

SITEBSi srl
**Rassegna
del bitume**

RIVISTA DEL SITEB-ASSOCIAZIONE ITALIANA BITUME ASFALTO STRADE

ESTRATTO DAL N° **15/90**

**Contributo alla definizione della resistenza al taglio delle miscele
bituminose sottoposte a particolari condizioni di carico**

Umberto Bonvino

Università di Bari, Dipartimento di Vie e Trasporti

Contributo alla definizione della resistenza al taglio delle miscele bituminose sottoposte a particolari condizioni di carico

*Umberto Bonvino**

1. Premessa

È ben nota l'influenza esercitata sulle sovrastrutture stradali da fattori esterni quali, ad esempio, il clima, la tipologia delle correnti di traffico, ecc. Tra le condizioni climatiche la temperatura assume un ruolo decisivo perché può causare riduzioni della vita utile della pavimentazione (flessibile o rigida).

Infatti nelle pavimentazioni cementizie essa determina, in generale, stati tensionali più elevati di quelli indotti dai carichi veicolari; in quelle di tipo bituminoso, invece, condiziona il comportamento a fatica, altera il modulo complesso ed è, per valori elevati, responsabile della formazione delle classiche ormaie¹.

Analoghe condizioni critiche si possono verificare in corrispondenza di forti abbassamenti della temperatura e, quindi, di inevitabili contrazioni del materiale costituente lo strato. In tal caso, le conseguenti tensioni di trazione sono causa di fessurazioni soprattutto se la pavimentazione è soggetta anche a particolari condizioni di traffico. Tuttavia, la definizione delle caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose, sottoposte anche a variazioni della velocità con cui sono applicati i carichi, è diversa e ben più complessa rispetto a quella avente il cemento per legante e ciò proprio a causa della notevole influenza esercitata dai suddetti parametri. È altresì noto che il calcestruzzo di cemento ha, pur sotto particolari ipotesi, un comportamento prossimo a quello di un materiale elastico, omogeneo ed isotropo; ne deriva che i fenomeni di fatica connessi alle pavimentazioni rigide, sia per la diversità dei materiali costituenti la pavimentazione stradale, sia per il modo con cui viene effettuata la relativa calcolazione, hanno minore importanza rispetto agli analoghi presenti in quelle flessibili.

Nelle pavimentazioni rigide, infatti, si calcolano le massi-

me sollecitazioni indotte dalle condizioni più sfavorevoli di temperatura e di carico e, nel contempo, si verifica che permanga un opportuno coefficiente di sicurezza rispetto alla sollecitazione a rottura del materiale calcestruzzo di cemento. Poiché, però, le sollecitazioni che si hanno durante l'esercizio della pavimentazione stradale sono inferiori a quelle massime calcolate, il margine di sicurezza (effettivamente esistente) rispetto alla rottura è tale che i fenomeni di fatica non destano eccessive preoccupazioni.

Di contro, le miscele bituminose sono materiali elastoviscosi e, conseguentemente, appare importante il modo con il quale si esplica la loro resistenza meccanica al variare di alcuni parametri ritenuti significativi.

Nella presente ricerca si analizzeranno inizialmente le grandezze attrito intergranulare e resistenza interna dello strato componente la sovrastruttura stradale. Successivamente, si studieranno le variazioni assunte da questi due parametri allorché la miscela bituminosa è contemporaneamente sottoposta a temperature e carichi variabili. Infine, i risultati della sperimentazione mostreranno, pur sotto particolari condizioni, i valori numerici delle grandezze ottenute e, soprattutto, il modo con il quale esse sono correlate al binomio temperatura velocità.

L'iter seguito si avvale della classica procedura lineare Mohr-Coulomb e, solo per la coesione, anche di altre applicazioni (quali la procedura parabolica² e la teoria del paraboloide di rivoluzione³ utilizzate in precedenti ricerche sperimentali.

2. Scelta delle prove e modalità della sperimentazione

La scelta delle prove di laboratorio è stata suggerita dal

* Dipartimento di Vie e Trasporti - Università degli studi di Bari

fatto che gli accennati criteri di rottura possono essere espressi in funzione delle resistenze meccaniche che il materiale offre alle tensioni di trazione e di compressione. Pertanto si sono preferiti i test di trazione indiretta e compressione assiale ad e.l.l.; tra l'altro, essi sono di semplice esecuzione e non richiedono attrezzature sofisticate.

La miscela bituminosa esaminata è la stessa adoperata in altre ricerche; in particolare, essa presenta gli elementi litici (di natura calcarea) interamente passanti al setaccio UNI 15 ed un bitume 80-100. La Tabella I riporta, più dettagliatamente, le caratteristiche dell'impasto ed alcuni risultati numerici emersi dalla classica prova Marshall.

TAB. 1

ELEMENTI LITICI		BITUME	
<i>COMPOSIZIONE</i>		dosaggio	5 %
Sabbia	55%	Penetrazione	94 dmm
Graniglia	45%	Rammollimento	45,6 °C
<i>ANALISI GRANULOMETRICA</i>		Rottura	-10 °C
(U.N.I.) % passante		I.P.	- 0,7
15	100,0	Duttilità	>100 cm
10	95,6	TEST MARSHALL	
5	64,1	Mescolamento	155 °C
2	33,9	Costipamento	142 °C
0,40	15,2	Energia (colpi)	75
0,18	9,4	Stabilità	1414 daN
0,075	7,4	Scorrimento	1,8 mm
<i>P.S. MISTO: 2,65 daN/dmc</i>		Rigidità	786 daN/mm
CONGLOMERATO BITUMINOSO		Densità	2,28 daN/dmc
Densità	2,23 daN/dmc		
Porosità	9,50 %		
Indice dei vuoti	0,10		

Poiché l'obiettivo della ricerca è quello di analizzare la risposta della miscela sottoposta a:

- sollecitazioni semplici,
- temperature di prova variabili,
- velocità di carico variabili,

si è ritenuto opportuno effettuare i test di laboratorio a temperature non superiori a quella normalmente adoperata per la classica Marshall (+60°C) e non inferiori a quella caratterizzante la rottura del legante; per ragioni operative questo limite è stato fissato in +5°C.

Oltre queste due temperature estreme (5, 60°C), si è scelta una terza coincidente con il punto di rammollimento del bitume (+45°C) e, infine, il valore di +25°C che si ritiene il più idoneo nell'ambito del test di trazione indiretta⁴.

Per quanto riguarda, invece, i valori della velocità di avvicinamento dei piatti della pressa utilizzata per portare a rottura i provini si sono scelti, non a caso, i seguenti:

0.02, 0.07, 0.11, 0.21, 0.45, 0.85 mm/sec.

In tal modo le possibili combinazioni temperatura-velocità coprono un'ampia gamma delle situazioni più gravose individuate dai due casi estremi:

- α) elevate temperature di prova abbinate a basse velocità
- β) basse temperature con velocità elevate.

I provini cilindrici ($\varphi=10$ cm ed $H=20$ cm per il test di compressione semplice; $\varphi=10$ cm ed $H=6,35$ cm per quello di trazione) sono stati confezionati cercando di avvicinarsi il più possibile alla densità Marshall. Per ogni coppia temperatura-velocità essi sono stati suddivisi in due gruppi, ciascuno dei quali costituito da dodici unità. Il primo gruppo è stato sottoposto al test di compressione semplice, mentre il secondo a quello di trazione indiretta. Solo per la coppia 25°C, 0.85 mm/sec la numerosità dei campioni è risultata maggiore giacché si sono utilizzati i valori numerici provenienti da un'altra ricerca⁴.

Prima di ogni test i provini hanno subito la medesima stagionatura ed un condizionamento climatico di circa 6 h; successivamente, portati a rottura, si sono calcolate le tensioni medie relative a ciascun gruppo.

3. La coesione (C): i risultati

Questa proprietà, che si manifesta nei conglomerati attraverso la resistenza interna che il bitume oppone alla deformazione, è influenzata da:

- quantità e composizione chimica del bitume⁴
- rigidità della pellicola di legante,
- velocità di applicazione dei carichi,
- temperatura del conglomerato.

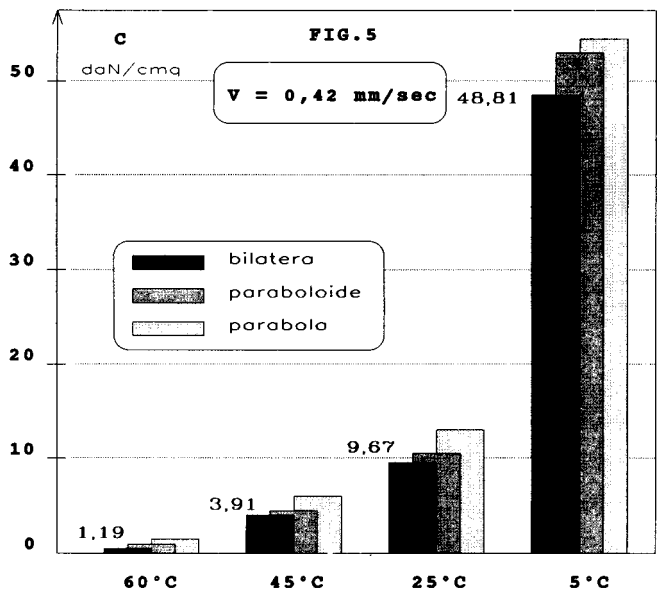
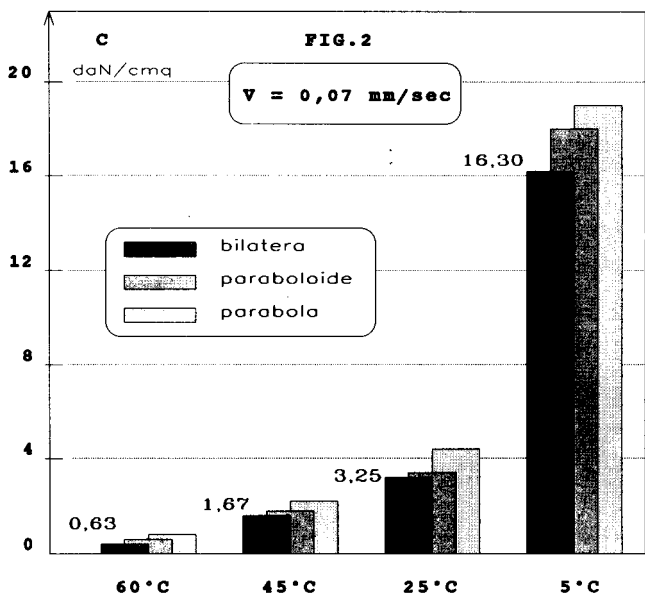
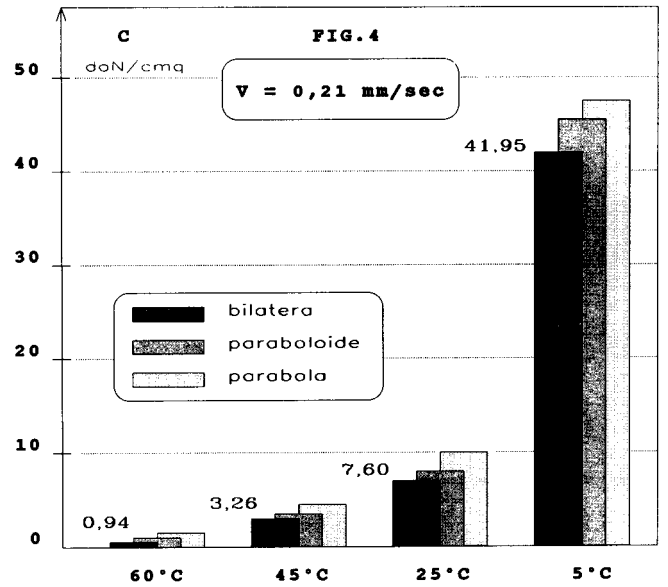
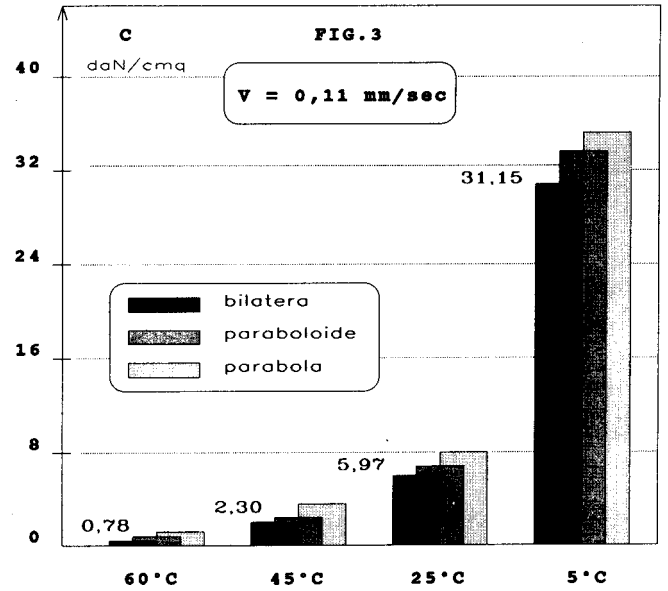
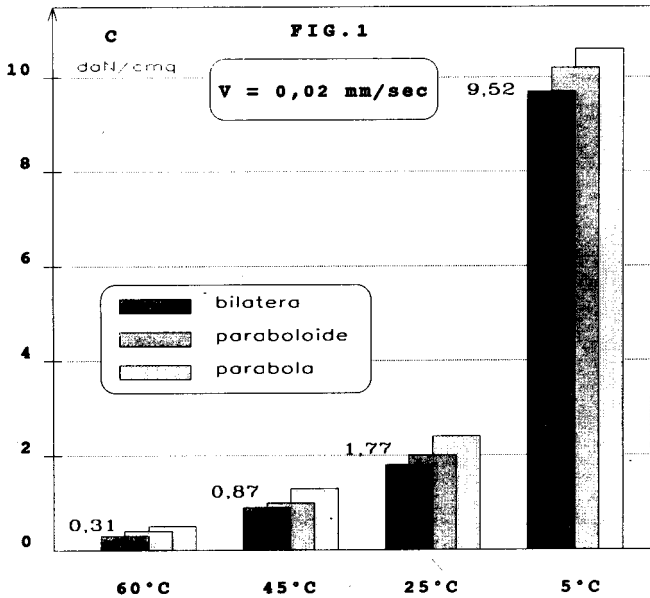
Si è ritenuto opportuno utilizzare una sola miscela confezionata con un bitume 80/100 il cui dosaggio (5% sul peso li inerti) ha determinato la massima stabilità Marshall.

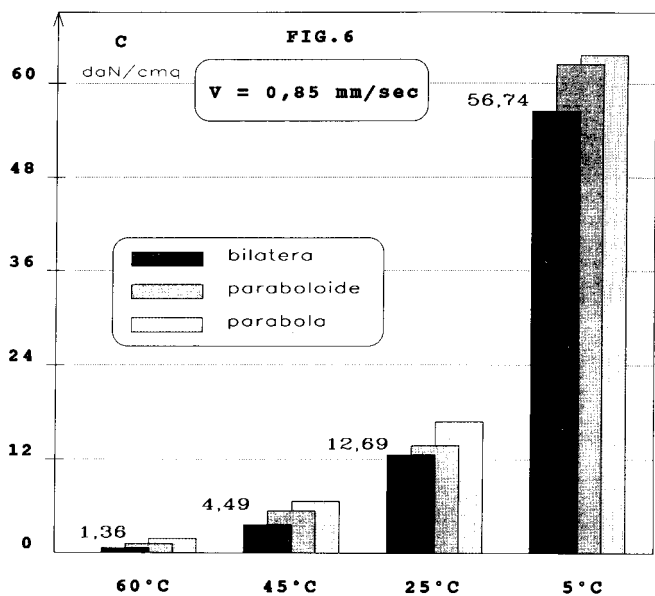
calcolo del valore della coesione attraverso l'utilizzo della curva intrinseca lineare è stato effettuato attraverso la combinazione dei risultati sperimentali emersi dalle prove di compressione semplice e di trazione indiretta. In corrispondenza delle sei velocità di applicazione dei carichi si sono costruiti altrettanti grafici che mostrano, per le quattro temperature di prova, i valori della ricercata caratteristica meccanica (Figura 1= 6). A puro titolo di confronto sono mostrati anche le risultanze numeriche ottenute tramite la procedura parabolica e la teoria del paraboloide di rivoluzione, in precedenza citati.

L'esame di tali risultati consente di formulare le seguenti osservazioni su questa importante caratteristica meccanica.

- 1) Al diminuire della temperatura di prova, essa cresce rapidamente, ma qualunque sia la velocità con la quale sono applicati i carichi. In particolare, gli incrementi più elevati si sono riscontrati nel passaggio dai 25°C ai 5°C.
- 2) In corrispondenza della velocità massima (0,85 mm/sec) essa si triplica quando la temperatura di prova scende da 60°C a 45°C; è circa nove volte maggiore, invece, da 60°C a 25°C; infine, quaranta volte più grande tra i 60°C ed i 5°C.
- 3) Alla temperatura costante di 25°C e al crescere della velocità di applicazione dei carichi essa aumenta significativamente; in particolare, tale incremento è all'incirca di due, tre, quattro, cinque e sette volte man mano che si passa, rispettivamente, dal valore minimo di 0,02 mm/sec (assunto quale base di riferimento) a quelli intermedi e, infine, a quello massimo (0,85 mm/sec).

4) Ancora, le Figure 1 = 6 mostrano che i valori calcolati con la procedura lineare si presentano sempre inferiori a quelli ottenuti dalle altre due applicazioni, al contrario della procedura parabolica che fornisce i più elevati. La teoria del parabolico di rivoluzione, invece, dà risultati intermedi.

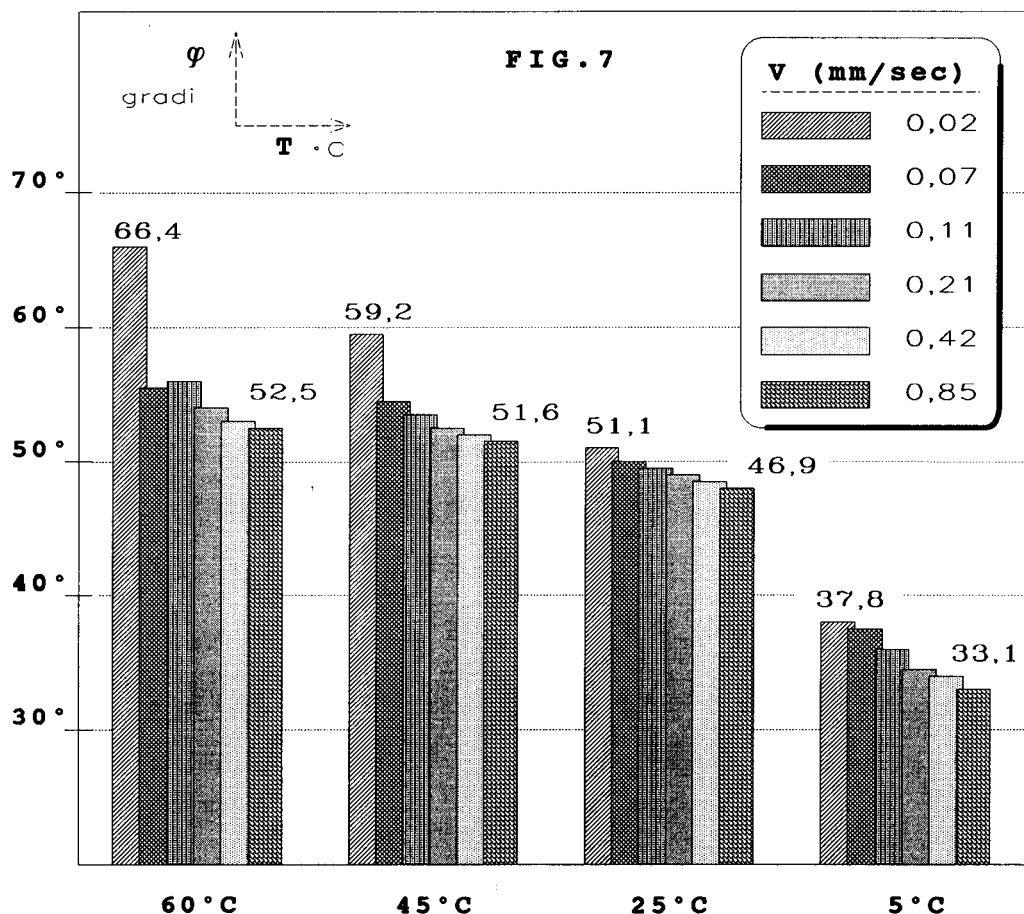




4. L'angolo d'attrito interno (φ): i risultati

Del tutto diverse appaiono le valutazioni sull'entità dell'angolo d'attrito interno allorché si modificano i parametri temperatura e velocità. Infatti il valore di φ si riduce al diminuire della temperatura di prova; al medesimo risultato si perviene se le prove vengono condotte a velocità crescenti. Tali riduzioni, però, appaiono molto più contenute rispetto a quelle riscontrate, in precedenza, per la coesione. In particolare si può affermare quanto segue

- 1) Alla temperatura costante di 60°C l'angolo φ assume, nel campo delle velocità esaminate, scostamenti sensibili e, comunque, compresi tra un minimo di 52,5 gradi sessagesimali ed un massimo di 66,4 gradi. Questo intervallo si modifica, riducendosi anche in ampiezza, per più basse temperature di prova. Così, ad esempio, per $T=5^\circ\text{C}$ è risultato: $37,8 \div 33,1$ gradi. La Figura 7 riporta i risultati numerici ottenuti in corrispondenza delle temperature considerate
- 2) Mantenendo costante la velocità massima, invece, si notano modeste variazioni se la temperatura di prova è compresa tra i 60 ed i 25°C. In questo caso l'entità dell'angolo d'attrito interno è pari all'89% circa del valore (assunto quale base di riferimento) corrispondente alla temperatura di 60°C. Questa percentuale, pur con modesti scarti, si è sempre-presentata per tutte le velocità esaminate.



- Ne consegue, quindi, che nel campo delle temperature 25 ÷ 60°C la velocità influenza poco la misura di φ .
- 3) Infine, fissata una temperatura di prova (compresa, però, tra 25°C e 45°C), l'incremento della velocità dal valore minimo (0,02 mm/sec) a quello massimo (0,85 mm/sec) determina riduzioni di φ valutabili, mediamente, intorno al 10% circa; in corrispondenza della temperatura più alta, invece, tale riduzione è del 20% circa.

5. Considerazioni sulla coesione

L'analisi effettuata dopo la sperimentazione ha evidenziato che il legame tra la variabile dipendente C (coesione) e quelle indipendenti, V (velocità) e T (temperatura), può essere ben rappresentato da una funzione del tipo:

$$C(V,T) = \frac{a(V)}{b^T} \quad (1)$$

essendo:

- C (V,T) la coesione legata alle grandezze V e T
- a (V) una funzione della velocità
- b una costante numerica
- T la temperatura di prova.

La (1) si è ottimamente adattata ad ognuna delle velocità esaminate e per l'intero intervallo delle temperature: 5°C - 60°C. La Tabella II mostra i valori numerici di a (V), di b e dei coefficienti di correlazione (r) di tutte le curve corrispondenti alle sei velocità.

L'esame di questa tabella consente di formulare alcune importanti considerazioni.

- 1) Per ciascuna velocità i coefficienti di correlazione appaiono prossimi all'unità e confermano, quindi, il buon adattamento della curva teorica ai risultati della sperimentazione.
- 2) Questi coefficienti, tra l'altro, si incrementano in corrispondenza delle velocità maggiori; in particolare, il valore più elevato (r=0,997) si raggiunge, non a caso, per V=0,85 mm/sec.
- 3) Il termine b può essere ritenuto indipendente dalla velocità giacché assume quasi lo stesso valore: 1,065 (per le successive elaborazioni si è considerato costante e pari ad 1,065).
- 4) Il parametro a (V), invece, subisce rapidi incrementi all'aumentare della velocità; in particolare, si è calcolato che:

$$a(V) = K_1 V^{K_2} \quad (2)$$

con K_1 e K_2 costanti numeriche caratteristiche della miscela bituminosa. Per quella in esame si è ottenuto: $K_1 = 98,43$ e $K_2 = 0,546$.

Sulla scorta di quanto emerso si sono così costruite, per ogni velocità V, le sei curve di equazione:

$$C(V,T) = \frac{K_1 V^{K_2}}{K^T}$$

Esse, riportate nel piano cartesiano T (°C) - C (daN/cm²), coprono l'intero campo delle temperature: 5°C ÷ 60°C (Figura 8). Al di là di ovvie considerazioni sul loro andamen-

TAB. 2

$C(V,T) = \frac{a(V)}{b^T}$			
V mm/sec	a (V)	b	r
0,02	10,84	1,062	0,976
0,07	18,32	1,058	0,975
0,11	38,28	1,067	0,987
0,21	51,93	1,068	0,987
0,42	61,41	1,067	0,991
0,85	75,44	1,068	0,997

to, si ritiene importante evidenziare che per qualsivoglia valore della velocità V il rapporto tra la coesione massima (riscontrabile a 5°C) e quella minima (a 60°C) è pressoché costante. Esso, quindi, non appare influenzato dalla misura della velocità con cui sono applicati i carichi. La Tabella III, per confermare quanto asserito, riporta i valori teorici di questo rapporto compresi nel ristretto intervallo: $31,87 = 33,60$.

6. Considerazioni sull'angolo d'attrito interno

Anche per l'angolo d'attrito interno, seguendo il medesimo iter, si è giunti, inizialmente, ad una funzione del tipo:

$$\varphi(V,T) = m(V)n^T \quad (4)$$

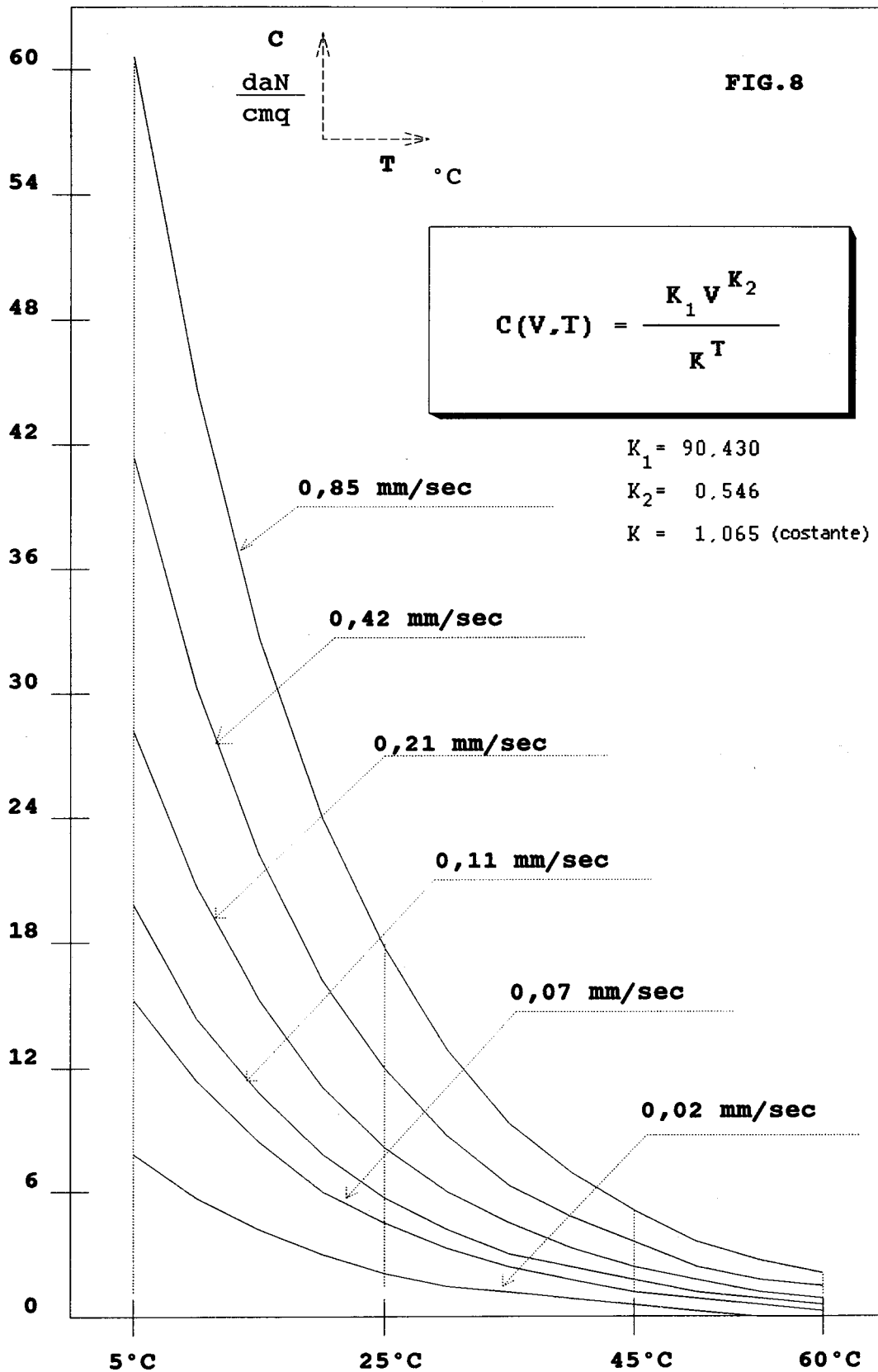
essendo:

- $\varphi(V,T)$ l'angolo cercato,
- m(V) una funzione della velocità,
- n una costante numerica,
- T la temperatura di prova.

In analogia a quanto sviluppato per l'altra caratteristica meccanica, si è costruita la Tabella IV nella quale compaiono, al variare della velocità, i termini V, m, n ed i soliti coefficienti di correlazione r.

L'esame di questa tabella evidenzia quanto segue.

- 1) I coefficienti di correlazione delle equazioni (4) appaiono elevati e prossimi all'unità; tuttavia, si presentano, a parità di velocità (tranne che per V = 0,02 mm/sec), leggermente inferiori rispetto a quelli rilevati dalla equazione (1).
- 2) Il più elevato coefficiente di correlazione si è ottenuto in corrispondenza della velocità minima, contrariamente a quanto emerso, invece, per la coesione.
- 3) Il parametro m(V) presenta modesti scostamenti al variare di V. Si ritiene che possa essere correlato alla velocità attraverso un'equazione del tipo:



TAB. 3

V mm/sec	0,02	0,07	0,11	0,21	0,42	0,85
$\frac{C \text{ max } (5^\circ\text{C})}{C \text{ min } (60^\circ\text{C})}$	30,15	29,89	30,60	30,44	30,61	30,52

$$m(V) = K_1 - K_2V + K_3V^2 \quad (5)$$

essendo le costanti K_i ($i = 1, 2, 3$) legate, ancora una volta, al particolare tipo di miscela. Nel caso specifico esse assumono i seguenti valori:

$$K_1 = 38,24; K_2 = 11,90; K_3 = 8,68$$

- 4) Ancora, n è sicuramente costante poiché si è riscontrato che il suo campo di variazione è compreso tra i valori 1,006 e 1,010.

Ne è scaturita, in definitiva, una funzione generale del tipo:

$$\varphi(V,T) = (K_1 - K_2V + K_3V^2) K^T \quad (6)$$

con K (volutamente approssimato alla seconda cifra decimale) pari a: $K = n = 1,01 = \text{costante}$.

L'utilizzo delle equazioni (6) ha consentito di tracciare le sei curve (una per ogni valore della velocità V) mostrate nella Figura 9; l'asse delle ascisse riporta le temperature esaminate ($5^\circ\text{C} \div 60^\circ\text{C}$), mentre quello delle ordinate il valore, espresso in gradi, dell'angolo d'attrito interno. Si rileva che le curve si presentano:

- crescenti per più alti valori della temperatura,
- pressoché parallele tra di loro (in realtà, si aprono leggermente verso i 60°C e, viceversa, si avvicinano gradualmente in prossimità della temperatura di prova più bassa)
- molto vicine tra di loro.

Infine, anche per l'angolo d'attrito interno si è ottenuta la costanza del rapporto tra $\varphi \text{ max}$ (a 60°C) e $\varphi \text{ min}$ (a 5°C), pur in presenza di notevoli variazioni della velocità. Tale caratteristica, tuttavia, appare decisamente più marcata rispetto all'analogia osservata per la coesione; il rapporto, infatti, è risultato sempre costante e pari ad 1,73 (Tabella V).

7. Considerazioni conclusive

La sperimentazione effettuata ha confermato la notevole influenza che i parametri temperatura e velocità di applica-

TAB. 4

$\varphi(V,T) = m(V) n^T$			
V mm/sec	m(V)	n	r
0,02	37,45	1,010	0,983
0,07	38,76	1,006	0,902
0,11	36,73	1,007	0,920
0,21	35,38	1,008	0,906
0,42	35,13	1,007	0,899
0,85	34,36	1,008	0,897

zione dei carichi esercitano sulle caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose.

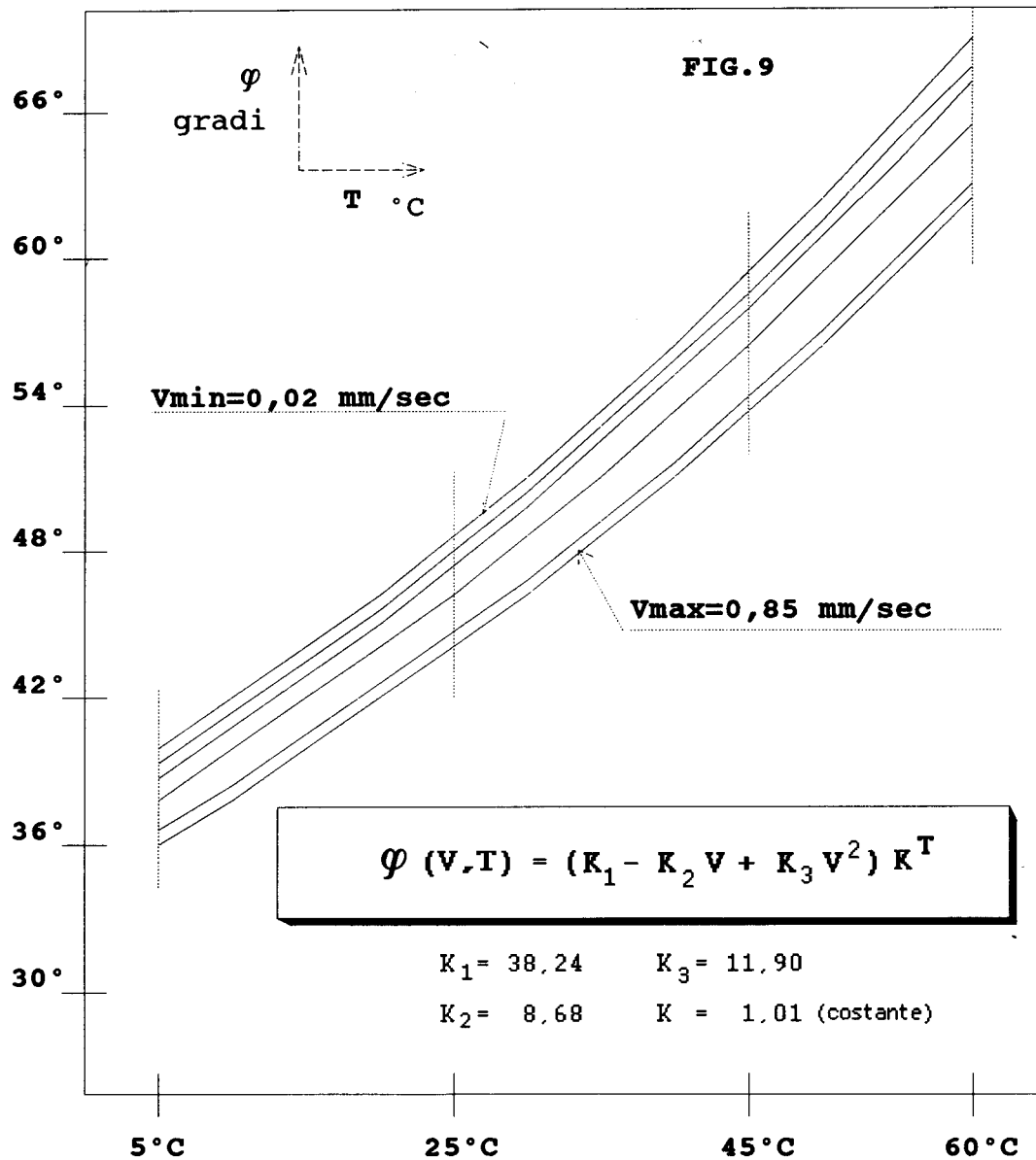
In particolare, è emerso che i valori della coesione crescono al ridursi della temperatura e all'aumentare della velocità di prova secondo una legge matematica definita dalla equazione (3); in essa compaiono tre costanti numeriche due delle quali legate alla particolare miscela utilizzata.

Viceversa, l'angolo d'attrito interno si incrementa per più alti valori della temperatura di prova ed in corrispondenza delle velocità inferiori (equazione (6)). Anche per questa caratteristica meccanica si è evidenziata una costante numerica indipendente dalla miscela esaminata.

Infine, interessante è apparsa la costanza del rapporto tra i valori massimi e minimi assunti dalla coesione e, soprattutto, dall'angolo d'attrito interno nell'intero campo delle velocità applicate.

TAB. 5

V mm/sec	0,02	0,07	0,11	0,21	0,42	0,85
$\frac{\varphi \text{ max } (60^\circ\text{C})}{\varphi \text{ min } (5^\circ\text{C})}$	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73



BIBLIOGRAFIA

- 1) P. FERRARI, F. GIANNINI: *Corpo stradale e pavimentazioni*, ISEDI, 1983.
- 2) U. BONVINO: *Applicazioni della curva intrinseca parabolica alle pavimentazioni stradali in calcestruzzo di cemento fibrorinforzato*, Giornate AICAP 89, Napoli 4-6 maggio 1989. Tema A: "Materiali e tecniche speciali nella realizzazione di opere in c.a. e c.a.p. Aspetti applicativi". Pag. 307-320.
- 3) U. BONVINO: *La coesione dei conglomerati bituminosi "aperti" e la teoria del paraboloide di rivoluzione*. Le Strade n. 1252, 1988, pag. 1015-1019.
- 4) U. BONVINO: *Prestazioni delle miscele bituminose sottoposte a sollecitazioni di trazione e di compressione*. XXI Convegno Nazionale Stradale 1990. Trieste. Tema II - Gruppo 4, Pagine 9-17.