



**CALCOLO RAZIONALE DELLE  
SOVRASTRUTTURE STRADALI  
COMPOSITE POLIFUNZIONALI E  
CONFRONTO CON I METODI APPROSSIMATI**

**Ciro Caliendo**

Dipartimento di Ingegneria Civile - Università degli Studi di Salerno  
Via Ponte Don Melillo-84084 Fisciano (Salerno)  
Tel: +39 089.964140 - Fax: +39.089.964045  
E-mail: ccaliendo@unisa.it

# **CALCOLO RAZIONALE DELLE SOVRASTRUTTURE COMPOSITE POLIFUNZIONALI E CONFRONTO CON I METODI APPROSSIMATI**

**CIRO CALIENDO** - Dipartimento di Ingegneria Civile – Università degli Studi di Salerno

## **SOMMARIO**

Si è valutata l'entità dello stato tensionale e quindi il comportamento strutturale delle sovrastrutture composite polifunzionali tenendo conto della non linearità del supporto e si sono messi a confronto i risultati ottenuti per svariate condizioni con quelli derivanti dai calcoli approssimati sia razionali che empirici. A tal fine è stato messo a punto un modello di calcolo agli elementi finiti nel quale la perdita di supporto fra la piastra e il suo piano di appoggio è stata affrontata individuando, mediante processi iterativi, aree di distacco ed assegnando alle molle tese in esse contenute rigidezze nulle. Per conferire una validità generale allo studio si sono considerate diverse posizioni dei carichi, differenti condizioni climatiche e vari valori della rigidezza della piastra e di portanza del supporto. Dallo studio effettuato è emerso che applicando contemporaneamente i carichi da traffico e le variazioni termiche e tenendo conto della perdita del supporto, si ha nella lastra, a parità di altri fattori che entrano in gioco nel dimensionamento, uno stato tensionale maggiore di quello che si ottiene col calcolo razionale approssimato che, come è noto, calcola separatamente le tensioni dovute ai carichi da quelle causate dalle variazioni termiche e poi applica il principio di sovrapposizione degli effetti impropriamente in quanto il terreno di supporto ha un comportamento lineare non resistente a trazione. Le differenze in termini di durate strutturali a fatica delle sovrastrutture studiate sono risultate molto più forti. Ciò è da attribuire al fatto che la relazione, contenuta nella legge di fatica, tra la tensione cui è sollecitata la piastra ed il numero di assi che la portano a rottura è di tipo non lineare. Le durate strutturali valutate per tutte le sovrastrutture rigide ad armatura continua previste nel "Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali", sensibilmente minori di quelle ottenute utilizzando le tensioni del calcolo razionale approssimato, sono risultate vicine a quelle che si ricavano col metodo empirico-teorico "AASHTO Guide".

## **ABSTRACT**

The values of the stresses and then the structural performances of Concrete Composite Pavements, taking into account the non-linear behaviour of the support, have been evaluated in this paper. A comparison between the results obtained in different conditions with those deriving from the approximate calculations, considering both the rational and the empirical approach, has been carried out too. For the purpose a finite-element model has been developed. The loss of support between the Continuously Reinforced Concrete Slab and its foundation plane has been simulated, in the finite element analysis, individuating where the springs are in tension and assigning them a nought stiffness. Different traffic load positions, various temperature loads and values of stiffness both of the slab and the support have been used in order to give a general validity to the study. The paper shows that the stresses obtained by means of the combined action of temperature and traffic loads are higher than those of the approximate rational calculation. The latter, as it is known, considers the separated action of the temperature and the traffic loads and then applies incorrectly the Effects

Superposition Principle because the support soil has a linear behaviour that is not resistant to tension. The differences obtained about the fatigue life of the pavements studied are remarkably higher than those relative to the values of the stresses. This is due to the fact that the relationship, contained in the fatigue law, between the allowable number of load repetitions and the tensile bending stress is non-linear. The structural performances evaluated for all the Continuously Reinforced Concrete Pavement of "Italian catalogue", which have been found considerably lower than those obtained by means of the approximate rational calculation, are near to the solutions of the empirical method "AASHTO Guide".

## 1. INTRODUZIONE

La tendenza, ormai consolidata, verso l'impiego delle sovrastrutture composite polifunzionali in campo stradale nasce dalla consapevolezza dei vantaggi da esse offerte rispetto alle tradizionali sovrastrutture di tipo flessibile o semirigido. Tali vantaggi consistono, oltre che in una migliore risposta strutturale alla crescente aggressività del traffico pesante, nella protezione dell'ambiente per l'attenuazione del rumore prodotto dai veicoli e nel miglioramento della sicurezza in caso di pioggia.

La resistenza strutturale a fatica di tali sovrastrutture è affidata alla presenza di uno strato in calcestruzzo ad armatura continua disposto al di sotto dello strato superficiale drenante-fonoassorbente. Per il dimensionamento di tale lastra vengono generalmente utilizzati metodi di calcolo approssimati di natura razionale o empirica che si basano rispettivamente su presupposti teorici o su risultanze sperimentali. I primi consentono di prevedere le prestazioni della sovrastruttura, in relazione alla sua principale causa di dissesto, mediante la valutazione dello stato tenso-deformativo provocato dal passaggio dei carichi e dalle variazioni termiche; mentre quelli empirici permettono di valutare il numero di passaggi di assi standard che la sovrastruttura può sopportare prima di raggiungere un livello di funzionalità inaccettabile utilizzando i risultati derivanti dall'osservazione del comportamento di pavimentazioni esistenti o appositamente costruite.

I limiti del calcolo razionale approssimato, che come è noto prende le mosse dalla risoluzione semplificata delle equazioni differenziali di equilibrio della piastra su suolo elastico, consistono soprattutto nel calcolare separatamente le tensioni dovute ai carichi da quelle causate dalle variazioni termiche e nell'applicare quindi il principio di sovrapposizione degli effetti per materiali che, invece, presentano un comportamento lineare non resistente a trazione quale è il terreno di supporto. I metodi empirici presentano invece dei limiti quando si considerano casi diversi da quelli sperimentati. La loro minore generalità di applicazione non li fa però ritenere completamente superati, soprattutto l'"AASHTO Guide" che si avvale anche di considerazioni teoriche.

Obiettivo del presente lavoro è di valutare l'entità dello stato tensionale e quindi la durata strutturale delle pavimentazioni composite polifunzionali tenendo conto della non linearità del supporto e di mettere a confronto i risultati ottenuti con quelli derivanti dai calcoli approssimati sia razionali che empirici.

A tal fine è stato messo a punto un modello di calcolo agli elementi finiti e, per conferire una validità generale allo studio, si sono considerate diverse posizioni dei carichi, differenti condizioni climatiche e vari valori di rigidità della lastra e portanza del terreno di sottofondo. Il confronto tra le durate strutturali trovate, con quelle che si ricavano utilizzando il calcolo razionale approssimato e il citato metodo empirico

teorico "AASHTO Guide", ha interessato tutte le sovrastrutture rigide ad armatura continua previste nel "Catalogo delle pavimentazioni stradali".

## 2. IMPOSTAZIONE DELLO STUDIO

Per raggiungere l'obiettivo si è innanzitutto individuata, nella schematizzazione agli elementi finiti, la mesh ottimale confrontando, nella ipotesi di lastra perfettamente integra soggetta ai carichi da traffico, le tensioni ottenute con varie maglie con quelle derivanti dalla schematizzazione della sovrastruttura come un multistrato elastico risolto col programma di calcolo Bisar.

Nel modello di calcolo messo a punto, lo strato superficiale drenante-fonoassorbente e la lastra in calcestruzzo sono stati schematizzati mediante elementi tridimensionali (solid), mentre il supporto della lastra è stato rappresentato con molle (springs) di opportuna rigidità.

Si è pensato di simulare la perdita di supporto fra la lastra e il suo piano di appoggio individuando aree di distacco ed assegnando, per successivi processi iterativi, alle molle tese in esse contenute rigidità nulle. Per velocizzare il procedimento si è messo a punto un piccolo programma che ricevendo in ingresso il file di output del FEM individua i nodi in cui le molle sono tese.

Per la valutazione dei valori da assegnare alla rigidità del supporto all'interfaccia con la lastra in calcestruzzo, espressa attraverso i valori del modulo di reazione  $K$ , si è considerato il modello del tri-strato elastico costituito dagli strati sottostanti la lastra (misto cementato e misto granulare) e dal terreno di sottofondo. In tale modello si è valutato il modulo di reazione  $K$  come rapporto tra la pressione applicata in superficie ( $0.7 \text{ kg/cm}^2$  distribuita su un'area circolare del diametro di 76 cm) e la corrispondente deflessione elastica. I calcoli sono stati effettuati, a parità dello spessore dello strato in misto cementato e del misto granulare, per tre diversi valori della portanza del terreno di sottofondo - espressa da valori del modulo resiliente  $M_r$  comunemente riscontrabili in pratica: 300, 900 e  $1500 \text{ daN/cm}^2$  (cfr. "Catalogo delle pavimentazioni") - trovando valori del modulo di reazione  $K$  all'interfaccia della lastra di 6, 15 e  $21 \text{ Kg/cm}^3$ .

Per la collaborazione fra le lastre in corrispondenza delle fessure, causate dal ritiro e dalla variazioni termiche dopo la messa in opera del calcestruzzo, si è ritenuto di utilizzare elementi bidimensionali dotati di rigidità flessionale e tagliante (beams) i quali simulano la presenza dell'armatura continua disposta nel piano medio della lastra. Per tener conto che nella realtà vi è collaborazione tra le lastre, oltre che per effetto dell'armatura, anche per l'ingranamento fra le facce delle fessure, si è utilizzato il criterio (generalmente adottato in pratica) di assegnare ai detti elementi bidimensionali una rigidità tale che il rapporto tra la deflessione elastica al bordo della lastra scarica e di quella della lastra affiancata supposta caricata fosse di 0.97.

Si sono studiati vari casi corrispondenti a due diverse posizioni dei carichi (carico compreso tra due fessure da ritiro consecutive e carico agente in corrispondenza delle fessure stesse), in quattro differenti condizioni climatiche, per tre diversi spessori della lastra in calcestruzzo ( $h = 18, 22$  e  $27 \text{ cm}$ ).

Lo studio è stato poi esteso a tutte le sovrastrutture in calcestruzzo ad armatura continua previste nel "Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali", caratterizzate da spettri di traffico, affidabilità e grado di efficienza differenti.

I calcoli sono stati svolti considerando nel modello agli elementi finiti, a parità degli altri fattori che entrano in gioco nel dimensionamento, sia il caso di tenere separati il traffico e le variazioni termiche e poi sommare gli effetti sia il caso di tenere conto

contemporaneamente di entrambe le azioni dette. Ciò al fine di effettuare i relativi confronti in termini di entità delle tensioni e soprattutto in durata a fatica.

Le durate strutturali trovate sono state poi messe a confronto anche con quelle che si ricavano utilizzando il metodo empirico "AASHTO Guide".

Si sono infine costruiti degli appositi abachi in cui vengono riportati i risultati ottenuti col calcolo razionale in cui si è tenuto conto della non linearità del supporto e quelli derivanti dal dimensionamento approssimato sia razionale che empirico.

### 3. MODELLO DI CALCOLO

Il modello presenta dimensioni in pianta 12.80\* 12.80 m ed è vincolato lungo i quattro lati con dei carrelli, disposti orizzontalmente nel piano medio della piastra. Tali dimensioni sono state individuate avendo verificato che sui lati lungo i quali sono stati ubicati i carrelli lo stato tensionale che vi si instaura è trascurabile.

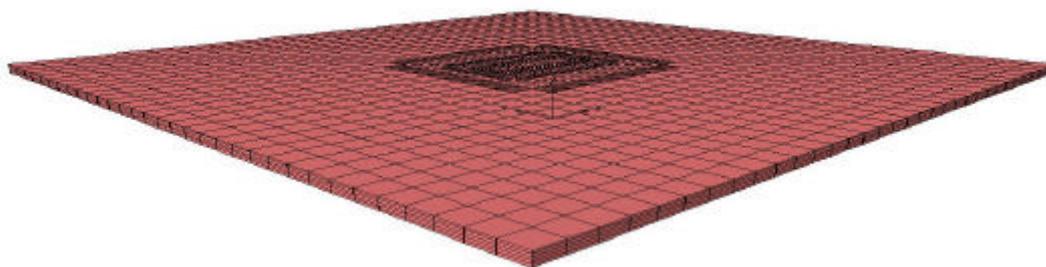
In esso si sono fatte le ipotesi, generalmente accettate, che la distanza fra le fessure trasversali, causate dal ritiro e dalle variazioni termiche dopo la stesa del calcestruzzo, avesse un valore medio di 1.6 m e che l'apertura di queste lesioni fosse dell'ordine 1 mm. E' stato previsto nel modello anche la presenza di due giunti longitudinali, che vengono generalmente realizzati per evitare che durante l'indurimento del calcestruzzo si abbiano fessure in posizioni non desiderate. La collaborazione tra i vari elementi piastra, ivi inclusi quella ai giunti, è rappresentata da elementi bidimensionali di opportuna rigidità cui già si è accennato innanzi.

Gli strati costituenti lo strato drenante fonoassorbente e la lastra in calcestruzzo sono stati schematizzati con elementi tridimensionali a 8 nodi, di dimensioni in pianta 2.5\*2.5 cm nell'area di carico (superficie di 900 cm<sup>2</sup> corrispondente all'area di impronta delle ruote gemellate dell'asse standard da 120 kN ) per diventare di dimensioni sempre maggiori allontanandosi da tale area: 5\*5, 10\*10 cm, 20\*20 cm, 30\*30 cm fino ad assumere dimensioni 40\*40 in corrispondenza dei bordi del modello. Il passaggio da elementi più piccoli a quelli di dimensioni maggiori è stato ottenuto inserendo nelle aree di transizione degli elementi prismatici a base triangolare che assicurano la continuità dei nodi da una maglia all'altra.

Le altezze di questi elementi sono stati assunti uguali a quello dello spessore dello strato di usura drenante fonoassorbente (assunto uguale a 4 cm), mentre per quanto riguarda la lastra in calcestruzzo esse sono state assunte uguali a 1/4 dello spessore della lastra.

Per il supporto della lastra si sono utilizzate molle ubicate in ciascun nodo dell'intradosso della lastra ed agenti soltanto in direzione verticale.

Il modello messo a punto vede l'impiego di 15060 elementi solid, 3128 elementi frames, e 19122 nodi. In figura 1 è riportato una vista del modello adottato.



**Figura 1 - Vista del modello agli elementi finiti.**

#### 4. CONDIZIONI DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO

##### Condizioni climatiche

Le condizioni climatiche di riferimento assunte nel calcolo sono quelle riportate in tabella 1, tratte dal "Catalogo delle pavimentazioni".

	Temperatura media stagionale dell'aria (°C)	Media stagionale escursione termica giornaliera (°C)	Radiazione solare media stagionale (kcal / m <sup>2</sup> ,gg)	Velocità media del vento (km/h)
Inverno	5.03	7.66	1886	12.46
Primavera	13.39	10.66	5425	
Estate	23.93	12.38	6337	
Autunno	15.03	9.39	3380	

**Tabella 1- Condizioni climatiche di riferimento**

Per la valutazione dei valori della temperatura e dei corrispondenti gradienti termici che si instaurano nella piastra in calcestruzzo si è utilizzato il modello di Barber che, come noto, tiene conto del fatto che la trasmissione del calore in una sovrastruttura avviene per convezione e irraggiamento sulla superficie e per conduzione all'interno degli strati che la costituiscono. Tale modello è stato qui adattato in maniera approssimata per tener conto che il conglomerato bituminoso drenante costituente lo strato superficiale presenta caratteristiche termiche differenti da quello del calcestruzzo della sottostante lastra. In particolare si è utilizzata la formula di Barber, con le caratteristiche termiche del conglomerato drenante, al fine di valutare la temperatura all'interfaccia tra tale strato e la lastra e poi a partire da tale temperatura si è valutata, tenendo conto delle caratteristiche termiche del calcestruzzo, quella che si ha alla base della lastra considerando che la trasmissione del calore si manifesta lungo tale strato per sola conduzione.

I valori dei massimi gradienti termici trovati, per ciascuno dei tre spessori della lastra considerati, sono riportati in tabella 2.

	Spessori della lastra in calcestruzzo ad armatura continua		
	H=18 cm	H=22 cm	H= 27cm
	Gradienti termici (°C / cm)		
Inverno	0.16	0.14	0.12
Autunno	0.31	0.27	0.22
Primavera	0.41	0.34	0.28
Estate	0.49	0.42	0.35

**Tabella 2 - Gradienti termici trovati nei quattro periodi climatici considerati per i diversi spessori della lastra.**

##### Caratterizzazione dei materiali

I valori assoluti del modulo complesso  $|E^*|$  e dei rapporti complessi di Poisson  $|v^*|$  del conglomerato bituminoso drenante fonoassorbente, che sono stati assunti alla frequenza di carico di 10 Hz e alle temperature che si riscontrano nello strato superficiale in corrispondenza dei massimi gradienti termici trovati per la lastra in calcestruzzo, sono:  $|E^*| = 5000, 8250, 12000$  e  $40.000$  daN/cm<sup>2</sup> rispettivamente alle temperature dello strato di 46, 32, 27.5 e 12.5 °C, cui corrispondono i seguenti coefficienti rapporti di Poisson  $|v^*|$ : 0.48, 0.44, 0.43 e 0.35. Per il conglomerato cementizio si è considerato un modulo  $E = 400.000$  daN/cm<sup>2</sup> e una resistenza media di rottura a trazione per flessione di 55daN/cm<sup>2</sup>, nonché un coefficiente di Poisson  $v$  di 0.15.

### Analisi dei carichi da traffico

Per quanto concerne il carico, i calcoli sono stati effettuati con riferimento ad un tipico veicolo pesante, tra i più frequenti in commercio, costituito da un asse anteriore avente massa di 60 KN e da un asse posteriore a ruote gemellate con massa di 120 KN. La pressione di gonfiaggio delle ruote gemellate dell'asse posteriore è stata assunta uguale a 7 daN/cm<sup>2</sup>.

### Legge di fatica

Per la stima della durata strutturale delle sovrastrutture studiate si è stimato, per ciascun dei quattro periodi climatici considerati, il numero N<sub>i</sub> di ripetizioni di carico sostenibili utilizzando la legge a fatica proposta da Darter:

$$\text{Log } N = 16.61 - 17.61 * (\sigma / \sigma_{\text{fm}})$$

dove  $\sigma$  = massima tensione di lavoro calcolata e  $\sigma_{\text{fm}}$  = resistenza media a trazione per flessione del calcestruzzo.

Si è quindi applicata la legge dell'accumulo lineare del danno da fatica del Miner individuando il corrispondente numero complessivo di ripetizioni di carico ammissibili.

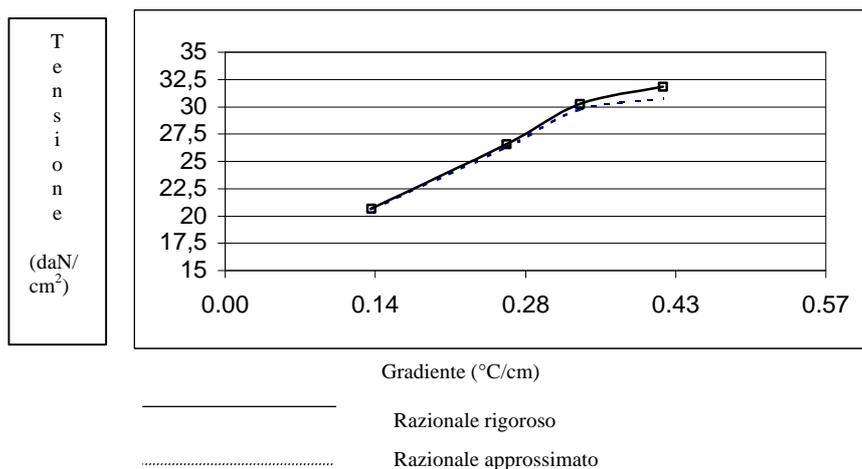
## 5. ANALISI DEI RISULTATI E CONFRONTI

In tabella 3 sono riportate le massime tensioni di trazioni riscontrate all'intradosso della lastra in calcestruzzo - ottenute risolvendo il modello agli elementi finiti considerando sia l'approccio razionale approssimato che quello rigoroso – per i quattro periodi climatici considerati, per i tre valori del modulo di reazione del supporto K e per i tre spessori della lastra in calcestruzzo ad armatura continua prevista nella sovrastruttura composita polifunzionale.

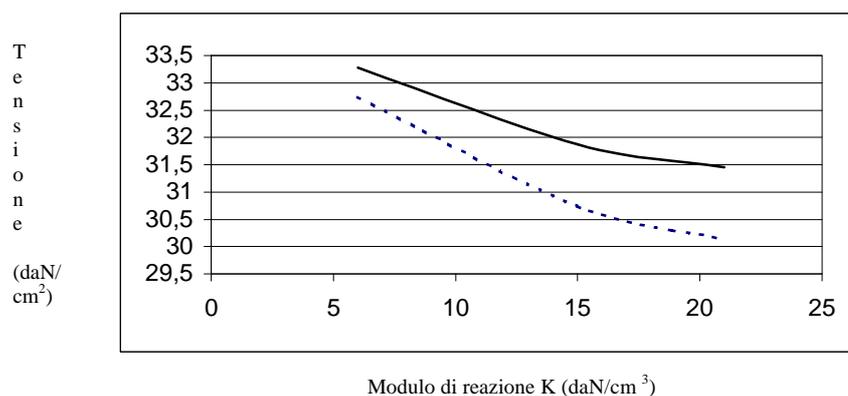
		H = 18 cm				H=22 cm				H=27 cm			
		$\sigma_{\text{traff.}}$ (a) daN/ cm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{term}}$ (b) daN/ cm <sup>2</sup>	Razion. appross. a + b daN/cm <sup>2</sup>	Razion. rigoroso daN/cm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{traff.}}$ (a) daN/ cm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{term}}$ (b) daN/ cm <sup>2</sup>	Razionale appross. a + b daN/ cm <sup>2</sup>	Razion. rigoroso daN/cm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{traff}}$ (a) daN/ cm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{term}}$ (b) daN/ cm <sup>2</sup>	Raz. app. a + b daN/ cm <sup>2</sup>	Raz. Rigor. daN/ cm <sup>2</sup>
K=6	I	19.59	6.45	26.04	26.13	15.58	6.26	21.84	21.87	11.28	5.83	17.11	17.12
	A	19.63	11.35	30.98	31.26	15.67	11.45	27.12	27.34	11.3	11.45	22.75	23.01
	P	19.65	15.45	35.10	35.46	15.72	14.76	30.38	30.96	11.3	13.92	25.22	25.75
	E	19.68	16.97	36.65	37.61	15.75	16.59	32.34	33.28	11.35	17.75	29.10	30.12
K=15	I	17.37	6.7	24.07	24.23	13.91	6.7	20.61	20.66	9.89	6.59	16.48	16.5
	A	17.38	11.55	28.93	29.28	13.97	12.3	26.27	26.55	9.93	11.94	21.87	22.16
	P	17.45	15.74	33.19	33.79	14.01	15.74	29.75	30.25	9.96	14.93	24.89	25.51
	E	17.48	17.51	34.99	36.21	14.02	16.72	30.74	31.87	9.97	17.88	27.85	29.01
K=21	I	16.43	6.18	22.61	22.63	13.32	6.73	20.05	20.08	9.43	6.75	16.18	16.23
	A	16.45	11.67	28.12	28.54	13.34	12.3	25.64	25.98	9.49	12.22	21.71	22.07
	P	16.48	15.68	32.16	32.87	13.37	15.77	29.14	29.71	9.49	15.07	24.56	25.28
	E	16.51	17.55	34.06	35.52	13.4	16.73	30.13	31.45	9.52	17.89	27.41	28.88

**Tabella 3 - Massime tensioni di trazione ( causate all'intradosso della lastra dal carico da traffico e dai gradienti termici) che si ricavano col calcolo razionale rigoroso ed approssimato.**

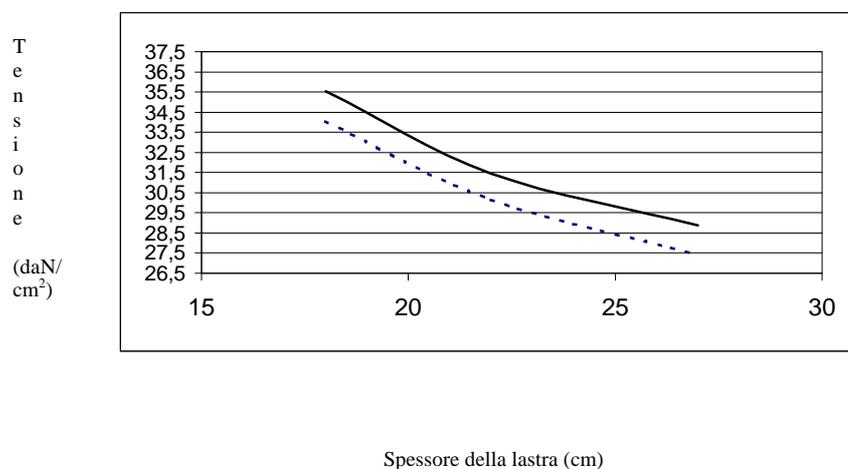
Nelle figure 2, 3 e 4 sono riportati a titolo esemplificativo gli andamenti delle tensioni massime di trazione all'intradosso della piastra (cfr.tab. 3) valutate col calcolo razionale sia rigoroso che approssimato rispettivamente in funzione del gradiente termico, del modulo di reazione K del supporto e dello spessore della lastra.



**Figure 2 - Tensioni massime di trazione (daN/cm<sup>2</sup>) all'intradosso della lastra, per un dato spessore della lastra (22 cm) e modulo di reazione K (15 daN/cm<sup>3</sup>) in funzione del gradiente termico.**



**Figura 3 - Tensione massime di trazione, per un dato gradiente (0.42°C/cm) e spessore della lastra (22 cm) in funzione del modulo di reazione del supporto K (15 daN/cm<sup>3</sup>).**



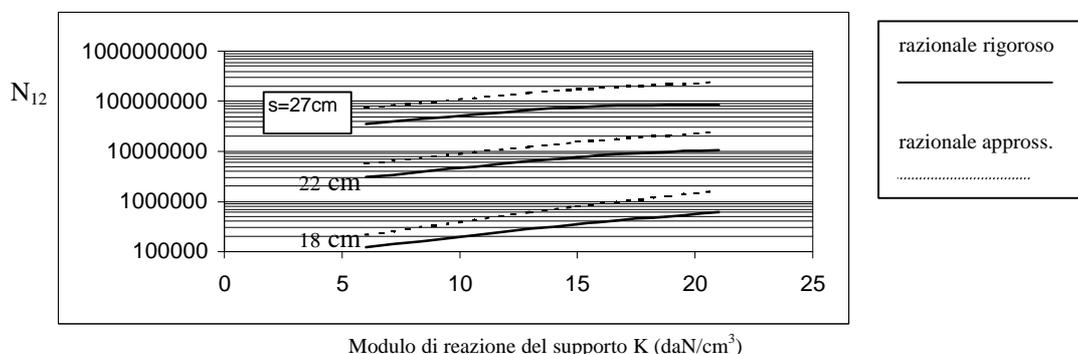
**Figura 4 - Tensioni massime di trazione all'intradosso della lastra (daN/cm<sup>2</sup>), per un assegnato periodo climatico (estate) e modulo di reazione K (21 daN/cm<sup>3</sup>), in funzione dello spessore della lastra.**

Da queste figure si evince che col calcolo razionale rigoroso si hanno tensioni maggiori di quelle ottenibili col calcolo approssimato all'aumentare del gradiente termico, del modulo di reazione K e dello spessore della lastra. Ciò si può spiegare col fatto che al crescere del gradiente, a parità di modulo di reazione K e spessore della piastra, aumenta il contributo fornito dalle variazioni termiche (responsabili del sollevamento della piastra) rispetto a quelle prodotte dal traffico e quindi diventa più forte la differenza tra il calcolo razionale rigoroso e quello approssimato. Analogamente all'aumentare del modulo di reazione K e/o dello spessore della piastra diminuisce l'entità delle tensioni da traffico, mentre restano pressochè costanti quelle dovute alle variazioni termiche e quindi aumenta il contributo di queste ultime alla tensione totale. Gli incrementi sull'entità delle tensioni che si ottengono col calcolo razionale rigoroso sono comunque abbastanza contenuti essendo compresi tra 0 e 5.5% circa. In tabella 4 è invece riportato il numero complessivo di ripetizioni di carico ammissibili a fatica, sinteticamente espresso col numero di passaggi di assi da 120 kN, che si stima utilizzando le massime tensioni di trazione causate nella piastra dal carico da traffico e dai gradienti termici.

Spessore della piastra (cm)	Portanza del supporto K daN/cm <sup>3</sup>	Razionale approssimato N* <sub>12</sub>	Razionale rigoroso N <sub>12</sub>	N <sub>12</sub> /N* <sub>12</sub>
18 cm	6	212.472	121.801	0.57
	15	799.262	353.637	0.44
	21	1.609.113	601.719	0.37
22	6	5.726.302	3.016.956	0.53
	15	15.415.026	7.696.945	0.49
	21	24.177.090	10.715.213	0.44
27 cm	6	73.577.914	35.396.958	0.48
	15	176.308.031	77.310.082	0.44
	21	239.835.429	85.721.029	0.35

**Tabella 4 - Numero complessivo di ripetizioni di carico ammissibili a fatica, sinteticamente espresso col numero di passaggi di assi da 120 kN, ricavato utilizzando le massime tensioni di trazione causate dal carico da traffico e dai gradienti termici considerati**

Da questa tabella si evince che, contrariamente a quanto visto sopra, utilizzando le tensioni derivanti dal calcolo razionale rigoroso si stimano numeri di ripetizioni di carico ammissibili di gran lunga inferiori a quelli ricavabili con i valori delle tensioni del calcolo razionale approssimato: in pratica si stimano durate strutturali comprese approssimativamente tra circa 1/2 ed 1/3 di quelle corrispondenti al metodo approssimato. Quanto trovato è da attribuire al fatto che la legge di fatica, tra la tensione cui è sollecitata la piastra ed il numero di assi che la portano a rottura, è di tipo esponenziale. La figura 5 fornisce una visione delle considerazioni esposte.



**Figura 5 - Numero di ripetizioni di carico sostenibili (N<sub>12</sub>) in funzione del modulo di reazione K del supporto per diversi spessori della lastra**

## 6. CONFRONTI TRA LE DURATE STRUTTURALI

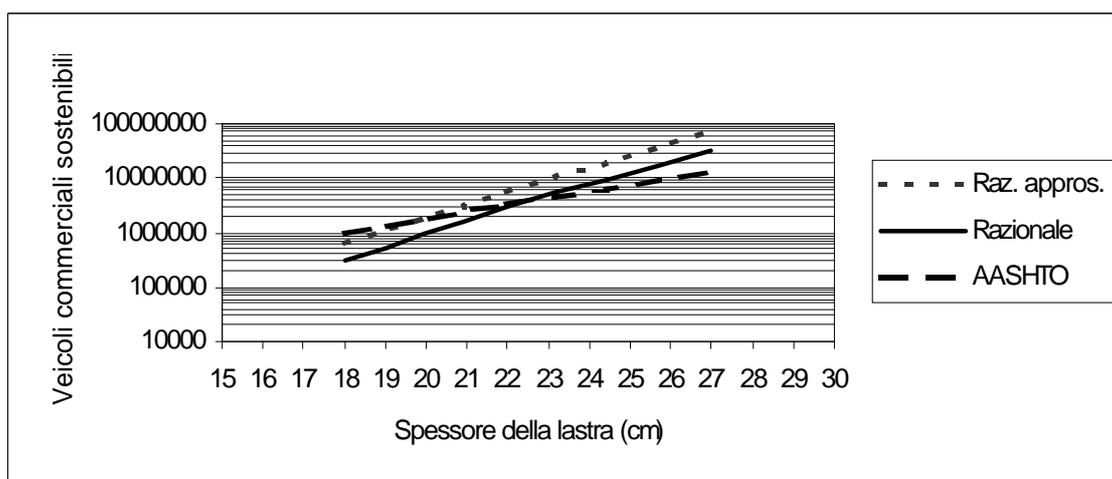
E' parso qui utile effettuare un confronto in termini di durate strutturali tra le soluzioni che si ottengono per le diverse tipologie di strade, caratterizzate da entità e distribuzione del traffico, affidabilità e grado di efficienza differenti.

Pertanto nelle successive figure 6 -17 sono riportati i risultati che si ottengono con la verifica a fatica sinteticamente espressi in termini di veicoli commerciali sostenibili con riferimento alle sovrastrutture rigide ad armatura continua previste nel già citato "Catalogo delle pavimentazioni". In tali diagrammi sono altresì riportati per un utile confronto, oltre ai risultati del calcolo razionale sia rigoroso che approssimato, anche quelli derivanti dall'utilizzazione del metodo empirico "AASHTO Guide". In ognuno di essi sono contenuti, per ciascuna tipologia di strada e portanza del supporto della piastra espressa da valori di modulo di reazione K di 15 e 21 daN/cm<sup>3</sup>, il numero dei veicoli commerciali sopportabili in funzione dello spessore della lastra in calcestruzzo.

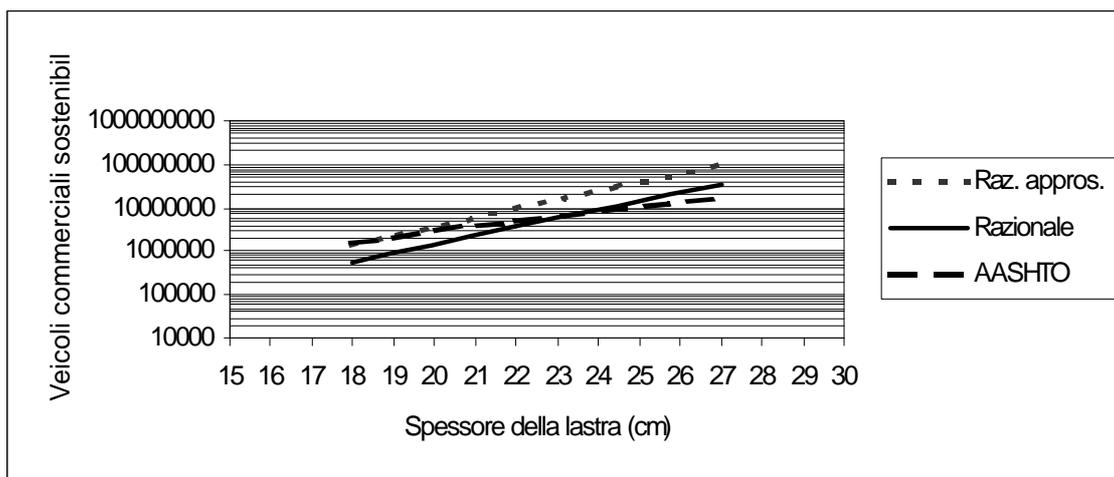
Il numero di veicoli commerciali è stato calcolato riferendosi agli spettri di traffico previsti nel "Catalogo" per ciascuna tipologia di strada considerata ed utilizzando i coefficienti di equivalenza dei carichi dell' "AASHTO"; quest'ultimi funzione dello spessore della lastra e del PSI.

In tali condizioni si ottengono col calcolo razionale dimensionamenti con affidabilità del 50%. Per tener conto che l'affidabilità delle sovrastrutture di catalogo presenta valori diversi a secondo del tipo di strada, i risultati del calcolo razionale (sia rigoroso che approssimato) sono stati corretti con dei coefficienti ottenuti utilizzando la formula dell'AASHTO in cui si è assegnato una affidabilità del 50% e poi quella corrispondente alla sovrastruttura di catalogo.

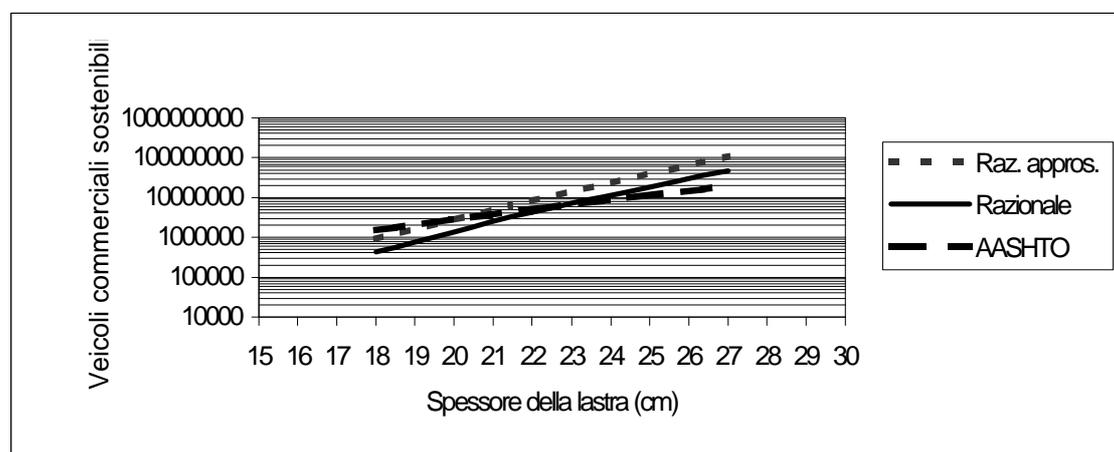
I suddetti diagrammi, di cui di seguito si riportano quelli relativi alle autostrade ed in appendice quelli delle altre strade, mostrano che il numero dei veicoli commerciali sostenibili ricavati utilizzando i valori delle tensioni del calcolo razionale rigoroso sono, a differenza di quelli ricavabili col calcolo razionale approssimato, vicini a quelli ottenibili con l' "AASHTO Guide".



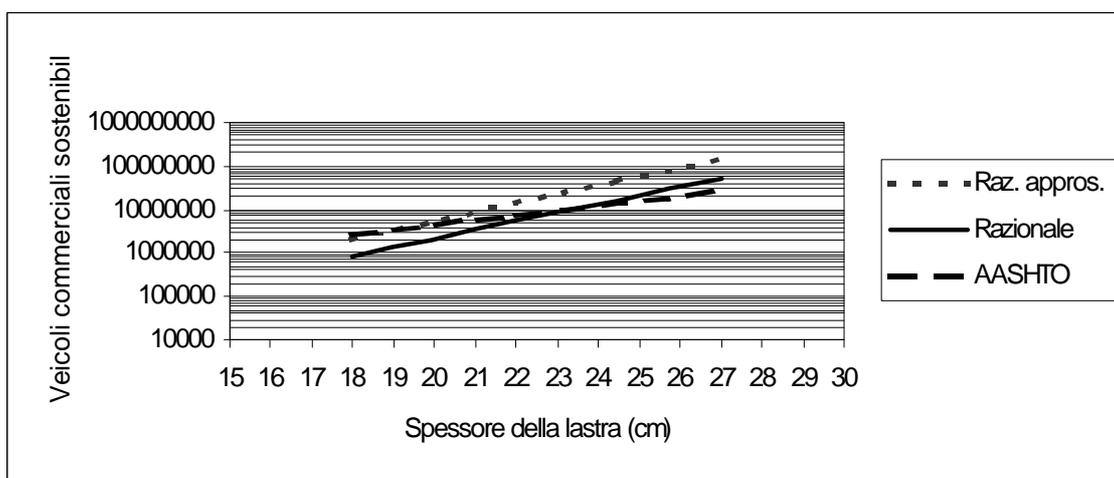
**Figura 6 - Veicoli commerciali sostenibili per le autostrade extraurbane (affidabilità = 90%, PSI =3, modulo di reazione del supporto K=15 daN/cm<sup>3</sup>)**



**Figura 7 - Veicoli commerciali sostenibili per le autostrade extraurbane (affidabilità = 90%, PSI =3, modulo di reazione del supporto  $K=21 \text{ daN/cm}^3$  ).**



**Figura 8 - Veicoli commerciali sostenibili per le autostrade urbane (affidabilità = 95%, PSI = 3, modulo di reazione del supporto  $K=15 \text{ daN/cm}^3$  ).**



**Figura 9 - Veicoli commerciali sostenibili per le autostrade urbane (affidabilità = 95%, PSI =3, modulo di reazione del supporto  $K=21 \text{ daN/cm}^3$  ).**

## 7. CONCLUSIONI

Le principali conclusioni che possono trarsi dal presente lavoro che ha riguardato il calcolo razionale delle sovrastrutture composite polifunzionali e il confronto con i metodi approssimati sia razionali che empirici sono qui di seguito riportate.

Col calcolo razionale, eseguito applicando contemporaneamente i carichi da traffico e le variazioni termiche e tenendo conto della perdita del supporto, si ha nella lastra in calcestruzzo uno stato tensionale maggiore di quello che si ottiene col calcolo razionale approssimato che, come è noto, valuta separatamente le tensioni dovute ai carichi da quelle dovute alle variazioni termiche ed applica impropriamente il principio di sovrapposizione degli effetti per materiali che hanno un comportamento lineare non resistente a trazione, quale è il terreno di supporto. Le differenze trovate aumentano, a parità degli altri parametri che entrano in gioco, al crescere del gradiente termico, del modulo di reazione  $K$  del supporto e/o dello spessore della piastra. Gli incrementi trovati in termini di entità dei valori delle tensioni sono risultati comunque abbastanza contenuti, in pratica compresi tra circa 0 e il 5.5%.

Tali differenze, modeste per quanto riguarda le tensioni, non lo sono se si guarda alla durata fatica a causa del legame esponenziale tra la tensione di esercizio e il numero di ripetizioni di carico sopportabili. In pratica si sono trovate durate strutturali comprese tra circa  $1/2$  ed  $1/3$  di quelle corrispondenti all'utilizzazione delle tensioni del calcolo razionale approssimato.

Le durate a fatica trovate col calcolo razionale, a differenza di quelle ottenute col calcolo approssimato, sono risultate vicine a quelle del metodo empirico-teorico "AASHTO Guide".

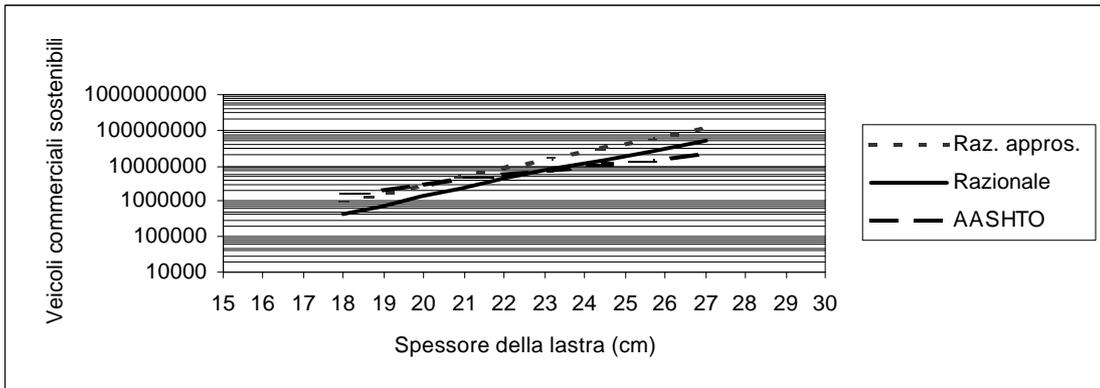
Poiché le leggi di fatica che si utilizzano per stimare la durata strutturale delle sovrastrutture in calcestruzzo sono molto sensibili ai valori delle tensioni, è auspicabile che nel calcolo ci si orienti sempre più verso una migliore valutazione dello stato tensionale. Oggi ciò è reso possibile dalla disponibilità di programmi di calcolo più avanzati e da elaboratori elettronici di grandi capacità.

I risultati ottenuti con l' "AASHTO Guide" confermano che tale metodo è applicabile correttamente per le condizioni ambientali della maggior parte del territorio italiano.

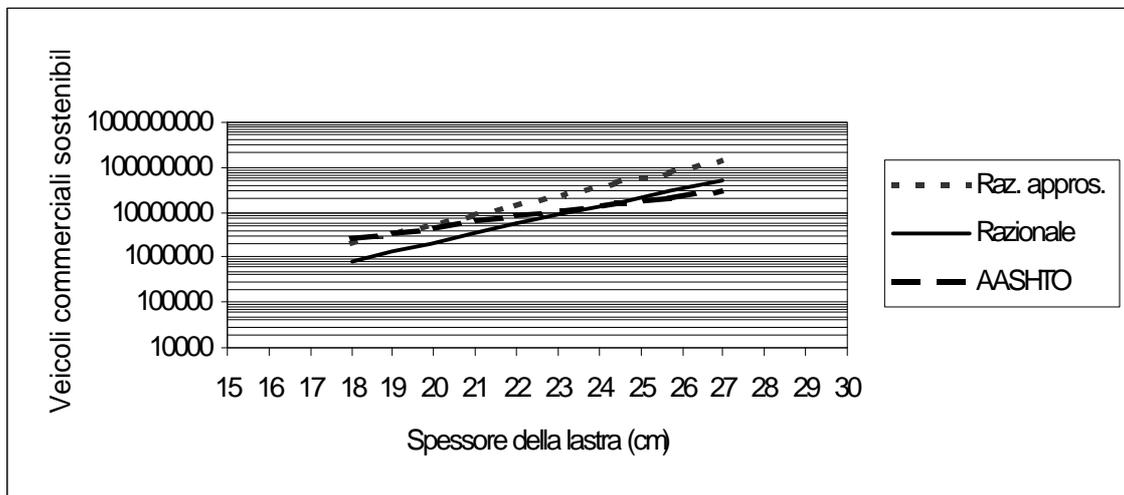
## BIBLIOGRAFIA

- [1] Barber, E.S.: "Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports". Bulletin 168, HRB, 1957.
- [2] B. F. Mc Cullough: "Design Procedure for CRCP Based on Laboratory and Field Observations". International Conference on Concrete Pavement Design. University Purdue, 1977.
- [3] B. F. Mc Cullough, M. Cauley : "CRCP Design based on Theoretical and Field Performance". Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on Concrete Pavement. Indianapolis, 1981.
- [4] AASHTO: "AASHTO Guide for Design of Pavements Structures" Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials Washington, 1985.
- [5] Nishizawa, Matsuno, Fukuda.: "A mechanical model for rational design of CRCP" Proceeding 3<sup>rd</sup> International Conference Pavement Design Rehabilitation, Purdue, 1985.
- [6] G. Camomilla, A. Marchionna: "Pavimentazione composita polifunzionale". Rivista "Autostrade", luglio-settembre 1985.
- [7] Yang H. Wang: "Pavement Analysis Design". Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [8] Wimsatt, Mc Cullough: "Subbase Friction Effects on Concrete Pavements" 4<sup>th</sup> International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. University Purdue, 1989.
- [9] J. W. Bull: "The Finite Element Analysis and Design of Precast Concrete Pavements and their relationship to Weestergard's analysis". 2<sup>nd</sup> International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements. Siguenza, October 1990.
- [10] L. J. M. Houben: "Two-Dimensional Finite Element Analysis of Unreinforced Concrete Pavements". 2<sup>nd</sup> International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements. Siguenza, October 1990.
- [11] L. Domenichini, P. Di Mascio, P. Giannattasio, C. Caliendo, B. Festa, A. Marchionna, P. Firmi. E. Molinaro, G. Paoloni: "Criteri di dimensionamento delle sovrastrutture di Catalogo". Quaderno n. 9 della Fondazione Politecnica per il Mezzogiorno di Italia. Napoli, dicembre 1993.
- [12] L. Domenichini, P. Di Mascio, P. Giannattasio, C. Caliendo, B. Festa, A. Marchionna, P. Firmi. E. Molinaro, G. Paoloni: "Modello di catalogo delle pavimentazioni stradali". Quaderno n. 10 della Fondazione Politecnica per il Mezzogiorno di Italia. Napoli, dicembre 1993.

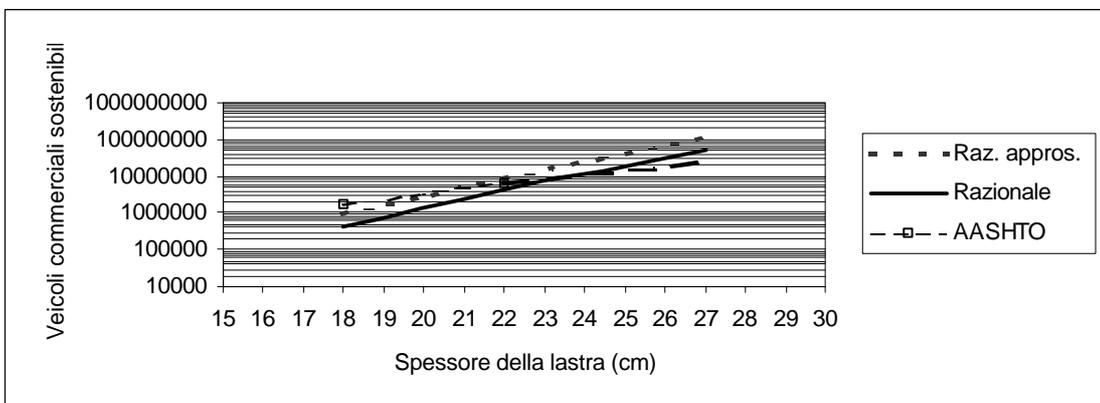
## APPENDICE



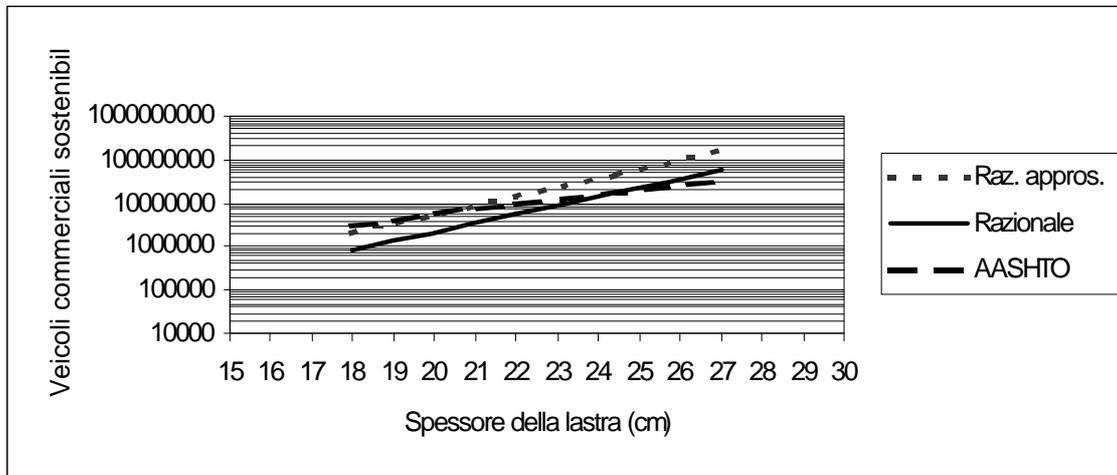
**Figura 10 - Veicoli commerciali sostenibili per le strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico (affidabilità = 90%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto  $K=15 \text{ daN/cm}^2$ ).**



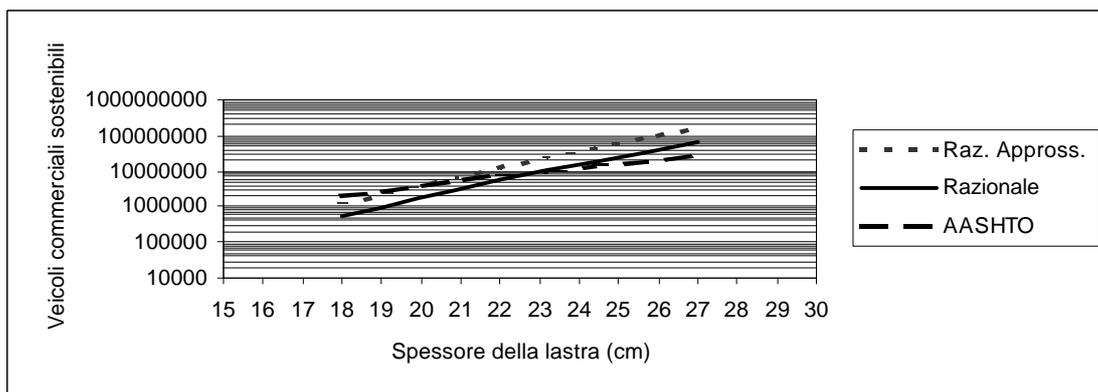
**Figura 11 - Veicoli commerciali sostenibili per le strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico (affidabilità = 90%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto  $K=21 \text{ daN/cm}^3$ ).**



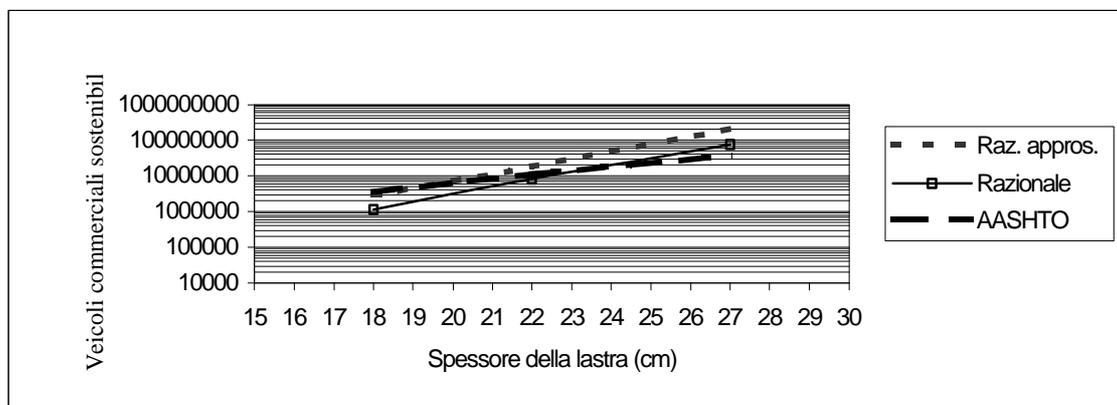
**Figura 12 - Veicoli commerciali sostenibili per le strade urbane di scorrimento (affidabilità = 95%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto  $K=15 \text{ daN/cm}^3$ ).**



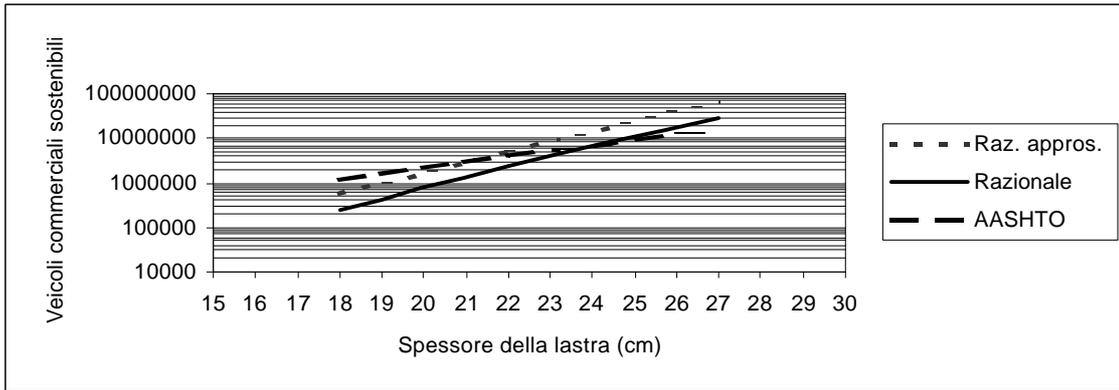
**Figura 13 - Veicoli commerciali sostenibili per le strade urbane di scorrimento (affidabilità = 95%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto  $K=21 \text{ daN/cm}^3$ ).**



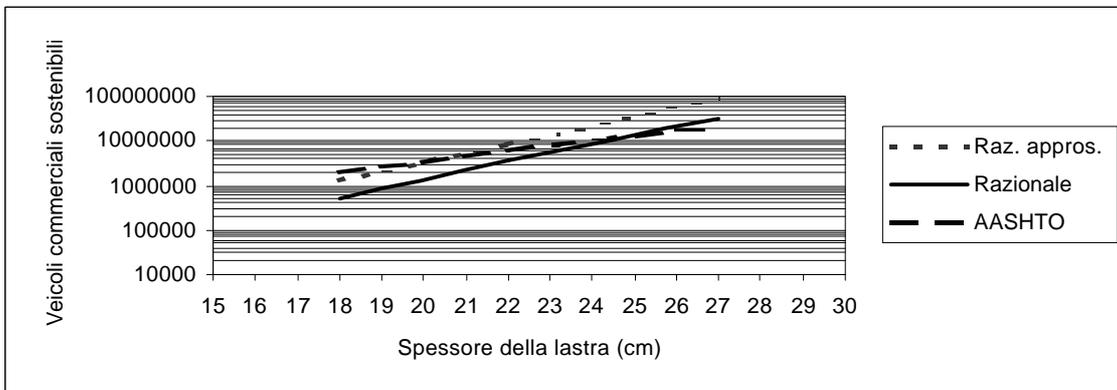
**Figura 14 - Veicoli commerciali sostenibili per le strade extraurbane secondarie (affidabilità = 85%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto  $K=15 \text{ daN/cm}^3$ ).**



**Figura 15 - Veicoli commerciali sostenibili per le strade extraurbane secondarie (affidabilità = 85%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto  $K=21 \text{ daN/cm}^3$ ).**



**Figura 16 - Veicoli commerciali sostenibili per corsie preferenziali dei mezzi pubblici (affidabilità = 95%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto K=15 daN/cm<sup>3</sup>).**



**Figura 17 - Veicoli commerciali sostenibili per corsie preferenziali dei mezzi pubblici (affidabilità = 95%, PSI =2.5, modulo di reazione del supporto K=21 daN/cm<sup>3</sup>).**