

Capitolo primo

GENERALITA'

1.1. Proprietà del conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso è un materiale a comportamento elasto-plasto-viscoso, la cui risposta alle sollecitazioni esterne, in termini di deformazione, dipende non solo dall'entità, ma anche dal tempo e dalle modalità di applicazione dei carichi, nonché dalla temperatura.

In altre parole, la rigidità di uno strato legato a bitume sarà molto diversa se si passa da un carico agente staticamente ad uno agente dinamicamente o se, a parità di carico, il materiale si trova ad una temperatura alta o bassa.

Caratteristici di un conglomerato bituminoso sono:

- Lo scorrimento viscoso con accumulo di deformazioni permanenti sotto l'azione di carichi statici o dinamici;
- la rottura per fatica, conseguenza della modifica della struttura interna che le ripetute deformazioni provocano nel materiale.

Queste sono le principali cause di crisi delle pavimentazioni flessibili, in quanto da esse discendono la fessurazione e la formazione delle ormaie.

1.2. Caratterizzazione del conglomerato in relazione ai modelli di calcolo

Per la progettazione delle pavimentazioni occorre determinare lo stato tensionale e deformativo del conglomerato bituminoso in modo che, nota la legge di fatica (relazione tra le deformazioni unitarie e il numero di ripetizioni di tali deformazioni che conducono alla rottura) e quella di deformazione del materiale nel tempo (relazione tra le deformazioni unitarie e le tensioni statiche o dinamiche agenti) è possibile calcolare il numero di ripetizioni di carico che produce la rottura e cioè la cosiddetta "vita utile", nonché la profondità delle ormaie.

Per la determinazione delle tensioni e delle deformazioni occorre applicare opportuni modelli di calcolo che richiedono una appropriata caratterizzazione dei materiali.

I modelli di calcolo oggi utilizzati per le pavimentazioni possono essere classificati in due categorie:

- modelli elastici,
- modelli viscoelastici.

I modelli elastici presuppongono che i materiali posseggano le proprietà di omogeneità, isotropia e di elasticità (generalmente lineare) e quindi siano caratterizzabili mediante il modulo di Young E ed il coefficiente di Poisson μ . Ora, i conglomerati bituminosi possono considerarsi con buona approssimazione omogenei ed isotropi ma, come si è già detto, non presentano un

comportamento puramente elastico, quindi, per poter utilizzare detti metodi è necessario definire dei parametri pseudoelastici che riassumono in se le proprietà visco-elastiche ¹ del materiale: il modulo complesso ed il rapporto complesso di Poisson.

I metodi viscoelastici considerano invece, almeno nelle versioni più evolute, le reali caratteristiche reologiche dei conglomerati bituminosi e le effettive modalità di carico (veicoli in movimento). E' sufficiente, quindi, per la loro utilizzazione definire la funzione di deformazione nel tempo, sotto carico costante ²

1.3 I parametri caratterizzanti il conglomerato

Si definiscono di seguito i parametri, di cui innanzi si è fatto cenno, occorrenti generalmente per caratterizzare il conglomerato ai fini del calcolo razionale delle pavimentazioni.

Modulo complesso

Il modulo complesso E^* , omologo del modulo di Young definito in campo elastico, è dato dal rapporto fra tensione dinamica $\sigma(t)$ (agente in stato tensionale monoassiale) e la corrispondente deformazione $\varepsilon(t)$:

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}$$

Come verrà meglio mostrato nel capitolo seguente esso è un numero complesso la cui parte reale riassume le proprietà elastiche del materiale, mentre il coefficiente dell'unità immaginaria ne riassume le proprietà viscose (caratteristiche intrinseche di viscosità del materiale e tempi di carico). Nei calcoli viene adoperato il valore del modulo complesso $|E^*|$

Rapporto complesso di Poisson

Il rapporto complesso di Poisson γ^* , omologo del coefficiente di Poisson definito in campo elastico è dato dal rapporto fra la deformazione trasversale $\varepsilon_n(t)$ e quella longitudinale $\varepsilon(t)$ provocate da una tensione dinamica $\sigma(t)$ (stato tensionale monoassiale) agente in direzione longitudinale.

$$\gamma^* = \frac{\varepsilon_n(t)}{\varepsilon(t)}$$

E' anch'esso un numero complesso di cui si utilizza nei calcoli il valore assoluto.

¹ Si ipotizza di rimanere nel campo delle piccole deformazioni per cui non si considerano le componenti visco-plastiche, anzi può ritenersi di trovarsi in regime di viscoelasticità lineare.

² Si ricorda a proposito il VESTRA, elaborato dall'AGIP nel 1977 [4], che è basato su un modello di calcolo viscoelastico generale; pertanto esso si differenzia dai modelli di calcolo antecedenti che schematizzano il conglomerato bituminoso in maniera troppo semplicistica avvalendosi dei classici modelli fenomenologici (Maxwell, Kelvin, Voigt, etc.) e che risultavano di scarsa utilità essenzialmente per la nota difficoltà da correlare i relativi parametri con le prove di laboratorio.

Funzione di deformazione (creep compliance)

La funzione di deformazione (detta comunemente di creep compliance o semplicemente di creep) $J(t)$ rappresenta la deformabilità a tensione costante del materiale nel tempo ed è data dal rapporto fra la deformazione $\varepsilon(t)$ e la tensione statica σ_0 agente in state monoassiale:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$$

In sostanza la $J(t)$ è una funzione di scorrimento viscoso idonea a valutare l'influenza del tempo di sollecitazione sul comportamento del materiale,

Va infine tenuto presente che nei più moderni criteri di calcolo è spesso richiesta la conoscenza di un ulteriore parametro che caratterizza le condizioni di aderenza degli strati fra di loro³(3).

Tale parametro è il modulo di reazione orizzontale all'interfaccia, esso lega gli spostamenti relativi orizzontali Δu fra due punti a contatto appartenenti a strati diversi con la sollecitazione tagliante presente T ⁴:

$$K = \frac{\tau}{\Delta u}$$

In taluni metodi di calcolo il legame fra gli strati all'interfaccia è espresso tramite la ben nota legge di Coulomb:

$$\tau = c_g + \sigma \operatorname{tg} \psi$$

In tal caso intervengono, non più uno, ma due parametri a caratterizzare l'aderenza: l'adesione c_g ed il coefficiente di attrito $\operatorname{tg} \psi$.

1.4. Determinazione dei parametri

La determinazione dei parametri di cui innanzi si è detto richiede delle prove di laboratorio, che saranno illustrate nel cap. IV, in genere piuttosto complesse e per le quali è necessario disporre di apparecchiature sofisticate e costose.

³ In alcuni metodi di calcolo questo parametro non compare esplicitamente in quanto viene ipotizzato il perfetto scorrimento o, più spesso, la perfetta aderenza fra gli strati.

⁴ Si noti che nel programma di calcolo BISAR, elaborato dal Koninklijke Shell Laboratorium di Amsterdam per la risoluzione del multistrato elastico, e che è fra quelli di più comune impiego in campo internazionale e in Italia, il parametro che caratterizza l'aderenza all'interfaccia (indicato col simbolo AK e chiamato spring compliance) è l'inverso di K:

$$AK = \frac{1}{K} = \frac{\Delta u}{\tau}$$

Per ovviare a questi inconvenienti la ricerca scientifica internazionale si è orientata, almeno per uno dei parametri di maggiore importanza, il modulo complesso, verso la elaborazione di metodi di calcolo (i cosiddetti "metodi previsionali"), fondati sulle risultanze di vaste sperimentazioni, che permettono di valutare tale parametro sulla base di altri di più facile determinazione (penetrazione, punto di rammollimento del bitume, composizione della miscela, etc.) come è illustrato nel cap III.

Così pure, nel caso di pavimentazioni esistenti, di cui occorre conoscere i moduli per eventuali interventi manutentivi, sono state messe a punto delle prove in sito di più semplice e rapida esecuzione (ved. Par. 4.2.3).

Per il rapporto complesso di Poisson, data la minore importanza che una sua precisa determinazione ha nel calcolo delle pavimentazioni, non vi è stato ancora, salvo gli studi di qualche autore, un sensibile impegno di ricerca nella elaborazione di metodi professionali.

La prova per la determinazione della "funzione di Creep", messa a punto in Italia, richiede un'attrezzatura meno impegnativa di quella occorrente per la determinazione del modulo complesso.

Da che dalla conoscenza della "funzioni di creep" è possibile risalire anche al "valore assoluto dl modulo complesso", si tende, specialmente nel nostro Paese, ad utilizzare la prova di creep per quest'ultimo scopo (ved. Par. 4.1.2.3).

Per quanto riguarda la determinazione dell'aderenza fra gli strati va osservato che ben pochi laboratori dispongono dell'attrezzatura necessaria e che quindi spesso bisogna ricorrere ai valori forniti dalla letteratura scientifica, peraltro assai limitata fino a questo momento.

Capitolo secondo

SUI PARAMETRI VISCOELASTICI

2.1. La funzione di creep

La funzione di deformazione (o di creep) rappresenta, come si è detto nel cap. I, la deformabilità a tensione costante del materiale nel tempo ed è espressa dalla relazione:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$$

in cui:

$\varepsilon(t)$ = deformazione all'istante t ;

σ_0 = sollecitazione statica applicata (stato monoassiale).

Può dirsi, quindi, che la funzione di creep rappresenta la "deformazione nel tempo per unità di sforzo applicato"

Essa varia con la temperatura a causa della suscettibilità termica del bitume.

Andamenti tipici di $J(t)$ col tempo, e per varie temperature, sono rappresentati in fig. II.1.; come è naturale, la deformazione sotto carico $J(t)$ aumenta col tempo ed è tanto più grande quanta maggiore è la temperatura.

Il diagramma, tracciato in scale logaritmiche, è relativo a tempi brevi di carico, per i tempi più lunghi, che occorrono per la valutazione del tasso di deformazione permanente, il diagramma viene rappresentato in scale lineari, come verrà descritto al par. 4.1.

La funzione $J(t)$ viene rappresentata, ai fini del calcolo delle pavimentazioni flessibili, attraverso i seguenti tre parametri che costituiscono i dati d'ingresso dei metodi di calcolo viscoelastici:

- J_1 = valore della funzione $J(t)$ per $t = 1$ s. Viene espresso comunemente in $\text{cm}^2/\text{daN} \cdot \text{s}^{-\alpha}$;
- α = valore della pendenza della funzione $J(t)$ nella parte iniziale (lineare) della rappresentazione su scale logaritmiche. È un parametro adimensionale;
- J_p = deformazione unitaria permanente per unità di tempo di carico e per unità di sforzo applicato (rappresenta anche la tangente alla curva $J(t)$ al tempo massimo di carico nel diagramma in scale lineari – ved. par. 4.1, fig. IV.2 –). Viene espresso in $\text{cm}^2/\text{daN} \cdot \text{s}$.

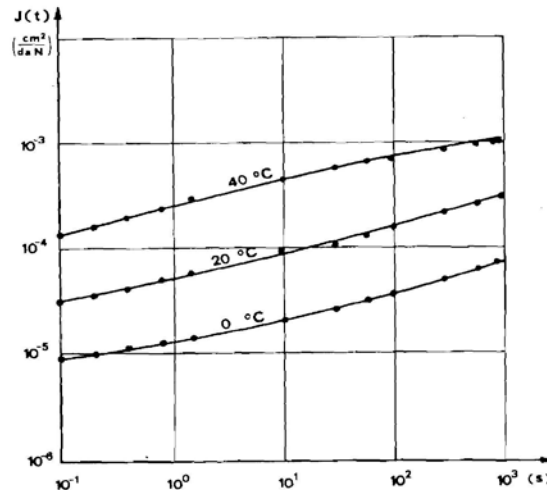


Fig. II.1 La funzione di creep compliance per un dato conglomerato a varie temperature [5]

Precisamente i parametri J_1 ed α occorrono per il calcolo delle deformazioni viscoelastiche, mentre J_p è necessaria per il calcolo delle deformazioni permanenti.

È interessante osservare che i tre parametri sono rappresentativi di altrettante proprietà del conglomerato bituminoso. Difatti:

- il parametro J_1 è legato alla rigidità della miscela, risultando tanto più piccolo quanto maggiore è tale rigidità;
- il parametro α dà una misura del comportamento elastico: esso diminuisce quando più spiccato è tale comportamento, assumendo valore zero per materiali non viscosi;
- il parametro J_p caratterizza, infine, il comportamento visco-plastico, risultando tanto più grande quanto maggiori sono le deformazioni di tale natura.

Gli anzidetti parametri dipendono naturalmente, oltre che dalla temperatura, anche dalle caratteristiche intrinseche del conglomerato e cioè la natura e la forma degli inerti, il tipo di legante, la composizione della miscela, che, influenzando le proprietà adesive tra il bitume e il supporto litico [1], determinano la resistenza del conglomerato stesso.

Per una migliore comprensione della funzione di creep si veda anche quanto esposto al par. 4.1.

2.2. Il modulo complesso

Per l'applicazione dei modelli di calcolo elastici alle sovrastrutture flessibili occorre conoscere, come si è già accennato nel cap. I, la risposta dei conglomerati bituminosi alle sollecitazioni provocate dalle ruote dei veicoli transitanti sulla pavimentazione.

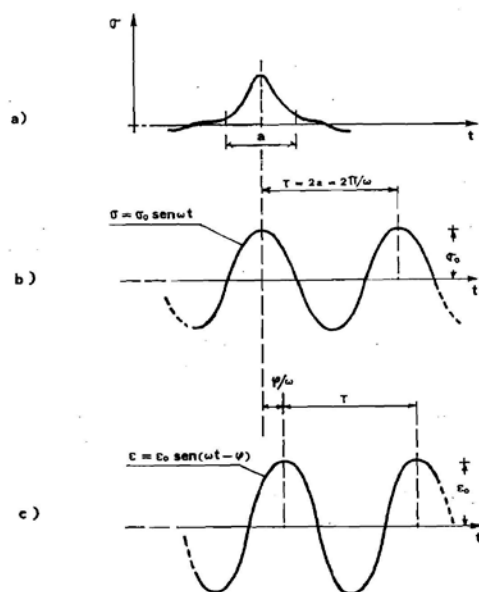


Fig. II.2. - Sollecitazioni e deformazioni orizzontali nel conglomerato bituminoso di una pavimentazione.
a) Andamento reale della sollecitazione;
b) schematizzazione sinusoidale della sollecitazione;
c) schematizzazione della deformazione corrispondente.

L'andamento della sollecitazione orizzontale in un punto di essa e, con buona approssimazione, del tipo rappresentato in fig. II.2.a, con un picco in corrispondenza del passaggio di una ruota. L'estensione temporale "a" del picco dipende dalla velocità e dalle dimensioni dell'area di impronta del pneumatico (cfr.par. 2.5).

Ai fini pratici si può assimilare l'andamento di tale sollecitazioni trascurando la parte esterna all'intervallo a) ad una semionda sinusoidale. (fig. II.2.b) di periodo $T=2a$ (ovvero frequenza $f=1/T$ e pulsazione $\omega=2\pi/T$):

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen} \omega t$$

La deformazione corrispondente sarà allora anch'essa sinusoidale⁵ con pari frequenza (fig. II.2.c), ma affetta da uno sfasamento ϕ , conseguenza del citato carattere viscoelastico del materiale:

⁵ Le leggi di variazione della tensione e della deformazione sono dello stesso tipo se l'entità delle deformazioni è abbastanza modesta ($\epsilon < 10^{-4}$), tanto da potersi ritenere che il materiale resti nel campo della viscoelasticità lineare.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

Per generalizzare le leggi della meccanica, normalmente limitate ai corpi elastici, è stato introdotto il concetto di modulo complesso. Esso, come accennato nel cap I, in stato di sollecitazione monoassiale è fornito dal numero complesso:

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}$$

È possibile in tal modo, adoperare gli algoritmi di calcolo ricavati in base alla teoria dell'elasticità, anche per i corpi viscoelastici lineari, sostituendo al modulo di Young un modulo pseudo elastico, il valore assoluto del modulo complesso $|E^*|$. In notazione immaginaria il modulo complesso si scrive:

$$E^* = |E^*| e^{i\psi} = E_1 + iE_2$$

Dove

$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ è il citato valore assoluto del modulo complesso (detto anche modulo di rigidità ed indicato con la notazione S_m); esso rappresenta il parametro che occorre conoscere per il dimensionamento delle pavimentazioni;

φ è l'argomento del modulo complesso e rappresenta lo sfasamento tra la sollecitazione e la deformazione; esso dà una misura del carattere viscoso del materiale, essendo nullo per materiali perfettamente elastici e pari a 90° per materiali perfettamente viscosi;

$E_1 = |E^*| \cos \varphi$ è la parte reale del modulo complesso e ne rappresenta la componente elastica; prende anche il nome di modulo di restituzione⁶

$E_2 = |E^*| \sin \varphi$ è il coefficiente della parte immaginaria del modulo complesso e ne rappresenta la componente viscosa, è chiamata anche modulo di dissipazione.

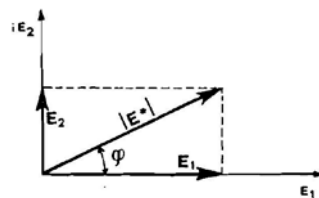


Fig. II.3. - Rappresentazione del modulo E^* nel piano complesso.

La rappresentazione del modulo E^* nel piano complesso è riportata in fig. II.3

⁶ Per $\psi=0$ E_1 coincidente con $|E^*|$ e coincide con il modulo di Young definito in campo elastico.

Il valore assoluto del modulo complesso $|E^*|$ e l'argomento ϕ variano in funzione della frequenza e della temperatura. Alcuni andamenti tipici per un dato conglomerato bituminoso sono rappresentati nelle figure II.4 e II.5.

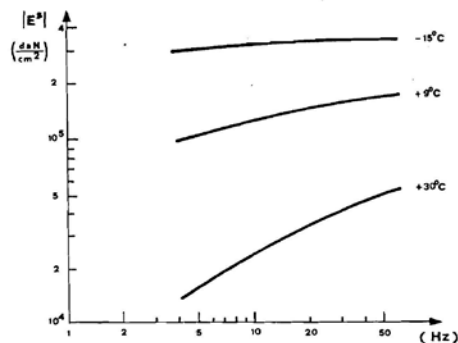


Fig. II.4. - Effetto della temperatura e della frequenza sul valore assoluto del modulo complesso di un dato conglomerato bituminoso [7].

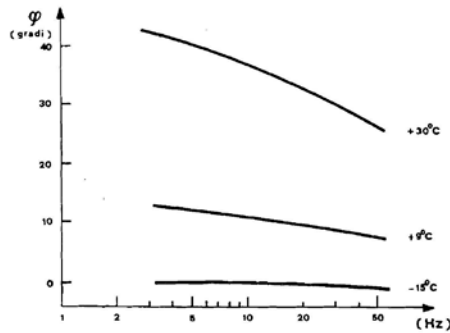


Fig. II.5. - Effetto della temperatura e della frequenza sullo sfasamento di un dato conglomerato bituminoso [7].

Come può notarsi $|E^*|$ cresce col diminuire della temperatura e col crescere della frequenza (tempo di carico breve), divenendo il materiale sempre più rigido ⁷. Lo sfasamento ϕ , invece,

⁷ Le poche esperienze finora condotte su materiali legati a catrame [15], hanno messo in evidenza andamenti qualitativamente simili a quelli che si hanno nei conglomerati bituminosi, ma con valori di $|E^*|$ sensibilmente più alti e valori di ϕ viceversa più bassi (con un comportamento, quindi più prossimo a quello elastico), come è riscontrabile dalla tabella seguente in cui sono riportate, a titolo esemplificativo, alcuni valori sperimentali per due miscele in tutto identiche salvo che per il tipo di legante.

Valori di $ E^* $ (daN/cm ²) e di ϕ per miscele legate con bitume o con catrame [15]							
Miscela	Frequenza di prova	Temperatura					
		0°C		15°C		30°C	
		$ E^* $	ϕ	$ E^* $	ϕ	$ E^* $	ϕ
conglomerato bituminoso penetr. bitume: 93 dmm	22 Hz	215.000	16°	76.000	31°	18.000	48°
	52 Hz	240.000	14°	98.000	28°	22.000	49°
miscela catramata catr. EVT = 55,4°C	22 Hz	424.000	6°	251.000	17°	≈60.000	≈40°
	52 Hz	438.000	5°	284.000	15°	≈86.000	≈37°

presenta un andamento contrario, assumendo il materiale un comportamento più vicino a quello perfettamente elastico⁸.

Nel diagramma di fig. II.6 sono riportate le fasce entro le quali generalmente ricade il valore assoluto del modulo complesso, per varie temperature e per gli intervalli di frequenza 20 ÷ 50 Hz, rappresentativi delle situazioni che più frequentemente si riscontrano, rispettivamente, per le pavimentazioni stradali e per quelle aeroportuali (cfr. par. 2.5).

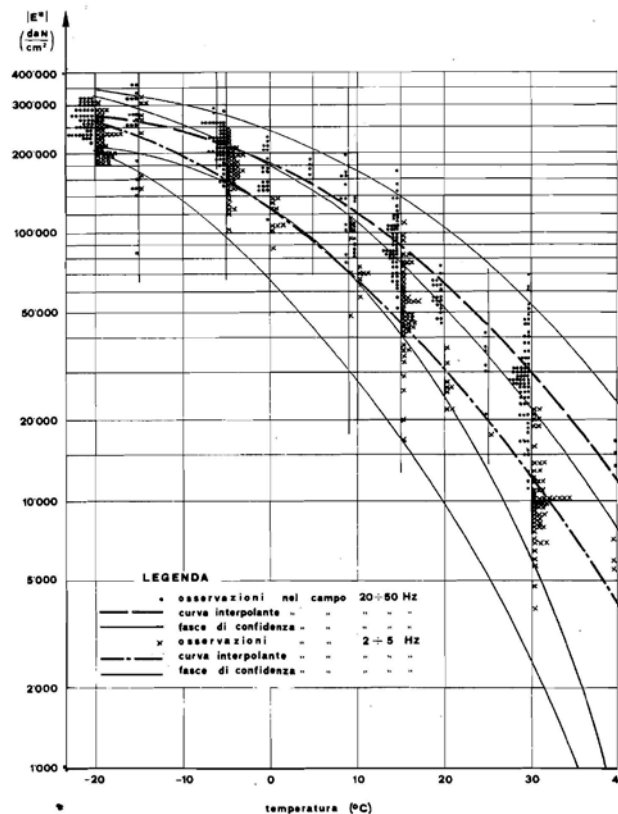


Fig. II.6. - Fasce di valori di $|E^*|$ desunte da prove sperimentali effettuate da vari ricercatori [note bibliografiche 7, 15, 24, 58, 69, 70, 72 e 74].

La costruzione di siffatto diagramma è apparsa cosa utile in quanto può fornire un'informazione, sia pure molto approssimativa, sull'ordine di grandezza del valore assoluto del modulo complesso e sulla variabilità con la temperatura e con la frequenza.

Esso è stato ricavato esaminando i risultati di circa 600 prove effettuate su vari conglomerati da più ricercatori di diversi paesi [7] [15] [24] [58] [69] [70] [72] [74], distinguendoli per campi di frequenza e ricavando, per ciascun campo, le leggi statistiche di regressione (ved. Appendice A)⁹. Individuate così le curve interpolate e calcolati, per ciascuna di esse per ogni temperatura, gli scarti quadratici medi s , sono state disegnate fasce di ampiezza $\pm 2s$ intorno a tali curve (6)¹⁰.

⁸ Invero il suddetto effetto della temperatura su $|E^*|$ e ϕ è stato sperimentalmente confermato da vari ricercatori. Così pure le conseguenze su $|E^*|$ della frequenza. L'effetto, invece, di questa sullo sfasamento, peraltro non facilmente intuibile, non è risultato sempre dello stesso segno.

Difatti, mentre alcuni ricercatori [7] [24] [58] [74], operando su vari materiali, hanno ottenuto risultati che mostrano come lo sfasamento diminuisca all'aumentare della frequenza, altri [15] [69] su conglomerati diversi, ma sempre di comune impiego nel campo stradale ed aeroportuale, hanno riscontrato che, almeno alle temperature più elevate (30 – 40 °C) accade il contrario.

⁹ Le curve che interpolano bene i risultati sperimentali sono risultate del tipo $\log y = ax^2 + bx + c$ con $a = -0.000362$, $b = -0.0159$, $c = 5,255$ e coefficiente di determinazione $R^2 = 0.939$ per il campo di frequenze 20 ÷ 50 Hz, e con $a = -0.000354$, $b = -0.0240$, $c = 5,089$ ed $R^2 = 0.935$ per il campo di frequenze 2 ÷ 5 Hz (si veda in proposito l'Appendice A).

Le fasce, come può osservarsi, risultano notevolmente ampie e ciò in relazione al fatto che esse comprendono i più svariati tipi di materiale adoperati in campo stradale ed aeroportuale. In linea di massima può dirsi, però, che i valori maggiori sono relativi a conglomerati chiusi (piccola percentuale dei vuoti), del tipo per strati d'usura, e confezionati con bitumi duri (bassa penetrazione), mentre i valori più bassi si hanno per conglomerati semichiusi o aperti, e confezionati con bitumi di minore consistenza.

In Tab.II.1 sono riportati alcuni valori di IE^*I e di φ , misurati su strati di usura, collegamento e base, di una pavimentazione autostradale italiana (tronco Mestre - Vittorio Veneto) [69].

Tab. II.1 - Valori di $|E^*|$, φ e $|\nu^*|$ di una pavimentazione autostradale italiana (tronco Mestre-Vittorio Veneto) [69].

Strato	Frequenza	TEMPERATURA						CARATTERISTICHE FISICHE DEL CONGLOMERATO						
		0°C			20°C			40°C			Vol. vuoti V_a %	Vol. aggreg. V_g %	peso bitume $\times 100$ / peso aggreg.	Tipo bitume
		$ E^* $ (daN/cm ²)	φ (gradi)	$ \nu^* $	$ E^* $ (daN/cm ²)	φ (gradi)	$ \nu^* $	$ E^* $ (daN/cm ²)	φ (gradi)	$ \nu^* $				
Usura	3 Hz	130.000	12°	0,36	37.500	28°	0,41	6.500	31°	0,40	5,2	82,2	5,5	60/80
	30 Hz	167.500	10°	0,33	70.500	27°	0,41	14.500	37°	0,41				
Collegamento (binder)	3 Hz	127.000	14°	0,30	32.000	26°	0,36	5.500	28°	0,29	6,5	83,6	4,4	60/80
	30 Hz	167.000	12°	0,29	65.000	25°	0,34	13.500	31°	0,34				
Base	3 Hz	109.000	15°	0,26	22.000	31°	0,35	—	—	—	6,2	84,9	3,8	80/100
	30 Hz	151.000	12°	0,25	47.000	29°	0,32	—	—	—				

In fig. II.7 è invece rappresentato, indicativamente, l'effetto della consistenza del bitume sul modulo $|E^*|$ particolarmente sensibile alle alte temperature.

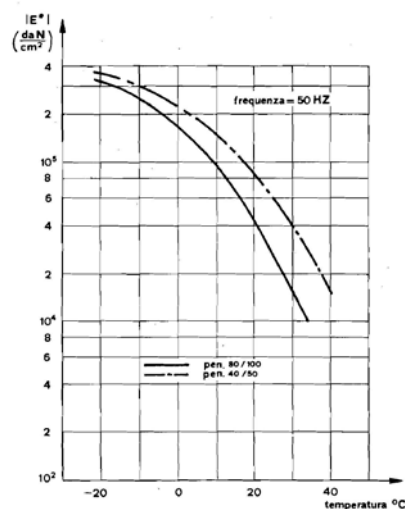


Fig. II.7 -Effetto del tipo di bitume sui valore assoluto del modulo complesso $|E^*|$, per un dato conglomerato bituminoso [7].

¹⁰ Come è noto, nel caso di distribuzioni normali, quali sono – come si è verificato - quelle dei risultati esaminati per le varie temperature, la probabilità che un valore resti al di fuori di un intervallo di ampiezza $\pm 2 s$ intorno al valor medio, è solo del 5% circa.

2.3. Il rapporto complesso di Poisson

Per un materiale elastico, come è noto, detti ε la deformazione unitaria longitudinale nella direzione del carico applicato (in stato monoassiale), ed ε_n la deformazione unitaria trasversale che è associata ad essa, si definisce "coefficiente di Poisson" il rapporto.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_n(t)}{\varepsilon(t)}$$

Per i conglomerati bituminosi, a causa del citato comportamento viscoso, per poter applicare i metodi di calcolo elastico, occorre definire -come si è accennato al Cap. un parametro viscoelastico omologo del coefficiente di Poisson (similmente a quanto fatto per il modulo di Young).

Lo studio del comportamento dei materiali viscoelastici lineari, che ha condotto alla definizione di E^* , può essere esteso ad un'analisi tridimensionale (sempre in stato tensionale monoassiale) nell'ipotesi - accettabile nel campo delle piccole deformazioni - che lo sforzo e la deformazione in una direzione siano legati linearmente alle deformazioni nelle direzioni perpendicolari.

Si è introdotto così il rapporto complesso di Poisson μ^* fornito dal numero complesso:

$$\mu^* = \frac{\varepsilon_n(t)}{\varepsilon(t)}$$

dove:

$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t$ è la deformazione unitaria longitudinale nella direzione del carico applicato, variabile sinusoidalmente col tempo e di ampiezza ε_0 ;

ed:

$\varepsilon_n(t) = \varepsilon_{n0} \sin(\omega t - \varphi')$ è la deformazione unitaria trasversale ad essa associata, di ampiezza ε_{n0} e sfasata dell'angolo φ' .

Il valore assoluto del rapporto di Poisson è:

$$|\mu| = \frac{\varepsilon_{n0}}{\varepsilon_0}$$

e va a coincidere con il coefficiente di Poisson fornito dalla (II.1), nel caso limite di comportamento elastico del conglomerato bituminoso (temperature basse e tempi di carico molto brevi).

Alcuni valori tipici di $|\mu^*|$ sono riportati nella Tab. II.2. Tali valori, desunti da uno studio effettuato da Monismith e Secor [43], mostrano una tendenza del rapporto di Poisson a crescere con la temperatura. Tale tendenza è confermata dagli studi effettuati da Nair e Chang [46], nonché da Verga e Battiato (cfr. Tab. II.1), almeno fino a temperature di circa 20°C.

Temperatura °C	$ \nu^* $
5°	0,31 ÷ 0,37 *
25°	0,48 ÷ 0,49 *
60°	0,50 *

* A parità di temperatura i valori più piccoli corrispondono a tempi di carico più brevi.

Tab. II.2.. Influenza della temperatura sul rapporto di Poisson per un dato conglomerato [46].

In generale sembra potersi affermare che fino a temperature di 20 ÷ 25°C si ha un aumento più o meno sensibile del rapporto di Poisson con le temperature, mentre oltre tali valori esso resta pressoché costante o addirittura diminuisce.

Giannini [29] consiglia di adottare un coefficiente di 0,35 per le basse temperature e di 0,50 per le più alte.¹¹ Il tempo di carico pure influisce sul rapporto di Poisson: infatti si è riscontrato che al crescere della frequenza $|\mu^*|$ diminuisce, purché si resti entro temperature di 20 ÷ 25°C, oltre le quali non presenta apprezzabili variazioni o perfino aumenta.

2.4. L'aderenza fra gli strati

La conoscenza delle condizioni di aderenza che si realizzano all'interfaccia dei vari strati di una pavimentazione flessibile è di fondamentale importanza per una esatta valutazione della stato tensionale e deformativo, in modo particolare per gli strati superiori, nei quali il mutare dell'aderenza comporta variazioni nei valori delle sollecitazioni e delle deformazioni molto rilevanti, tali da implicare talvolta perfino il passaggio da uno stato di compressione ad uno di trazione¹².

In generale le condizioni di interfaccia tra strati di conglomerato bituminoso sono intermedie tra quelle di perfetta aderenza e di perfetto scorrimento.

Il parametro più comunemente adoperato per esprimere l'aderenza fra gli strati è il modulo di reazione orizzontale all'interfaccia dato dalla relazione:

$$K = \frac{\tau}{\Delta u}$$

dove:

τ = tensione tangenziale all'interfaccia;

¹¹ Talvolta si riscontrano anche valori superiori a 0,50: ciò indica che l'ipotesi di isotropia per il conglomerato bituminoso, in tal caso, non è più valida.

¹² Per esempio, come si può verificare, ma come pure è facilmente intuibile, in una pavimentazione costituita dagli usuali strati (fondazione, base, collegamento, usura), tutti perfettamente aderenti fra loro, e sottoposta al carico verticale trasmesso da un pneumatico, una sezione dello strato di usura in asse al carico risulta tutta compressa orizzontalmente (con diagramma di tensione trapezoidale). Se si considera, invece lo strato di usura perfettamente scorrevole su quello di collegamento (aderenza nulla), nel primo si avrà un diagramma di tensione a farfalla e quindi il lembo inferiore di tale strato risulterà teso.

Δu = spostamento orizzontale relativo tra le facce di due strati a contatto¹³

Il fenomeno dell'aderenza è dovuto essenzialmente ai seguenti fattori:

- azione adesiva del bitume
- penetrazione degli inerti di uno strato nei vuoti dell'altro¹⁴

E' logico quindi attendersi che essa dipenda :

- dall'entità della così detta mano di attacco, cioè dalla quantità di bitume spalmata fra due strati a contatto oltre che, naturalmente, dalla sua quantità);
- dall'energia di costipamento, che provoca l'anzidetta compenetrazione degli inerti;
- dall'entità della pressione verticale provocata dai carichi estremi e che tende a mantenere tale compenetrazione, contrastando l'azione tagliante che tende invece a diminuirla
- dalla temperatura alla quale si trova sottoposta la pavimentazione dato che essa influisce sensibilmente sulla rigidità del bitume;
- dal tempo di carico (frequenza della sollecitazione) che pure influenza la risposta del bitume.

Alcuni esperimenti di laboratorio svolti in Israele da Uzan, Livneh ed Eshed [64] su strati di conglomerato del tipo di quelli generalmente adoperati per il manto superficiale¹⁵ hanno mostrato che il modulo di reazione orizzontale all'interfaccia K cresce sensibilmente con la pressione verticale, come risulta dalle figg. II.8 e II.9.

Dalle stesse figure si evince pure che, per quanto riguarda la mano di attacco si può individuare un contenuto "ottimo" ($\approx 1 \text{ Kg/m}^2$). Ciò si spiega col fatto che col crescere della quantità di bitume si ha un migliore riempimento dei vuoti esistenti sulle facce degli strati, con conseguente aumento dell'area di contatto e quindi dell'aderenza fra le facce; oltre un certo valore cominciano, invece, a prevalere gli effetti della deformabilità interna del film di bitume e della minore compenetrazione degli inerti, con conseguente diminuzione dell'aderenza. Come si può notare, però, l'influenza dell'entità della mano di attacco e, in ogni caso, lieve¹⁶

¹³ Come accennato nel cap. I, l'aderenza fra gli strati viene anche talvolta caratterizzata tramite due parametri di resistenza a rottura per taglio all'interfaccia che compaiono nella nota relazione di Coulomb la quale lega la resistenza tangenziale τ alla tensione normale σ :

$$\tau = c_g + \sigma \tan \phi$$

In cui il primo addendo rappresenta la componente adesiva e il secondo la componente frizionale.

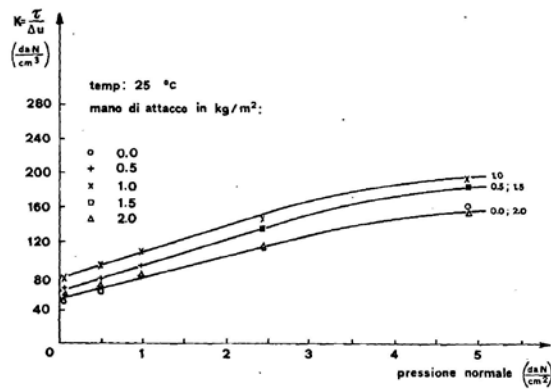
Vengono così definiti:

- L'adesione c_g che rappresenta la resistenza a taglio all'interfaccia di due strati in assenza di sollecitazioni normali;
- Il coefficiente di attrito $\tan \phi$, che rappresenta la resistenza frizionale all'interfaccia per una tensione normale unitaria.

¹⁴ Generalmente nei casi reali, gli spostamenti orizzontali relativi Δu sono molto piccoli e quindi ci si trova nel campo della viscoelasticità lineare, in cui resta definito K .

¹⁵ Le principali caratteristiche del conglomerato sottoposto a prova sono le seguenti. pezzatura max 19 mm, filler (passante al setaccio da 0,075 mm) 6%; penetrazione bitume 60 + 70; compattamento statico con circa 180 daN/cm²; densità 2237 daN/m³; contenuto bitume 6%; caratteristiche Marshall: densità 2295 daN/m³; stabilità 1118 daN; scorrimento 4,1 mm, vuoti 3,7%.

¹⁶ Le condizioni di prova dei ricercatori israeliani possono ritenersi rappresentative di quelle che si hanno in pratica quando il tempo intercorrente fra la stesa di due strati successivi della pavimentazione è modesto. Qualora, invece, lo strato inferiore resta esposto per parecchio tempo agli agenti atmosferici, ed eventualmente anche alle azioni del traffico, le risultanze relative all'entità della mano di attacco, secondo gli stessi ricercatori, non possono più considerarsi valide e richiederebbero apposite esperienze.



Tab. II.9. – Effetto della pressione verticale sul modulo di reazione orizzontale all'interfaccia di due strati superiori di di un conglomerato bituminoso, alla temperatura di 25°C, in condizioni pressoché statiche [64].

L'influenza della temperatura è molto sensibile specialmente in presenza di pressione normale modesta, come si rileva dal confronto della citata fig. II.8 con la fig. II.9: ad esempio, per pressione nulla, nel passaggio da 25 a 55°C, K risulta essersi ridotto circa alla decima parte; per pressione di 5 daN/cm² a circa la metà.

L'influenza del tempo di carico sul valore di K è un argomento ancora poco studiato anche se di notevole importanza.

In proposito è importante osservare che i valori trovati dai ricercatori israeliani e riportati nelle figure II.8 e II.9 sono stati ottenuti con esperienze in cui lo scorrimento relativo (e le conseguenti tensioni tangenziali) fra le facce veniva impresso molto lentamente (circa 2,5 mm per minuto). Quindi essi possono ritenersi rappresentativi di condizioni quasi statiche.

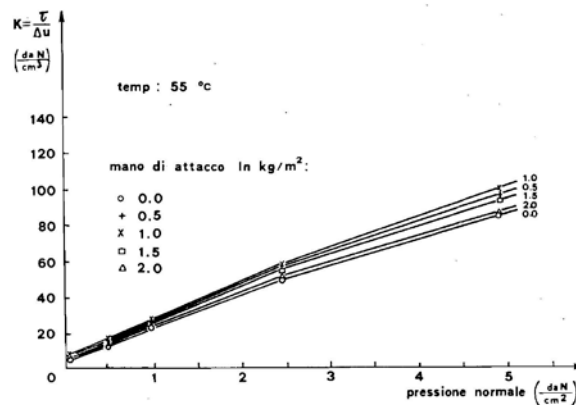


Fig. II.9. - Effetto della pressione verticale sul modulo di reazione orizzontale all'interfaccia di due strati di un dato conglomerato bituminoso, alla temperatura di 55°C, in condizioni pressoché statiche [64].

Per tener conto dei brevi tempi di carico che si verificano nella realtà (veicoli viaggianti) e che comportano una maggiore rigidezza del conglomerato, i detti ricercatori hanno proposto di applicare dei *coefficienti correttivi* ai risultati da loro ottenuti a 25°C e 55°C, rispettivamente uguali (per le pavimentazioni stradali) a circa 7 e 12, ottenendosi quindi dei valori (approssimativi), di cui alcuni sono riportati a titolo indicativo in Tab. II.3.

Tenendo presenti le ordinarie pressioni di gonfiaggio degli autoveicoli industriali ($5 \div 7$ daN/cm²) e i conseguenti possibili valori delle pressioni verticali all'interfaccia degli strati superficiali (usura collegamento), può affermarsi [64] che l'ordine di grandezza di K all'interfaccia di tali strati è di 1000 daN/cm³.¹⁷¹⁸

Tab. II.3. - Valori approssimativi del modulo di reazione orizzontale all'interfaccia tra gli strati superiori di una data pavimentazione stradale [64].

K (daN/cm ³)		
pressione verticale all'interfaccia (daN/cm ²)	T = 25°C	T = 55°C
≈ 0	400	100
≈ 5	1500	1200

Per le pavimentazioni aeroportuali è da tener presente che nelle cosiddette "zone critiche" la frequenza della sollecitazione è minore ($\approx 2 \div 5$ Hz) che nelle strade, ma che le pressioni verticali sono maggiori, per cui l'ordine di grandezza di K non dovrebbe essere molto diverso.

2.5. La relazione frequenza-velocità

Al par. 2.2 è stato rappresentato l'andamento nel tempo della sollecitazione orizzontale prodotta in un punto di uno strato della pavimentazione da una ruota transitante sulla superficie, (fig.II.2.a.).

E' facilmente comprensibile, come accennato, che la durata della sollecitazione in tale punto sarà tanto maggiore quanto più lento è il veicolo, e quanto più grande è la lunghezza nella direzione del moto dell'area d'impronta del pneumatico.¹⁹

¹⁷ Il parametro AK (spring compliance) che, come si è detto, interviene nel programma di calcolo BISAR, ha quindi (ved. nota 4) ordine di grandezza di 0,001.

¹⁸ Le limitate ricerche sperimentali effettuate nel campo dell'aderenza fra gli strati non consentono di fornire dei sicuri valori tipici per le interfacce degli strati inferiori. Tuttavia, tenendo presenti i risultati delle esperienze innanzi citate per gli strati superficiali e l'entità delle pressioni verticali che generalmente si hanno sulle interfacce inferiori, si è indotti a ritenere che l'ordine di grandezza di K sia ancora di 1000 daN/cm³ per l'interfaccia degli strati di collegamento e di base (in conglomerato bituminoso) e di circa la metà per l'interfaccia degli strati di base (in conglomerato bituminoso) e di fondazione (in materiale non legato).

¹⁹ Tale lunghezza coincide col diametro D, nel caso della consueta schematizzazione circolare dell'area d'impronta.

La sinusoide che schematizza l'andamento suddetto sarà caratterizzata quindi da un periodo T proporzionale direttamente alla lunghezza L dell'area d'impronta, ed inversamente alla velocità v del veicolo. Tenendo presente che la frequenza è l'inverso del periodo ($f = 1/T$) si ha la relazione :

$$f = K * \frac{v}{L} \quad (\text{II.2})$$

in cui, esprimendo v in m/s ed L in m si otterrà f in Hz.

Il valore della costante K, nel caso di area d'impronta circolare ($L \cong D$), può essere assunto, secondo alcuni Autori (Bonnot ed altri -cfr. [30]), pari a 0,5 .

Esperienze condotte dalla Snam Progetti [30] in laboratorio hanno condotto (sempre nel caso di $L \cong D$) a definire un valore $K = 1/\pi$.

Oltre alla relazione (II.2) va ricordata quella fornita da Klomp [37], il quale, trascurando l'effetto della dimensione dell'area d'impronta, ha trovato, in base a misure effettuate su una strada sperimentale, la seguente semplice relazione:

$$f = 0.4 * V \quad (\text{II.3})$$

In tale relazione, valida fra 5 e 50 Km/h, la velocità V va espressa in Km/h, la frequenza in Hz.²⁰

Con gli ordinari valori delle velocità e dei diametri delle aree d'impronta²¹ (18) dei veicoli stradali pesanti e degli aerei commerciali, le frequenze che più comunemente si riscontrano, sono dell'ordine di 20÷ 50 Hz per le strade²² e di 2 ÷ 5 Hz per le testate delle piste, i piazzali e le vie di circolazione degli aeroporti.²³

2.6. Le condizioni termiche

Le caratteristiche meccaniche di un conglomerato bituminoso, a causa del comportamento viscoelastico del materiale, risultano notevolmente influenzate dalle condizioni termiche. Perciò per determinare il modulo complesso, il rapporto di Poisson e la funzione di creep compliance, occorre definire la temperatura che si ha nei vari strati bitumati della pavimentazione.

Tale temperatura varia nel corso della giornata e con le stagioni, dipendendo oltre che dalla temperatura dell'aria anche dalle condizioni di irraggiamento solare, dalle precipitazioni atmosferiche, ecc. Inoltre essa varia con la profondità [3] [16] [30].

²⁰ Klomp e Niesman hanno rilevato valori di f variabili fra 0,3 V 0,45 V. Essi hanno trovato che, comunque, la frequenza non varia significativamente con la profondità [37].

²¹ Il diametro dell'impronta di un pneumatico ($D = \sqrt{C^4/\pi * (P/p)}$) con P = carico e p = pressione di gonfiaggio), è dell'ordine di 20÷25 cm per gli autocarri e di 35÷50 per gli aerei.

²²) Dall'applicazione della relazione (II.2) per D = 20÷25 cm, risulta che le frequenze 20÷50 Hz si hanno per velocità di 50÷80 Km/h, comuni per i veicoli industriali.

²³ Per D = 35 + 50 cm , le frequenze 2";' 5 Hz si hanno per velocità di 10+ 30 Km/h, quali si riscontrano sulle vie di circolazione, le testate delle piste di volo, i piazzali (cfr. anche [79]).

In fig. II.10 è rappresentata, a titolo indicativo, la variazione della temperatura oraria media nell'arco di 24 ore, nei mesi di gennaio, aprile, luglio e ottobre, ad una profondità di circa 4 cm dalla superficie di una pavimentazione flessibile, secondo rilievi eseguiti in Gran Bretagna.

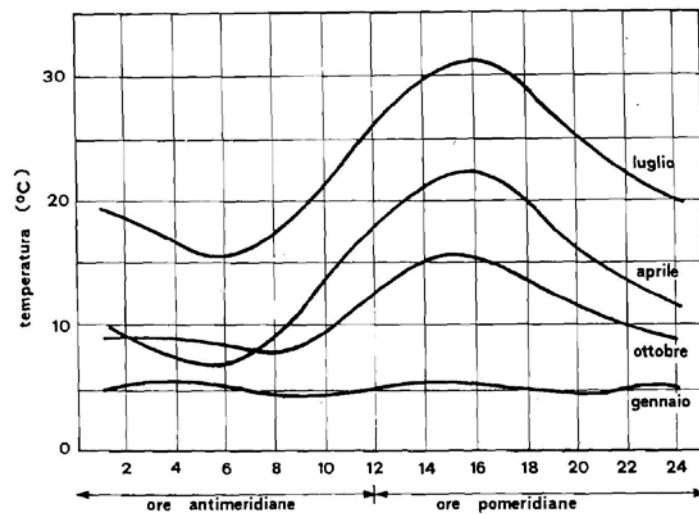


Fig. II.10. . Variazione della temperatura oraria media nell'arco di una giornata in una pavimentazione bituminosa, a circa 4 cm di profondità [16]

Ai fini del calcolo della pavimentazione è sufficiente però riferirsi, per ciascuno strato, ai valori medi delle temperature in alcuni periodi in cui viene suddiviso l'anno.

Tali temperature possono essere ricavate dall'abaco di fig. II.11 che fornisce la temperatura media mensile TMMP a diverse profondità di una pavimentazione bituminosa, in funzione della temperatura media mensile dell'aria TMMA.

Per pavimentazioni aeroportuali in tutto-asfalto, in cui lo spessore generalmente supera i 40 cm, può anche adoperarsi la seguente semplice relazione (approssimativa in quanto indipendente dalla profondità) [80]:

$$TMMP = 1,05 TMMA + 5$$

in cui le temperature vanno espresse in gradi Fahrenheit; o quella da essa derivata quando si esprimono le temperature in gradi centigradi :

$$TMMP (°C) = 1,05 TMMA (°C) + 3,67$$

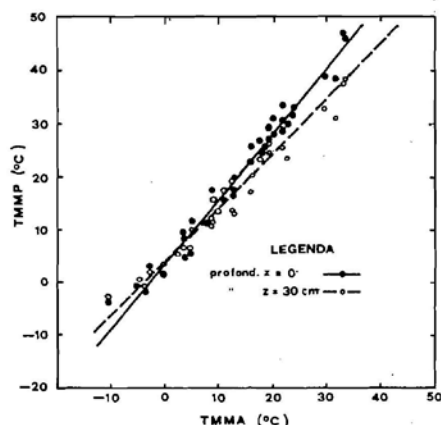


Fig. II.11. Temperatura media mensile di una pavimentazione bituminosa (TMMP) in superficie ed alla profondità di 30 cm in funzione della temperatura media mensile dell'aria (TMMA), desunta da esperienze condotte in Arizona, Maryland, New York [79].

Generalmente l'anno viene suddiviso almeno in due o tre periodi.²⁴

Il Centre de Recherches Routières belga propone la ripartizione indicata in Tab. II.4, in cui sono anche segnate le temperature di calcolo da adottare (medie negli strati bituminosi considerati come un unico corpo), naturalmente valide per il Belgio, ma comunque utili quali elementi di riferimento.²⁵

Spessore dello strato bituminoso	5 ÷ 8 cm			8 ÷ 23 cm		
	-15 ÷ +5°C	5 ÷ 20°C	20 ÷ 50°C	-15 ÷ +15°C	5 ÷ 20°C	20 ÷ 50°C
Classi di temperatura	-15 ÷ +5°C	5 ÷ 20°C	20 ÷ 50°C	-15 ÷ +15°C	5 ÷ 20°C	20 ÷ 50°C
Percentuale annuale di tempo afferente a ciascuna classe	30	50	20	28	46	26
Temperatura rappresentativa (°C)	1,4	11,8	26,7	1,9	12,0	25,1

Tab. II.4. Suddivisione dell'anno in periodi e relativi temperature di calcolo secondo la metodologia belga [76].

Un criterio adottato in Italia (per la progettazione della terza corsia dell'autostrada Milano - Bologna [30]) è stato quello di suddividere l'anno in due periodi, uno "caldo" in cui la temperatura dell'aria raggiungeva o superava i 30°C (12 ore diurne dei mesi di luglio e agosto per un totale quindi di 30 giorni) ed uno "normale" in cui la temperatura era inferiore (rimanente tempo, pari a 335 giorni). Per il primo periodo è stata considerata una temperatura di calcolo delle pavimentazioni

²⁴ Nella metodologia di progettazione delle pavimentazioni flessibili dell'Asphalt Institute l'anno viene suddiviso in dodici periodi corrispondenti ai dodici mesi.

²⁵ Il CRR indica quale massima temperatura raggiungibile: 50°C sulla superficie della pavimentazione e 45°C alla profondità di 5 cm. Le minime temperature registrate raramente scendono al di sotto di -10°C.

di 40°C per gli strati di usura ($s = 5$ cm) e collegamento ($s = 6$ cm) e di 20°C per lo strato di base ($s=20$ cm); per il secondo una temperatura di 20°C per tutti gli strati.²⁶

²⁶ Rilevamenti effettuati sull'Autostrada A1, nei pressi di Firenze, hanno evidenziato [30] a 5 cm di profondità una temperatura massima di 42 °C, mentre negli strati profondi la temperatura non ha manifestato sensibili variazioni permanendo intorno ai 20÷25 °C.