dello strato di base composto da aggregato non legato e il modulo CBR del terreno.

In Fig. 4.21 é riportato un esempio di dimensionamento dello strato di base in funzione del numero di assi equivalenti attesi (41 KN) .

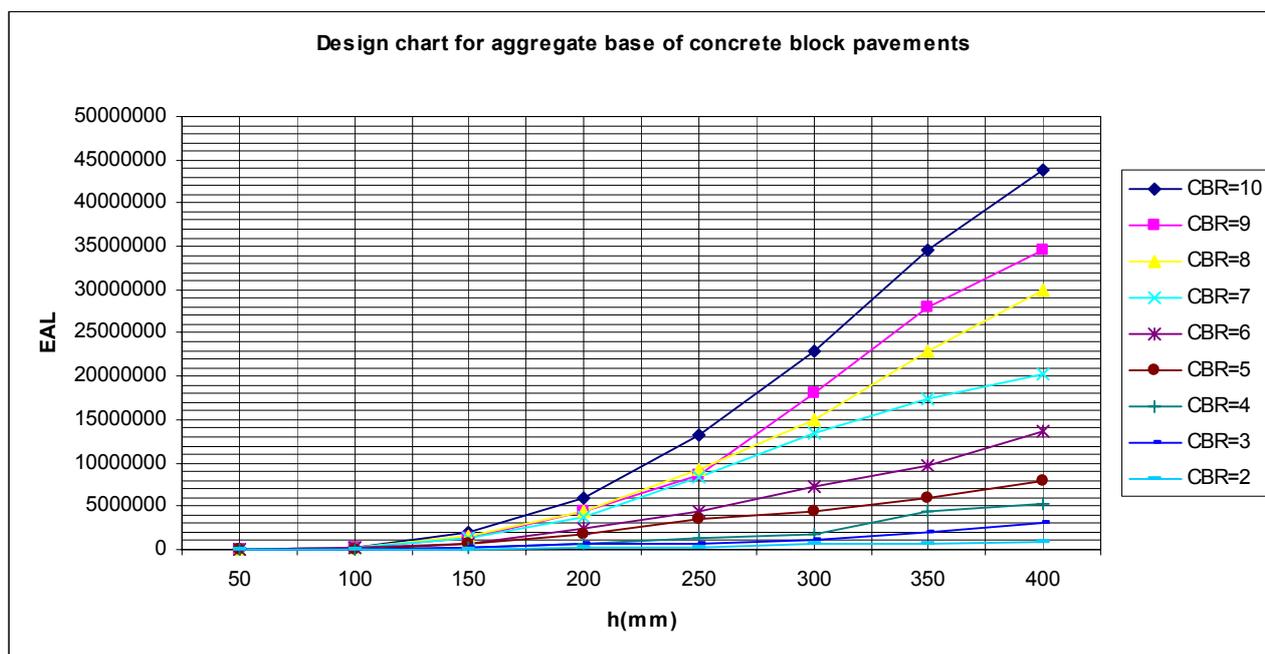


Fig.4.21 rapporto fra ripetizioni di un asse equivalente di 41KN e spessore di base per vari valori CBR del sottofondo

in figura 4.22 si é rappresentato lo spessore della base in misto granulare per una pavimentazione costituita da masselli di spessore 80mm, per un CBR=10 per vari tipi di asse equivalente (Tab. 4.3)

linea sul grafico	Asse equivalente (kN)
A	210
B	65
C	45
D	225

Tab. 4.3 Valore degli assi equivalenti nel test

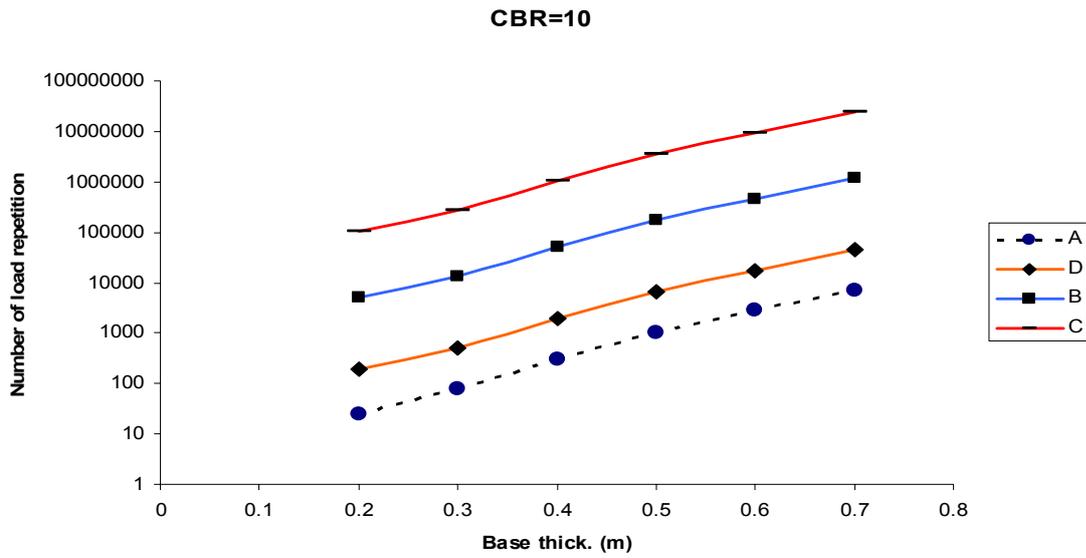


Fig.4.22 Spessore dello strato di base per vari assi equivalenti

4.11 Studio di un quaderno delle pavimentazioni in masselli in pietra naturale con metodo FEM

Lo scopo di questo studio é quello di fornire un catalogo per le pavimentazioni stradali in cubetti di pietra utilizzando un approccio progettuale basato sul metodo agli elementi finiti. Nello studio sono state scelte pavimentazioni stradali con due tipi di cubetti: masselli in porfido di dimensioni 6x6 di base 8cm di altezza e in calcare di dimensioni 10x10 di base e 12cm di altezza; é stata considerata la posa ad archi contrastanti poiché tipica di questo tipo di pavimentazione in ambito stradale, é stato inoltre considerato in ogni prova uno strato di 5cm di sabbia di allettamento.[33]

4.11.1 Modello dello studio

Lo studio é stato condotto su un modello costituito da una porzione di multistrato di pavimentazione in pietra di 2m x 2m con altezza pari alla somma dei singoli strati oggetto di studio più 1,5 metri rappresentante il terreno di sottofondo. La mesh é costituita per piani paralleli, i giunti modellati sono di 5 mm di larghezza, come caratteristiche fisiche il materiale di riempimento é stato considerato uguale a quello di allettamento e rispondente al modello di Drucker-Prager poiché particolarmente adatto ai materiali granulari e richiede, per la caratterizzazione del materiale, la sola immissione della coesione dell'angolo di attrito interno e dell'angolo di dilatanza. A differenza del caso reale dove i giunti sono sigillati tramite boiacca di cemento, nel presente modello non viene considerata per la sua influenza sul comportamento meccanico della pavimentazione visto lo scarso spessore in gioco. Per i materiali costituenti gli altri strati della pavimentazioni si é considerato un comportamento elastico lineare e sono stati forniti i moduli elastici, i coefficienti di Poisson e la densità (Tab. 4.6)

Materiale	Modulo di elasticità (N/mm ²)	Coefficiente di Poisson	Densità (Kg/m ³)
Porfido	60000	0,2	2555
Calcare	40000	0,2	2500
Sabbia	100	0,3	1600
Misto granulare	200	0,3	1600
Misto cementato	2500	0,25	2000
Calcestruzzo	30000	0,2	2400
Terreno con scarsa portanza	30	0,4	1600
Terreno con media portanza	90	0,4	1600
Terreno con buona portanza	150	0,4	1600

Tab. 4.6 Valori caratteristici utilizzati nel modello

E' stato effettuato il confinamento dei bordi laterali del modello al fine di simulare nella maniera più corretta possibile l'effetto di confinamento del resto della pavimentazione in opera. Per quanto riguarda i carichi, essendo queste pavimentazioni utilizzate soprattutto in centri storici è stata considerata una composizione del traffico dell'80% di autocarri leggeri e una del 20% di autobus urbani. Al fine del calcolo è stata ipotizzata una vita di circa 20 anni, il carico valutato per le prove è di 80 kN.

4.11.2 Limiti tensionali e deformativi

A causa della configurazione a gradini che assumono le pavimentazioni a cubetti soggette a ormaioamento si è deciso di limitare il cedimento massimo della superficie a 2 mm in condizioni statiche, mentre quello del sottofondo a 0,5 mm.

Per quanto riguarda la base in misto granulare si è limitata la tensione verticale massima che è stata posta come limite a 0,3 N/mm², per garantire una migliore performance della base si è limitata anche la sollecitazione di trazione a 0,4 N/mm².

Nel misto cementato tenendo in considerazione le prescrizioni della CNR 29/72 è stata considerata una tensione ammissibile massima di compressione pari a 1,5 N/mm² e per la trazione 0,25 N/mm².

Per le pavimentazioni con base in conglomerato cementizio i valori considerati della base in cls sono: resistenza a trazione semplice 2,6 N/mm² resistenza a trazione per flessione 1,5 N/mm².

4.11.3 Simulazione

La simulazione è stata effettuata considerando diverse combinazioni di spessori della sovrastruttura e il carico è stato posto sia al centro della pavimentazione, sia lungo un bordo per simulare il passaggio delle ruote vicino ad un marciapiede o muretto dove manca la collaborazione dei blocchetti attigui. Per ogni test sono stati confrontati gli stati tensionali con le tensioni ammissibili citate nel paragrafo precedente; da tali confronti si sono individuate le diverse combinazioni che potevano soddisfare tutti le prescrizioni progettuali.

Nel caso di sovrastrutture con la presenza dello strato di fondazione che quello in misto cementato o lastra di calcestruzzo è stato considerato fisso lo spessore dello strato di fondazione e si è incrementato quello dell'altro strato fino a che gli stati tensodeformativi non sono risultati ammissibili. Questo criterio è stato adottato per raggiungere il corretto dimensionamento strutturale con il minimo spessore possibile, infatti le basi in cls o misto cementato hanno caratteristiche meccaniche superiori a quelle del misto granulare e forniscono a parità di spessore un contributo maggiore. Lo spessore minimo del misto granulare è stato ipotizzato di 15 cm poiché è lo spessore minimo che si può porre con sicurezza con le attuali tecniche per il misto cementato 15 cm mentre per la base in cls è di 10 cm.

Dalle prove effettuate si è prodotto un quaderno delle pavimentazioni in masselli di porfido e calcare che permette alle progettazioni di garantire gli standard sopra menzionati (Fig.4.23 Fig.4.24 Fig.4.25 Fig.4.26).

		Pavimentazione con base in lastra di calcestruzzo e fondazione in misto granulare			
		Carico al centro e sul bordo della Pavimentazione			
		Cubetti in porfido		Cubetti in Calcare	
Modulo di elasticità del sottofondo	30 N/mm ²				
	90 N/mm ²				
	150 N/mm ²				

Fig.4.23 Pavimentazioni con fondazione in misto granulare e lastra di calcestruzzo (misure espresse in metri)

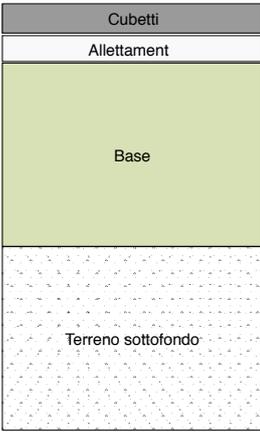
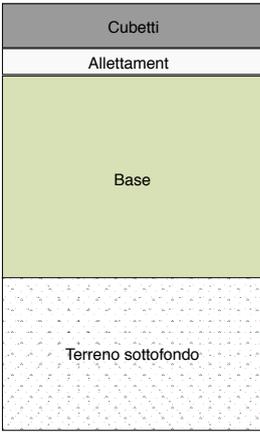
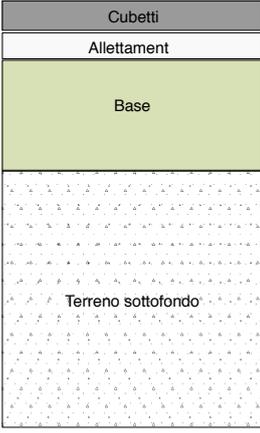
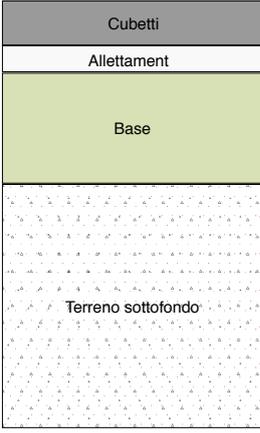
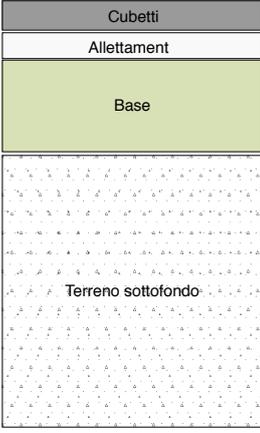
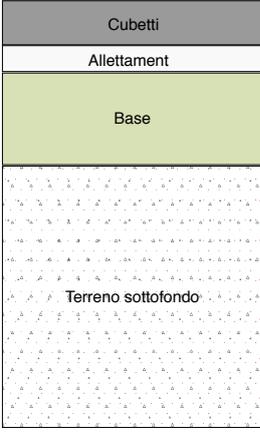
		Pavimentazione con base in misto granulare	
		Carico al centro della Pavimentazione	
		Cubetti in porfido	Cubetti in Calcare
Modulo di elasticità del sottofondo	30 N/mm ²		
	90 N/mm ²		
	150 N/mm ²		

Fig.4.24 Pavimentazioni con base in misto granulare (misure espresse in metri)

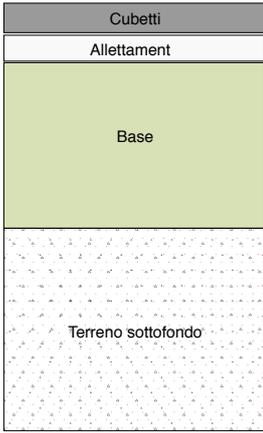
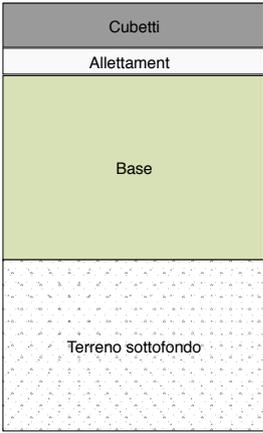
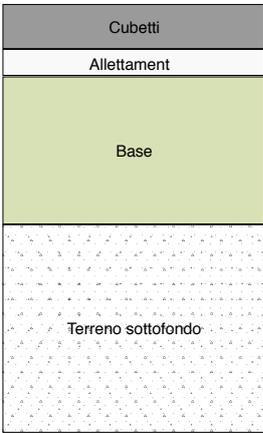
		Pavimentazione con base in misto granulare	
		Carico al bordo della Pavimentazione	
		Cubetti in porfido	Cubetti in Calcare
Modulo di elasticità del sottofondo	30 N/mm ²	Pavimentazione non adatta al tipo di terreno	Pavimentazione non adatta al tipo di terreno
	90 N/mm ²		
	150 N/mm ²		

Fig.4.25 Pavimentazioni con base in misto granulare (misure espresse in metri)

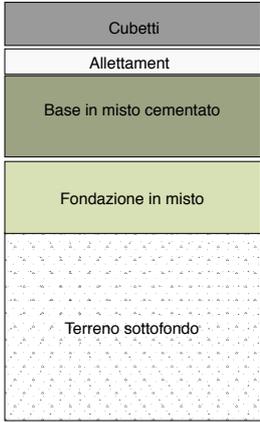
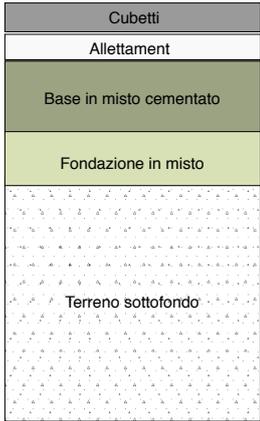
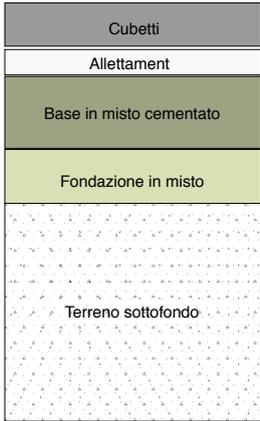
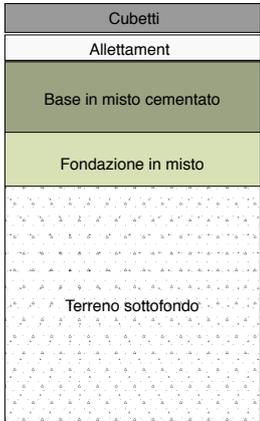
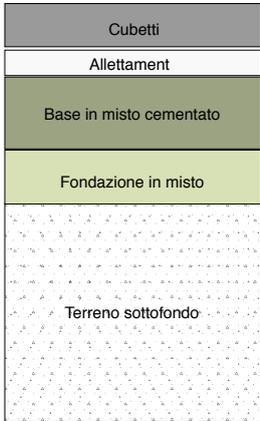
		Pavimentazione con base in misto cementato e fondazione in misto			
		Carico al centro e sul bordo della Pavimentazione			
		Cubetti in porfido		Cubetti in Calcare	
Modulo di elasticità del sottofondo	30 N/mm ²				
	90 N/mm ²				
	150 N/mm ²				

Fig.4.26 Pavimentazioni con fondazione in misto granulare e base in misto cementato(misure espresse in metri)

Dall'analisi del quaderno delle pavimentazioni prodotto, si può capire come grazie alla loro elevata resistenza a compressione e flessione i cubetti di porfido consentono con altezze di soli 8 cm, di avere spessori di base e fondazione uguali e in molti casi inferiori a quelli che si riscontrano con l'uso di elementi di calcare di 12 cm.

4.12 Conclusioni

L'utilizzo della modellazione ad elementi finiti ha permesso una più precisa identificazione del comportamento delle pavimentazioni in masselli nella loro interezza e ha permesso di valutarne gli elementi critici. La progettazione, secondo le linee guida in situazioni standard, permette comunque un dimensionamento in grado di garantire la durata della pavimentazione stessa. Dalle esperienze precedenti si sono potute trarre, in maniera analitica, varie considerazioni sul comportamento meccanico delle pavimentazioni. L'aumento di spessore dei masselli aumenta la distribuzione dello sforzo su superfici più estese e con valori inferiori; le proprietà di trasferimento dei carichi e le modalità di deformazione delle pavimentazioni sono notevolmente influenzate dalle prestazioni dei giunti, i valori delle sollecitazioni si riducono decisamente all'aumentare dello spessore. In sintesi, l'aumento dello spessore dei masselli consente di:

- aumentare le superfici di contatto del giunto, incrementandone le forze di taglio sopportabili, riducendo gli sforzi trasmessi e, conseguentemente, la capacità di autobloccaggio dei masselli;
- conseguire il massimo beneficio aumentando lo spessore da 6 cm a 8 cm. Esso risulta molto più contenuto per un ulteriore incremento da 8 cm a 10
- ridurre la possibilità di perdite di sabbia nel giunto;
- ridurre le rotazione relative dei masselli.

Per quanto riguarda la disposizione dei masselli si osserva che Le sollecitazioni di compressione sono inferiori nella distribuzione dei masselli allineata, mentre quella a spina di pesce e quella allineata sfalsata presentano il comportamento peggiore. Con riferimento alle sollecitazioni di taglio in corrispondenza del giunto il comportamento peggiore si osserva per la configurazione allineata e a quadri, mentre per quella a spina di pesce si ottiene il valore migliore. La disposizione dei masselli a quadri mostra il migliore comportamento rispetto alle deformazioni angolari.

Si può concludere che l'impiego dei masselli autobloccanti nelle sovrastrutture sollecitate da forti carichi (strade urbane, piazzali portuali e aeroportuali) con limitate velocità di percorrenza, può incrementare le prestazioni offerte solo attraverso un

miglioramento delle prestazioni dei giunti. Le prestazioni migliori si ottengono quindi con l'aumento dello spessore del massello.

Dalle osservazioni sulle pavimentazioni di pietra naturale si può evincere che nella loro realizzazione è da preferire far ricorso a cubetti in porfido e all'utilizzo di un misto cementato o una lastra di calcestruzzo quale base, in modo da garantire alla sovrastruttura una maggior vita utile a parità di spessori coinvolti e di garantire alla viabilità un migliore livello di sicurezza e comfort.

Conclusioni tesi

La tesi ha avuto come scopo quello di fornire le basi per una conoscenza delle pavimentazioni in masselli sotto vari punti di vista.

Le tipologie presenti sul mercato, sia come materiale sia come forma sono diverse sebbene quelli in cls coprano la maggiore parte delle installazioni a causa del loro ridotto costo di costruzione e delle caratteristiche prestazionali rispetto agli omologhi in argilla o pietra naturale. Un altro vantaggio delle pavimentazioni in masselli di cls è la possibilità, attraverso le attuali tecniche produttive di creare pavimentazioni con aspetti più naturali e gradevoli “copiando” le pietre più pregiate. Attraverso opportune tecniche costruttive è possibile creare pavimentazioni permeabili senza alterare in maniera eccessiva la superficie viaria senza ricorrere alla permeabilità dovuta agli inerti nei giunti o nelle apposite smussature ma facendo filtrare l'acqua attraverso il massello stesso. I blocchi in pietra naturale rivestono ancora oggi un ruolo importante nelle pavimentazioni stradali storiche e di pregio garantendo una notevole resistenza all'usura e un risultato estetico di gran lunga superiore a quelli di cls.

Le pavimentazioni in masselli sono sovrastrutture flessibili caratterizzate come da bollettino CNR 169-1994 dallo strato di fondazione, dalla base e con lo strato di usura composto dai masselli stessi, a differenza delle omologhe in conglomerato bituminoso è stato dimostrato che hanno la capacità di distribuire i carichi su aree più grandi, diminuendo così gli sforzi negli strati sottostanti. Il principio su cui si basa il funzionamento di questa pavimentazione è quello dell' “ingranamento”, merito della trasmissione degli sforzi tra i masselli da parte dei giunti che permettono il comportamento flessibile evitando così sforzi flessionali nei masselli. Le varie forme in commercio sembrano non avere grandi differenze come prestazioni, quello che incide maggiormente è lo schema di posa. Al fine di mantenere in funzione il fenomeno dell' ingranamento è indispensabile evitare gli spostamenti relativi dei masselli stessi, per questo il ruolo dei bordi di contenimento è fondamentale, necessario quindi, è porre sia in fase di progettazione che di realizzazione particolare attenzione sulla scelta e l'installazione di questi ultimi che, devono garantire cedimenti e spostamenti minimi. La posa della pavimentazione stessa è importante; è necessario garantire la compattazione prescritta in fase progettuale degli strati sottostanti e il perfetto allineamento orizzontale e verticale dei masselli, sia per motivi estetici sia per evitare punti di debolezza strutturale quali gradini e giunti di dimensioni non idonei al corretto funzionamento dell'ingranamento.

Un vantaggio rispetto alle altre pavimentazioni flessibili, è la possibilità di ripristinare correttamente la superficie viaria, sia dal punto di vista estetico sia da quello funzionale, a seguito di lavori di manutenzione e riparazioni di impianti negli strati sottostanti. Le operazioni riguardanti l'apertura dello scavo e la chiusura dello stesso devono essere svolte con particolari attenzioni al fine di garantire un comportamento omogeneo della zona oggetto di intervento rispetto alle limitrofe; di non minore importanza è anche la possibilità di riutilizzare i masselli garantendo così una superficie perfettamente uguale situazione pre-intervento e diminuendo inoltre la quantità di materiali di risulta che andrebbero ad incidere sui costi.

Le Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni in masselli hanno un ruolo importante nella scelta di questo tipo di pavimentazione in molti ambiti; la loro scarsa omogeneità e macrotessitura le rende inadatte per tutte le applicazioni che richiedano velocità di scorrimento maggiori di 60 km/h, oltre questo limite, sia il comfort di viaggio che l'aderenza diminuiscono sensibilmente, senza considerare l'inquinamento acustico provocato. Dove l'uso però ne è consentito la macrotessitura e la microtessitura di questo tipo di pavimentazioni diventano un pregio garantendo l'aderenza in molte situazioni; la durezza superficiale dei masselli garantisce la durata delle caratteristiche superficiali nel tempo.

Le Pavimentazioni in masselli nelle loro varie forme assumono grande importanza nella gestione delle acque meteoriche e degli inquinanti. Con uno studio attento delle caratteristiche delle perturbazioni e una progettazione corretta degli strati di riserva è possibile garantire un corretto percolamento negli strati inferiori del suolo dell'acqua, evitando così il fenomeno dell'abbassamento delle falde, sia l'interessante possibilità di ridurre le sezioni degli impianti fognari permettendo l'inserimento di nuove superfici pavimentate all'interno di impianti esistenti senza lavori di adeguamento degli stessi. La resistenza di queste superfici al gelo è di gran lunga superiore a quella dei conglomerati bituminosi, rendendo nulla la manutenzione spesso necessaria sugli asfalti a seguito del periodo invernale.

Gli studi effettuati sui vari tipi di inquinanti e sul comportamento degli stessi sembrano confermare che l'utilizzo di pavimentazioni permeabili in genere e in particolar modo quelle a masselli, sembrano confermare la capacità di abbattimento di molteplici sostanze; l'uso quindi di queste pavimentazioni può garantire risultati equiparabili a quelle di dispositivi atti al recupero e allo smaltimento delle sostanze inquinanti, con il vantaggio quindi, di un costo finale delle opere molto inferiore. L'uso di griglie inerbite consente in ambito urbano di ridurre l'effetto riscaldante delle superfici pavimentate classiche.

La progettazione delle pavimentazioni in massello é fondamentale per la durata delle stesse, particolare attenzione va posta al dimensionamento degli strati di base. La progettazione si effettua considerando sia il traffico a cui é soggetta la pavimentazione sia la portanza del sottofondo che deve garantire standard minimi; nell'ipotesi ciò non si avveri é possibile comunque intervenire con sostituzione di materiale o compattazioni. La progettazione si basa su quaderni delle pavimentazioni frutto di esperienze progettuali precedenti o derivati da prove agli elementi finiti; essi prescrivono sia le granulometrie degli inerti più idonee, sia gli spessori della base e della fondazione in funzione di vari parametri quali la portanza del sottofondo e le classi di traffico a cui é sottoposta la pavimentazione. La base che si può utilizzare in questa pavimentazione é solitamente costituita da inerti slegati ma é possibile, per migliorarne le prestazioni o diminuirne gli spessori utilizzare misti cementati, lastre di cls o misti bitumati. L'uso di basi costituite da inerti legati non permette come precedentemente affermato però di intervenire con facilità nel caso di manutenzioni a impianti sottostanti sia in fase di apertura dello scavo che in fase di ripristino non garantendone la perfetta riuscita.

La letteratura scientifica riporta vari test effettuati con il metodo FEM per capire il comportamento delle pavimentazioni a masselli riportando interessanti risultati riguardo gli spessori dei masselli utilizzati, gli schemi di posa e lo spessore dei giunti, si é rilevato che la portanza delle pavimentazioni cresce con il crescere dello spessore dei masselli e la larghezza del giunto incide fortemente sulla portanza, é quindi bene nella progettazione considerare sempre gli spessori che garantiscano un adeguato comportamento della sovrastruttura rispetto ai carichi a cui sarà sottoposta.

Le pavimentazioni in masselli si rivelano una valida alternativa alle classiche in conglomerato bituminoso in molte situazioni, soprattutto in ambito urbano, ma anche in ambiti diversi quali piazzali industriali e portuali in virtù della loro forte resistenza all'abrasione e ai carichi. la limitazione più grande é il maggior costo nella posa delle stesse sebbene risulti ammortizzato per via della maggior durata e minor manutenzione.

Bibliografia

- [1] (knapton 1976; clark 1981; Dutruel e Dardare 1984)
- [2] (shacknel 1979)
- [3] (Rollings 1983)
- [4] (ICIPI Tech spech)
- [5] (assobeton, codice per la posa di masselli autobloccanti in cls)
- [6] Shackel, B., "A Review of Research into Concrete Segmental Pavers in Australia,"
- [7] Clifford, J. M, Skid-Resistance Measurements Made on Several Segmental Block Pavements
- [8] Mavin, K. C., "Interlocking Block Paving in Australian Residential Streets,
- [9] Mavin, K. C., "Site and Laboratory Testing of Interlocking Concrete B. Pavements
- [10] Muira, Y., et al., "On the Serviceability of Concrete Block Pavements
- [11] Harp K.G., and Armstrong, P. J., Construction and Initial Performance of the Concrete Test Pavement at ARRB
- [12] Garret, G. and Walsh, I. D., "A Comparative Study of Concrete Paving Blocks
- [13] Yager, Thomas J., "NASA Friction Evaluation of Concrete Pavers
- [14] Bruce k. Ferguson "Porous pavements"
- [15] (Bannermann 1993, Pizz 1996 Steuer 1997)
- [16] (thelen Howe 1978)
- [17] (newman 2001; pratt 1999)
- [18] (balades 1995, brattebo and booth 2003)
- [19] (Sensalone 1999)
- [20] Sansolini, Giordano "biossido di titanio nei materiali da costruzione
- [21] Ediltubi "pavimentazioni fotocatalitiche"
- [22] Yoshihimiko Murata "Air purifying blocks based on photocatalysis"
- [23] (Borgwardt 1997)
- [24] Assobeton "sottofondi"
- [25] CNR Bollettino ufficiale n.169-1994
- [26] ICIPI "tech spec 4 Structural Design of Interlocking Concrete Pavement for Roads and Parking Lots"
- [27] Hassani, a.Jamshidi "Modeling and structural design of a concrete block pavement system"

- [28] F.Mogadas Nejad "A study on behaviour of block Pavement using 3D finite element method"
- [29] (Marias, 1967, Durtruel 1984)
- [30] (Barber, 1980;Shackel, 1984)
- [31] (Houben, 1984; Nishizawa, 1984)
- [32] Coni, Senes,Knapton,Annunziata "impiego dei masselli autobloccanti nei piazzali aeroportuali: analisi FEM e verifica sperimentale"
- [33] S.Colagrande "Le pavimentazioni in cubetti di pietra"
- [34] UNI EN 1338
- [35] D.Ascer, TLerch, M. Oeser, F. wellner "3D-FEM simulation of concrete block pavements"
- [36] [I.ishai, M.Livneh "Interlocking concrete block pavement for abrasive caterpillar loading"
- [37] R.s Rollings "evalutation of block pavement design procedures"
- [38] Marios, Tang, Khalid, Millard "the effect of construction pattern and unit interlock on the structural behaviour of block pavements"
- [39] James, Von Langsdorff "Computer aided design of permeable concrete block pavement for reduction stressor and contaminants in an urban environment"