



PAVIMENTAZIONI DRENANTI: IL DIMENSIONAMENTO

Vittorio Ranieri

Dipartimento di Vie e Trasporti - Politecnico di Bari

Via Re David 200, 70125 Bari

Tel: +39 080.5963388 - Fax: +39.080.5963291

E-mail: v.ranieri@ poliba.it

PAVIMENTAZIONI DRENANTI: IL DIMENSIONAMENTO

VITTORIO RANIERI - Dipartimento di Vie e Trasporti – Politecnico di Bari

SOMMARIO

La memoria affrontata il problema del dimensionamento delle pavimentazioni drenanti. Sull'argomento sono da tempo in atto degli studi, iniziati presso l'Università di Roma "La Sapienza" ed ora in svolgimento presso il Politecnico di Bari, che sono culminati nella proposta di un metodo di progetto basato sull'applicazione di un originale modello teorico. Quest'ultimo è stato verificato sperimentalmente realizzando presso il Dipartimento di Vie e Trasporti del Politecnico di Bari un impianto di simulazione di pioggia su pavimentazioni drenanti in grado di misurare l'altezza raggiunta dall'acqua rispetto al fondo durante il moto di filtrazione. I risultati della ricerca hanno consentito la costruzione di un abaco utile alla progettazione delle pavimentazioni drenanti.

Esso, per ogni pendenza (i) della pavimentazione, fornisce il rapporto adimensionale H_{\max}/L tra l'altezza massima raggiunta dall'acqua rispetto al piano impermeabile inclinato e la lunghezza (L) del percorso di scolo in funzione del rapporto, anch'esso adimensionale, $4 \cdot I/k$, dove I è la intensità di pioggia e k la conducibilità idraulica.

L'articolo presenta i risultati di una ulteriore, estesa, campagna di indagini sperimentali volte alla calibrazione del metodo di progetto. È stato così possibile definire un algoritmo sperimentale che rende il metodo applicabile a pavimentazioni porose con diverse caratteristiche di permeabilità e porosità.

Nella memoria viene anche fornito un esempio applicativo della metodologia proposta.

ABSTRACT

This paper deals with the design problem of porous pavements which have been studied at the University of Rome "La Sapienza" and are now underway at the Polytechnic of Bari. These studies have led to a proposed design method based on the application of an original theoretical model.

The model links the hydraulic conductivity k_D of the porous pavement with the geometrical characteristics of the road section and the rainfall intensity I . The theoretical model has been tested in laboratory using an original device. According to the experimental data, a useful chart for porous pavements design is also given.

Data provided with this graph could improve porous pavements design (e.g. to assess the minimum thickness of an open-graded friction course needed to avoid surface runoff) usually based only on mechanical resistance determinations.

The results of further investigations are also presented in this paper. The aim of these new investigations was to find an empirical algorithm to extend the applicability of the method to several porous pavements.

A numerical design example is also given.

1. INTRODUZIONE

La riduzione dell'incidentalità legata alla presenza d'acqua sui manti stradali è uno dei problemi mai completamente risolti che da sempre impegnano i ricercatori in campo stradale. In tal senso, i conglomerati bituminosi drenanti rappresentano una delle

risposte più efficaci al problema, soprattutto dopo che la messa a punto di nuove tecniche di confezionamento, posa in opera e manutenzione li ha resi commercialmente competitivi. A fronte di tali innovazioni, essi nell'ultimo decennio hanno avuto una diffusione sempre più estesa e capillare. D'altra parte, proprio per effetto di tale diffusione e dell'esperienza cumulata, iniziano anche ad essere manifestate le prime critiche circa la loro reale utilità soprattutto a riguardo della conservazione delle loro capacità funzionali nel tempo. In effetti a tutt'oggi non esiste alcun metodo per il progetto e/o la verifica delle caratteristiche funzionali dei manti drenanti.

Il progetto delle pavimentazioni drenanti viene effettuato basandosi su metodi che impongono solo il raggiungimento di determinati requisiti minimi di resistenza meccanica (le norme generalmente stabiliscono dei valori soglia di stabilità Marshall ovvero di perdita in peso Cantabro), tralasciando i requisiti funzionali che invece vengono valutati solo in modo qualitativo ed indiretto, per esempio attraverso la misura di caratteristiche fisiche correlate al drenaggio ed alla fono-assorbenza (per esempio la porosità). I requisiti di fono-assorbenza e drenaggio, pur essendo alla base dell'uso di tali tappetini, non vengono "tutelati" doverosamente in fase di progetto, lì dove i tecnici si devono accontentare di ottenere dei risultati funzionali misurabili solo a livello qualitativo ed indiretto.

Un tentativo di coniugare le esigenze meccaniche con quelle funzionali è rappresentato dalla norma belga R 69/97 [1, 2] che, attraverso diagrammi del tipo di quello rappresentato in figura 1, fornisce delle soglie di accettazione delle miscele bituminose drenanti dipendentemente dal contemporaneo verificarsi di valori limite di perdita in peso Cantabro e percentuale di vuoti del conglomerato.

Anche in questo caso tuttavia le capacità drenanti sono misurate in modo indiretto attraverso la misura della porosità né tantomeno è possibile predire in modo rigoroso il funzionamento in opera della pavimentazione.

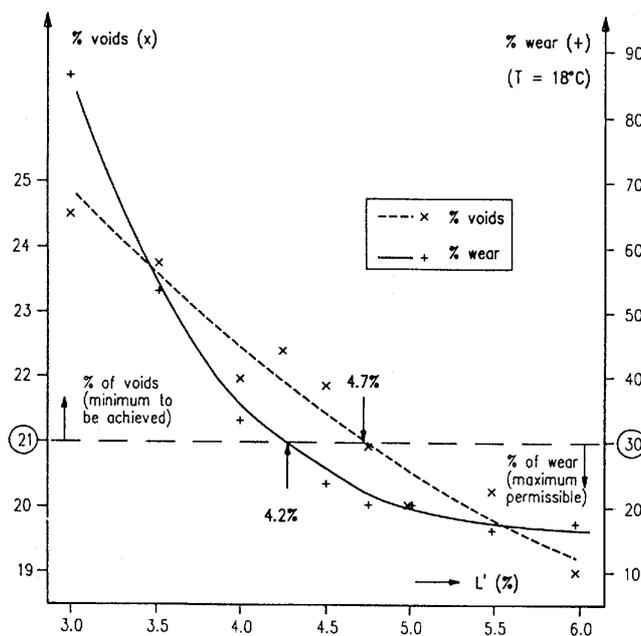


Figura 1 - Esempio di applicazione della norma belga R69/97: il contenuto di bitume della miscela deve scaturire dalla contemporanea verifica delle percentuali minima di vuoti e massima di perdita in peso Cantabro.

2. IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA

A fronte di tali problemi, già negli anni settanta vennero commissionati dal Franklin Institute [3] degli studi per approfondire le conoscenze sui meccanismi che regolano il deflusso delle acque dai piani stradali. Tra i lavori prodotti particolarmente interessante è quello in [4].

In linea generale, il deflusso dell'acqua meteorica attraverso una pavimentazione drenante può essere considerato alla stregua di una falda freatica che, durante un evento piovoso, si muova in un mezzo poroso ed omogeneo giacente su un substrato impermeabile inclinato. Modelli simili sono già presenti in diverse discipline come l'idraulica, idrologia, irrigazione,... [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Il problema è fornire una soluzione al modello generale, date le specifiche condizioni al contorno. In tal senso molto interessanti sono i lavori [13, 14, 15, 16, 17].

Partendo da questo background, in alcuni precedenti lavori [18, 19, 20] è stato presentato un modello teorico-sperimentale che traccia le linee guida di un innovativo metodo di progetto/verifica dei tappeti d'usura drenanti e fono-assorbenti che tenga conto anche delle loro caratteristiche funzionali.

3. DESCRIZIONE DEL MODELLO

3.1. Generalità

Il modello prende in considerazione la sezione di una carreggiata stradale (Fig. 2) avente pendenza i e lunghezza $2L$, pavimentata con uno strato di pavimentazione porosa spesso T ed avente permeabilità k e porosità n . Esso poggia su uno strato d'interposizione impermeabile (Stress Absorbing Membrane Interlyer - S.A.M.I.).

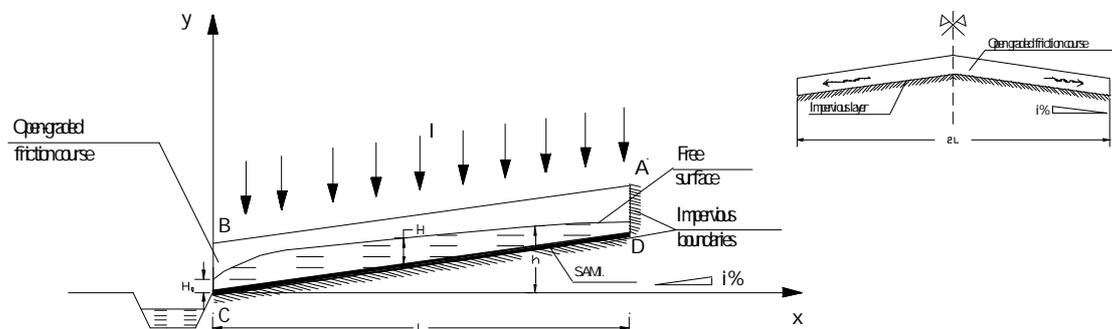


Figura 2 - Rappresentazione schematica del modello.

Durante una pioggia di intensità costante I , l'acqua che si muove nella pavimentazione porosa può essere considerata alla stregua di una falda freatica che si muove di moto uniforme in un sistema non confinato ed inclinato e soggetta a riempimento costante lungo la linea di deflusso.

Il moto di filtrazione può allora essere studiato con la legge di Boussinesq che nella sua forma generale è:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{n} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{v_0}{k} \right] \quad (1)$$

dove: $v_0 = I =$ intensità di pioggia [$L \cdot T^{-1}$], h [L] e H [L] sono l'altezza d'acqua riferita rispettivamente al piano orizzontale ed a quello inclinato. Con le ipotesi e le condizioni al contorno del caso, l'eq. (1) diviene:

$$\frac{d}{dx} \left(H k_D \frac{dh}{dx} \right) = -I \quad (2)$$

dove k_D è la conducibilità idraulica di Darcy (permeabilità).

3.2. Soluzioni

Risolvendo analiticamente l'eq. (2) sono state ottenute due diverse soluzioni dipendentemente dal segno assunto dalla quantità $\Delta = i^2 - 4 \frac{I}{k}$ [18]:

$$\left[\left| A - \frac{i + \sqrt{\Delta}}{2} \right|^{\frac{1}{2} \left(\frac{i}{\sqrt{\Delta}} - 1 \right)} \right] \cdot \left[\left| A - \frac{i - \sqrt{\Delta}}{2} \right|^{\frac{1}{2} \left(\frac{i}{\sqrt{\Delta}} + 1 \right)} \right] = c \cdot (L - x) \quad \text{per } \Delta > 0 \quad (3)$$

e

$$\log \left[\left(\frac{I}{k} \right)^2 \cdot (x-L)^2 \cdot \left(A^2 - iA + \frac{I}{k} \right) \right] - \frac{2i}{\sqrt{-\Delta}} \arctg \left(\frac{2A-i}{\sqrt{-\Delta}} \right) = c \quad \text{per } \Delta < 0 \quad (4)$$

dove $A = \frac{h-iL}{x-L}$ e c è la costante di integrazione [18].

Si sono così potuti disegnare i due profili di deflusso riportati nelle figure 3a e 3b: per $\Delta > 0$ il deflusso può essere considerato in regime di moto turbolento mentre per $\Delta < 0$ il regime è laminare.

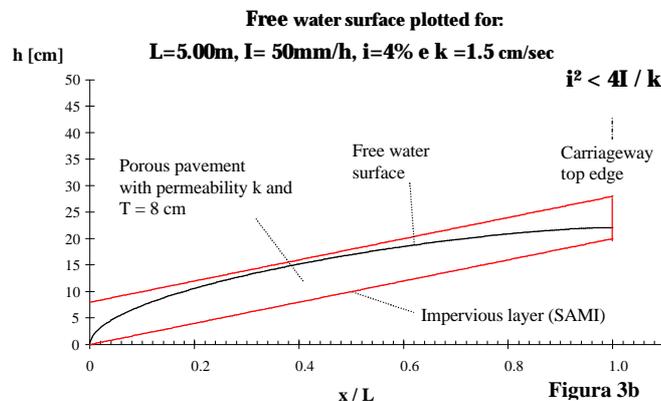
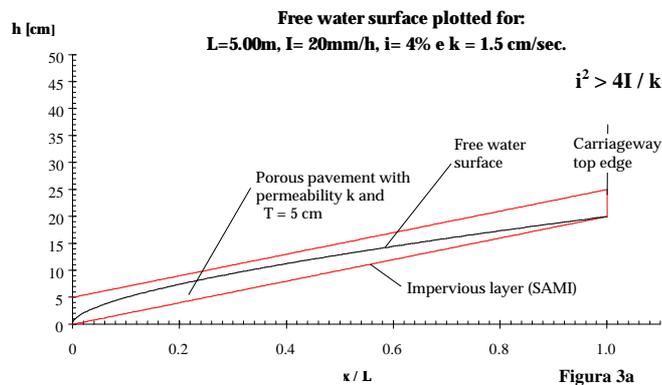


Figure 3a, b - Superfici di deflusso disegnate per $D > 0$ (fig. 3a) e $D < 0$ (fig. 3b).

Dall'esame delle eq. (3) e (4) e delle relative curve di deflusso, scaturiscono due primi importanti risultati:

1. nelle equazioni (3) e (4) l'intensità di pioggia (I) e la permeabilità (k) compaiono sempre legate tra loro nel rapporto I/k; ciò significa che, a parità degli altri parametri, l'altezza d'acqua dipende unicamente da tale rapporto;
2. per ottenere delle condizioni di deflusso ottimali è sempre necessario che sia verificata la disequazione: $i^2 - 4 \frac{I}{k} > 0$; ciò significa che, date la pioggia di progetto e la permeabilità k della pavimentazione, il quadrato della pendenza della pavimentazione deve essere maggiore di quattro volte il rapporto I/k.

La eq. (2) è stata risolta anche per via numerica applicando il metodo di Runge - Kutta. In questo modo si sono potuti disegnare un elevato numero di profili al variare di i, I, k ed L, ricavandone i corrispondenti valori dell'altezza massima (H_{max}) raggiunta dell'acqua sul SAMI.

3.3. Analisi delle simulazioni numeriche

Dall'analisi dei risultati delle simulazioni si è potuto constatare che in prima analisi, per ogni pendenza i del SAMI, il rapporto adimensionale H_{max}/L tra l'altezza massima dell'acqua e la larghezza della semicarreggiata è funzione solo del rapporto I/k, anch'esso adimensionale, tra la intensità di pioggia e la permeabilità della pavimentazione.

Ciò ha consentito la costruzione dell'abaco in figura 4 che, per ogni pendenza i della pavimentazione, restituisce il valore del rapporto H_{max}/L in funzione del rapporto I/k.

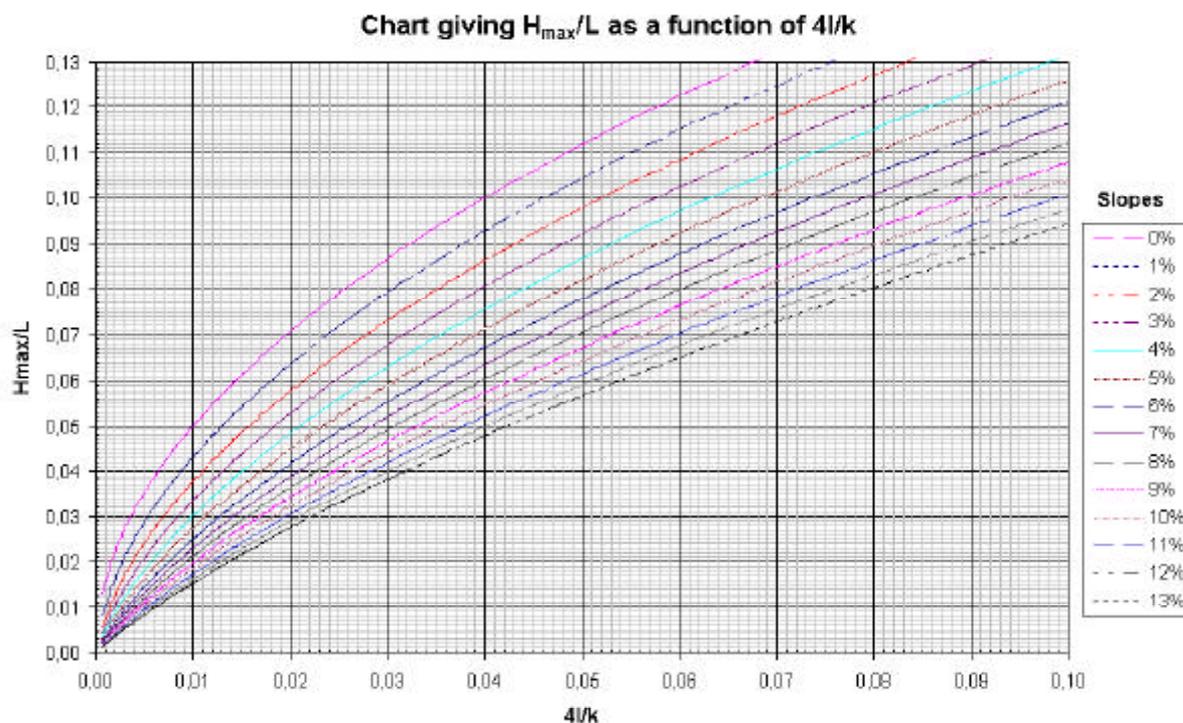


Figure 4 - Abaco che restituisce i valori di H_{max}/L in funzione del rapporto $4I/k$.

Utilizzando siffatto abaco sarebbe quindi possibile risolvere il problema del progetto/verifica delle caratteristiche funzionali di un manto stradale drenante. Date infatti le caratteristiche geometriche di una sezione stradale, la permeabilità del manto drenante e la intensità di pioggia di progetto (assegnandola utilizzando per esempio le curve di possibilità pluviometrica della zona in esame con un tempo di ritorno che potrebbe essere di 20 anni), è possibile determinare a priori lo spessore minimo necessario perché non si abbia ruscellamento superficiale.

3.4. Validazione sperimentale del modello

La validazione sperimentale del modello è stata effettuata presso il Laboratorio di Prove Materiali del Dipartimento di Vie e Trasporti del Politecnico di Bari. A tale scopo è stata allestita l'originale apparecchiatura di prova riportata in figura 5. Essa è costituita da un simulatore di pioggia capace di piogge di intensità fino a 200 mm/h e di misurare contestualmente i livelli idrici a cui s'attesta l'acqua defluente nella pavimentazione drenante. Ciò è possibile attraverso alcune prese piezometriche opportunamente posizionate sul fondo dell'apparecchiatura. Maggiori dettagli sul funzionamento dell'apparecchiatura sono riportati in [19, 20].

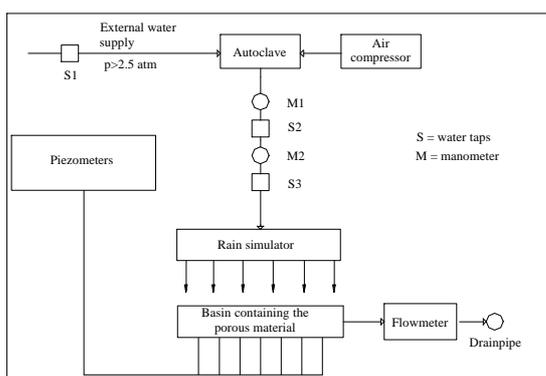


Figure 5 - L'apparecchiatura di prova.

3.5. Analisi dei primi risultati sperimentali

Le prime investigazioni sono state condotte su tre diversi materiali i primi due dei quali non legati [19]. Ognuno di essi è stato sottoposto a prova per diversi valori di pendenze ed intensità di pioggia. Si è così ricavato un profilo sperimentale di deflusso per ciascuna condizione di prova.

Tali profili sono stati successivamente confrontati con i corrispondenti ricavati per via matematica attraverso l'applicazione del modello.

Come mostrato in figura 6, le curve teoriche approssimano molto bene quelle sperimentali purché nel modello venga introdotto un coefficiente β moltiplicativo della permeabilità di Darcy (k_D). Pertanto, moltiplicando la permeabilità di Darcy per tale

coefficiente β e ricordando che $h = ix + H$ e che $I(L-x) = H \cdot k_D \frac{dh}{dx}$, l'eq. (2) diviene:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{I \cdot (L-x)}{H \cdot \beta \cdot k_D} \quad (5)$$

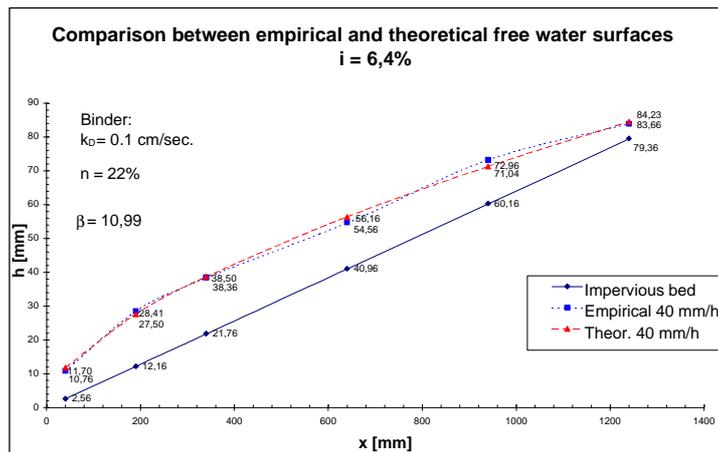


Figure 6 – Esempio di comparazione tra una curva teorica e la corrispondente curva sperimentale.

L'introduzione del coefficiente moltiplicativo della permeabilità di Darcy ha anche un fondamento sperimentale.

Il modello presentato nei paragrafi precedenti è infatti valido nell'ipotesi di moto in regime laminare mentre dall'esame dei profili sperimentali si è invece potuto appurare che così non è.

La legge generale dei moti di filtrazione è:

$$v = k \cdot J^{1/\alpha} \quad (6)$$

dove v [$L \cdot T^{-1}$] è la velocità media dell'acqua, J il gradiente idraulico, k [$L \cdot T^{-1}$] e β rispettivamente la conducibilità idraulica ed un esponente entrambi dipendenti dal regime di moto che si instaura nel mezzo poroso. Quando questo è turbolento l'eq. (6) assume la forma $v = k_T \cdot J^{1/2}$ dove k_T è la permeabilità turbolenta. Se il regime di moto è invece laminare l'eq. (6) corrisponde alla legge di Darcy:

$$v = k_D \cdot J \quad (7)$$

dove k_D è la cosiddetta conducibilità idraulica di Darcy sulla quale sono basate le misure di tutti permeametri da laboratorio. Tra i regimi di moto laminare e turbolento possono essere riconosciuti uno o più regimi di transizione [8].

Secondo la teoria di Lindquist – Kovacs, i regimi di transizione possono anch'essi essere studiati con la legge di Darcy nella quale la permeabilità k_D è moltiplicata per un coefficiente β dipendente dal Numero di Reynolds (Re). L'eq. (6) può allora essere così scritta:

$$v = \beta \cdot k_D \cdot J \quad (8)$$

Il regime di moto osservato durante le prove sperimentali è di transizione.

Peraltro, a causa dell'alimentazione costante dall'alto del sistema, il coefficiente β non è costante, ma cambia lungo l'intero percorso di deflusso. D'altro canto la comparazione tra le curve sperimentali e quelle teoriche ha mostrato che per ciascuna delle superfici freatiche studiate è possibile sostituire nell'eq. (8) la funzione $\beta = \beta(Re)$ con un unico fattore β^* (proprio di ciascuna delle condizioni di prova). Come detto in precedenza, agendo in questo modo si ottengono delle curve teoriche che comunque approssimano molto bene quelle sperimentali.

A questo punto il problema è individuare la legge che lega i valori di β^* ai parametri che governano il moto di filtrazione (i , I , k). La sua conoscenza permetterà infatti di

correggere il valore della permeabilità ($k = \beta^* \cdot k_D$) nel diagramma di fig. 4, completando così il metodo di progetto proposto.

A tale scopo sono state effettuate delle ulteriori indagini sperimentali.

4. APPROFONDIMENTI SPERIMENTALI

4.1. Materiali utilizzati nelle prove

Le nuove prove sono state condotte su tre tipologie di aggregati le cui caratteristiche principali sono riassunte nella tabella 1.

Per ciascuna di esse sono state effettuate prove con pendenze del fondo variabili dall'1% al 10% con passo 1%. Per ciascuna inclinazione sono state simulate sei intensità di pioggia, da 10 mm/h a 60 mm/h con passo 10 mm/h. Per gli aggregati G e P sono state simulate anche intensità di pioggia di 80, 100, 120, 150 e 180 mm/h.

In questo modo si sono potuti osservare 280 profili sperimentali e si sono potuti ottenere altrettanti valori del fattore β^* .

La tabella 2 mostra i valori di β^* ricavati dal best fitting di ciascuna delle curve teoriche alla corrispondente curva sperimentale.

Aggregato	D_{max} (mm)	Porosità n (%)	Conducibilità Idraulca K_D (cm/s)
S	0.85	44	0.015
G	5	46	2.31
P	10	47	4.8

Tabella 1 – Principali caratteristiche fisiche dei materiali utilizzati nelle prove

Slopes (%)	Fattore β^*														
	10 mm/h			20 mm/h			30 mm/h			40 mm/h			50 mm/h		
	S	G	P	S	G	P	S	G	P	S	G	P	S	G	P
1	4,23	0,27	0,13	7,59	0,39	0,26	10,75	0,54	0,37	12,92	0,67	0,47	15,07	0,80	0,56
2	3,98	0,28	0,16	7,27	0,34	0,30	10,35	0,40	0,39	12,89	0,50	0,48	16,87	0,61	0,56
3	3,64	0,29	0,14	6,69	0,38	0,26	9,67	0,40	0,37	12,39	0,47	0,47	14,42	0,57	0,56
4	3,43	0,29	0,14	6,31	0,40	0,26	8,92	0,45	0,35	11,05	0,48	0,44	13,30	0,53	0,51
5	3,33	0,27	0,15	6,31	0,38	0,25	9,09	0,38	0,34	11,35	0,47	0,43	13,53	0,51	0,48
6	3,37	0,31	0,18	6,17	0,43	0,33	8,87	0,44	0,46	11,36	0,52	0,55	13,01	0,59	0,59
7	3,38	0,23	0,12	6,23	0,40	0,21	9,33	0,42	0,30	11,29	0,50	0,38	12,91	0,57	0,45
8	3,42	0,26	0,16	6,37	0,39	0,29	8,97	0,42	0,40	11,13	0,51	0,49	12,74	0,58	0,57
9	2,9	0,26	0,16	5,35	0,37	0,26	7,54	0,39	0,35	9,68	0,49	0,42	11,32	0,56	0,49
10	2,68	0,25	0,15	5,11	0,37	0,27	7,49	0,39	0,37	9,62	0,48	0,46	11,23	0,54	0,52

Continua...

...segue

Pendenze (%)	Factor β^*																	
	60 mm/h			80 mm/h			100 mm/h			120 mm/h			150 mm/h			180 mm/h		
	S	G	P	S	G	P	S	G	P	S	G	P	S	G	P	S	G	P
1	17.49	0.89	0.63	-	1.09	0.71	-	1.30	0.84	-	1.50	0.98	-	1.83	1.17	-	2.14	1.29
2	16.87	0.70	0.63	-	0.90	0.76	-	1.08	0.88	-	1.24	1.02	-	1.51	1.21	-	1.76	1.41
3	16.25	0.67	0.61	-	0.84	0.74	-	1.02	0.86	-	1.17	0.92	-	1.41	1.10	-	1.63	1.23
4	15.50	0.62	0.56	-	0.76	0.69	-	0.91	0.81	-	1.05	0.92	-	1.27	1.11	-	1.48	1.29
5	15.37	0.60	0.52	-	0.75	0.62	-	0.89	0.73	-	1.04	0.83	-	1.21	0.99	-	1.38	1.15
6	14.58	0.66	0.62	-	0.81	0.77	-	0.93	0.86	-	1.07	0.96	-	1.17	1.12	-	1.35	1.27
7	14.09	0.63	0.51	-	0.75	0.63	-	0.89	0.76	-	1.02	0.86	-	1.12	1.01	-	1.28	1.24
8	13.80	0.60	0.60	-	0.73	0.73	-	0.88	0.84	-	0.98	0.92	-	1.10	1.09	-	1.22	1.22
9	13.12	0.58	0.54	-	0.75	0.67	-	0.87	0.78	-	0.95	0.86	-	1.07	1.02	-	1.20	1.15
10	12.86	0.59	0.56	-	0.72	0.70	-	0.84	0.78	-	0.96	0.86	-	1.05	0.99	-	1.15	1.10

- Valori non disponibili

Tabella 2 – Fattori β^* ricavati dalle diverse condizioni di prova

4.2. Analisi dei risultati sperimentali e determinazione della legge $\beta^* = \beta^*(i, I, k_D)$

Come mostrato in figura 7, date la permeabilità k_D e l'intensità di pioggia I , la legge che lega il fattore β^* alla pendenza del fondo è del tipo:

$$\beta^* = a \cdot i + c \quad (9)$$

dove a e c sono coefficienti dipendenti dalla permeabilità e dall'intensità di pioggia.

La tabella 3 mostra le equazioni ricavate per le diverse condizioni di prova.

I valori dei coefficienti a e c così ottenuti sono quindi stati diagrammati in funzione dei corrispondenti rapporti I/k_D . Sono quindi state disegnate le seguenti curve di regressione (cfr. fig. 8):

$$a = -0,013[\ln(I/k_D)]^2 - 0,226\ln(I/k_D) - 0,96 \quad (10)$$

$$c = 63,19 \cdot (I/k_D)^{0,6} \quad (11)$$

Sostituendo le eq. (10) e (11) nell'eq. (9) si ottiene:

$$\beta^* = \{-0,013[\ln(I/k_D)]^2 - 0,226\ln(I/k_D) - 0,96\} \cdot i + 63,19 \cdot (I/k_D)^{0,6} \quad (12)$$

dove i è espresso in percentuale e I/k_D è un rapporto adimensionale.

L'eq. (12) risolve il problema di progetto delle pavimentazioni drenanti.

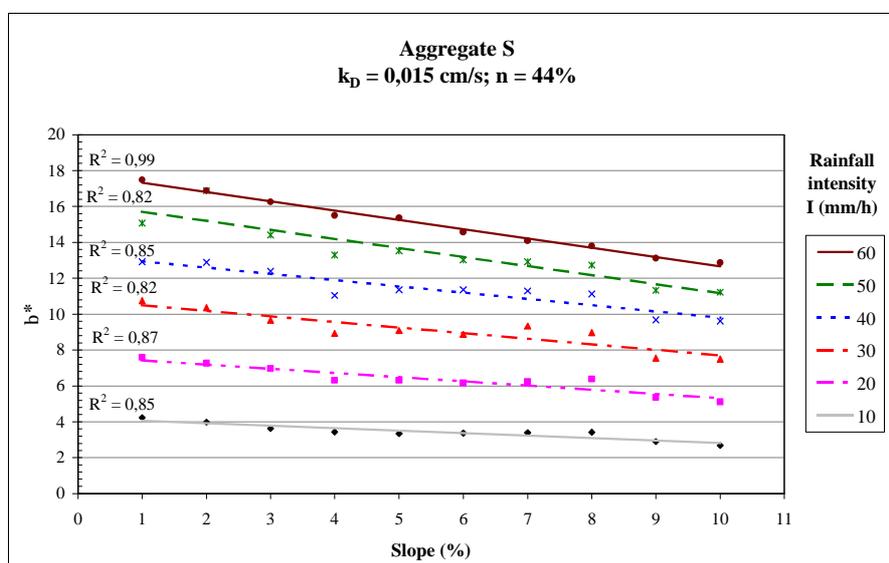


Figure 7 – Rette di regressione ricavate dal confronto tra i valori di β^* e le pendenze

Intensità di pioggia (mm/h)	Equazioni $\beta^* = a \cdot i + c$		
	Aggregato S	Aggregato G	Aggregato P
10	$\beta^* = -0,1377i + 4,1933$	$\beta^* = -0,0037i + 0,2913$	$\beta^* = 0,0015i + 0,1407$
20	$\beta^* = -0,2369i + 7,67$	$\beta^* = 0,0008i + 0,3807$	$\beta^* = -0,0007i + 0,2727$
30	$\beta^* = -0,3121i + 10,815$	$\beta^* = -0,0082i + 0,468$	$\beta^* = -0,001i + 0,3753$
40	$\beta^* = -0,3499i + 13,293$	$\beta^* = -0,0089i + 0,558$	$\beta^* = -0,0028i + 0,4747$
50	$\beta^* = -0,5061i + 16,223$	$\beta^* = -0,0148i + 0,6673$	$\beta^* = -0,0053i + 0,558$
60	$\beta^* = -0,5163i + 17,833$	$\beta^* = -0,023i + 0,7807$	$\beta^* = -0,0082i + 0,6233$
80	-	$\beta^* = -0,0297i + 0,9733$	$\beta^* = -0,0048i + 0,7287$
100	-	$\beta^* = -0,0379i + 1,1707$	$\beta^* = -0,0136i + 0,988$
120	-	$\beta^* = -0,0661i + 1,5507$	$\beta^* = -0,0082i + 0,8593$
150	-	$\beta^* = -0,0736i + 1,6787$	$\beta^* = -0,0192i + 1,1867$
180	-	$\beta^* = -0,094i + 1,976$	$\beta^* = -0,0219i + 1,3553$

- dato non disponibile

Tabella 4 – Equazioni ricavate per i materiali S, G e P nelle diverse condizioni di prova

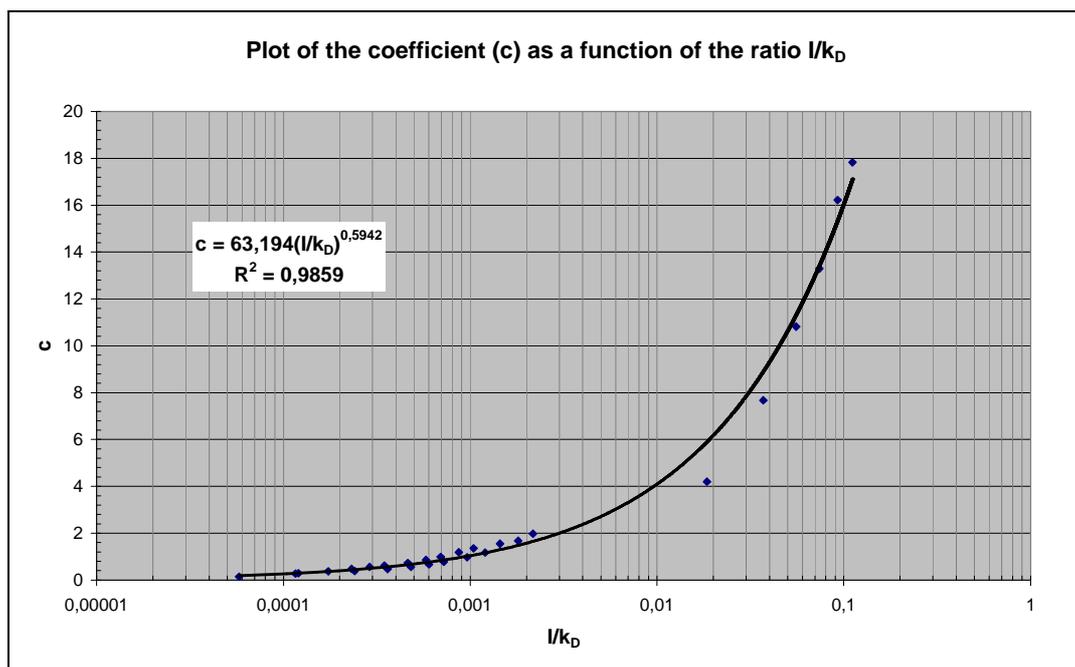
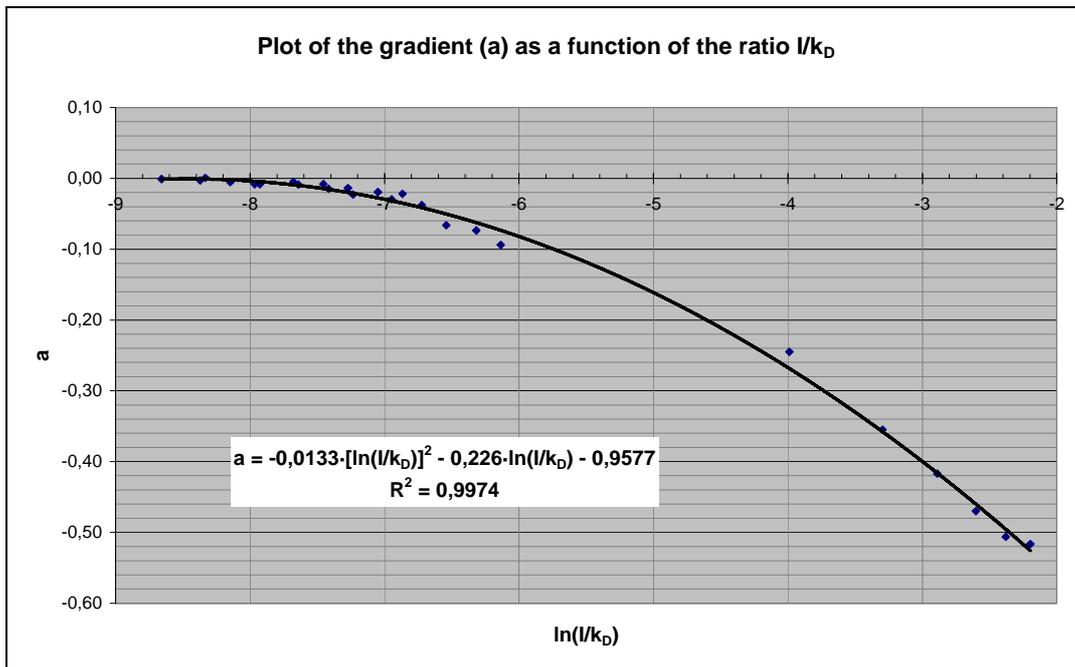


Figure 8 – Curve di regressione del gradiente (a) e dell'intercetta (c) in funzione del rapporto I/k

5. ESEMPIO DI CALCOLO

Sia dato un tronco stradale di larghezza $L_c = 7.00$ m ed avente pendenze longitudinale e trasversale rispettivamente $i_l = 2.5\%$ ed $i_c = 3\%$. Durante un evento piovoso la pioggia defluirà lungo la linea di massima pendenza le cui lunghezza e pendenza saranno rispettivamente:

$$L = L_c \left[1 + \left(\frac{i_1}{i_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 9.10 \text{ m} = 910 \text{ cm}$$

e

$$i = (i_c^2 + i_1^2)^{\frac{1}{2}} = 3.9\%$$

Siano date infine la intensità della pioggia di progetto $I = 25 \text{ mm/h}$ e la permeabilità del manto poroso $k_D = 2.0 \text{ cm/s}$.

Il problema di progetto è dunque la determinazione dello spessore T del manto poroso perché non si verifichi ruscellamento superficiale.

Dai dati di progetto risulta:

$$I/k_D = 0.00035;$$

e, dalla eq. (12):

$$\beta^* = \{[-0.013 \cdot [\ln(0.00035)]^2 - 0.226 \ln(0.00035) - 0.96]\} 3.9 + 63.19 \cdot (0.00035)^{0.6} = 0.593$$

Il valore della quantità $4 \cdot I/k$ con il quale entrare nel diagramma di progetto sarà quindi:

$$4 \cdot I/k = 4 \cdot I/(\beta^* \cdot k_D) = 0.00236.$$

Utilizzando il diagramma di progetto così come mostrato in figura 9, si ricava in corrispondenza della curva per $i = 3.9\%$ il valore $H_{\max}/L = 0.0095$.

Lo spessore della pavimentazione cercato sarà allora:

$$T \geq H_{\max} = 0.0095 \cdot L = 0.0095 \cdot 910 \sim 8.6 \text{ cm}.$$

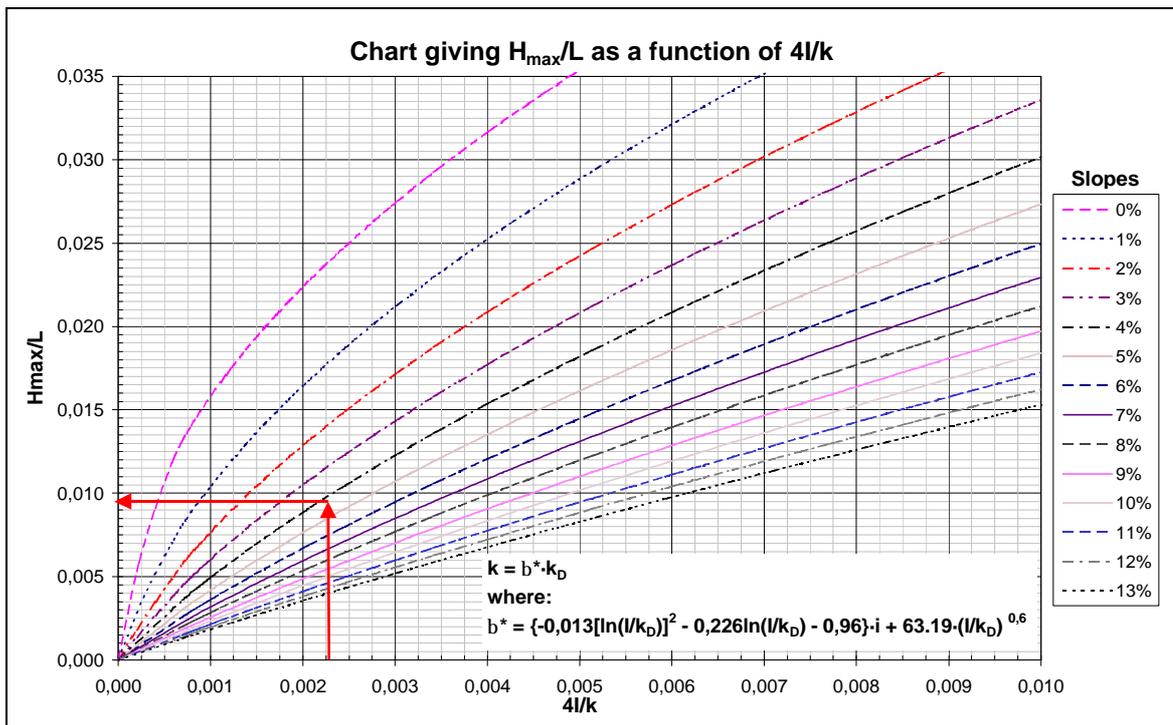


Figure 9 – Esempio di utilizzo del diagramma di progetto proposto

6. CONCLUSIONI

La memoria presenta un modello di deflusso delle acque meteoriche attraverso le pavimentazioni drenanti. Esso lega la permeabilità k_D della pavimentazione alle caratteristiche geometriche della sezione stradale ed alla intensità di pioggia.

L'espressione generale del modello è:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{I \cdot (L-x)}{H \cdot \beta^* \cdot k_D}$$

dove β^* è un coefficiente sperimentale dato dall'equazione:

$$\beta^* = \{-0,013[\ln(I/k_D)]^2 - 0,226\ln(I/k_D) - 0,96\} \cdot i + 63,19 \cdot (I/k_D)^{0,6};$$

Il modello è stato testato risolto sia per via numerica che per via analitica e successivamente testato sperimentalmente utilizzando un'originale apparecchiatura di prova. Essa simula la caduta di pioggia su una pavimentazione porosa e contemporaneamente misura i carichi piezometrici che si instaurano al suo interno durante il moto di filtrazione.

Sulla base dei risultati sperimentali è stato prodotto un abaco di facile utilizzo utile alla progettazione. Data una qualunque inclinazione della pavimentazione, esso fornisce il valore del rapporto dimensionale H_{\max}/L (tra la massima altezza a cui si attesta l'acqua all'interno della pavimentazione e la lunghezza del percorso di scolo) in funzione del rapporto I/k (tra l'intensità di pioggia di progetto e la permeabilità della pavimentazione).

L'abaco presentato può contribuire alla soluzione del problema della progettazione delle pavimentazioni drenanti (a tutt'oggi basata solamente su determinazioni di carattere meccanico) determinando in maniera rigorosa le caratteristiche fisiche che esse devono avere perché ne siano assicurate quelle funzionali.

Ulteriori sperimentazioni sono state programmate al fine di estendere il campo d'indagine a materiali di diversa porosità.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Centre de Recherches Routières. Code de bonne pratique pour la formulation des enrobes bitumineux. *CRR – R 69/97*, Bruxelles, 1997.
- [2] Lefebvre, G. Les enrobes Drainants. PIARC Technical Committee on flexible roads, pub. #08.01.B, 1993.
- [3] Franklin Institute Research Laboratories. *Investigation of Porous Pavements for Urban Runoff Control*. US Environmental Protection Agency, US Government Printing Office, Washington, 1972.
- [4] T.J. Jackson, R.M. Ragan. Hydrology of Porous Pavement Parking Lots. *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, HY 12, December 1974.
- [5] De Marchi, G. *Idraulica*. Vol. I. Hoepli, Milan, 1961.
- [6] Halek, V., and J. Svec. *Groundwater Hydraulics*. Development in Water Science, Vol. 7, Elsevier, New York, 1979.
- [7] Harr, M.E. *Groundwater and Seepage*. McGraw & Hill, New York, 1968.
- [8] Kovács, G. *Seepage Hydraulics*. Elsevier, New York, 1981.
- [9] Muzas Labad, F. Impermeabilización de Vasos de Embalse. Consideraciones sobre el Diseño de Base Drenantes. *Revista de Obras Publicas*, n. 2, February. 1986.
- [10] Terzidis, G. Computational schemes for the Boussinesq equation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, IR 4, December 1968.
- [11] Rat, M. Drainages. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, spécial, December. 1976.

- [12] Bear, J. *Dynamics of Fluids in Pours Media*. Elsevier, New York, 1972.
- [13] Akai, K. A Study on the Behaviour of Pore Water due to Drainage Through Saturated Subgrade Soil. *Proceedings of International Symposium on Subdrainage in Roadway Pavements and Subgrades*, World Road Association, PIARC, Granada, 1998.
- [14] Mc Enroe, B.M. Drainability of granular bases for highway pavements. In *Transportation Research Record* 1434, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
- [15] Meunier, Y. Les chaussées poreuses en forte épaisseur. *Proceedings of the 5° Eurobitume Symposium*, Eurobitume, Stockholm, 1993.
- [16] Muzas Labad, F. Condiciones para el Buen Funcionamiento de una Capa Drenante. *Proceedings of International Symposium on Subdrainage in Roadway Pavements and Subgrades*, World Road Association, PIARC, Granada, 1998.
- [17] Ram, S, and H.S. Chauhan. Drainage of Sloping Lands with Constant Replenishment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 113, 1987.
- [18] Ranieri, V. Il deflusso delle acque meteoriche dai piani stradali: un modello per le pavimentazioni drenanti. *Proceedings of the Meeting La sicurezza Intrinseca delle Infrastrutture Stradali*, Società Italiana di Infrastrutture Viarie, SIIV, Rome, February 1997.
- [19] Ranieri, V. Indagine Teorico Sperimentale sul Comportamento Idraulico dei Conglomerati Bituminosi Drenanti. *Ph. D. Thesis*, University of Rome “La Sapienza”, February 1998.
- [20] Ranieri, V. Indagine Sperimentale sul Comportamento delle Pavimentazioni Drenanti. *Proceedings of XXIII Convegno Nazionale Stradale*, World Road Association, Italian National Committee, PIARC, Verona, May 1998.