

LE PAVIMENTAZIONI RIGIDE

CAPITOLO 11

LE PAVIMENTAZIONI RIGIDE

1 INTRODUZIONE

Le pavimentazioni rigide sono costituite da piastre di calcestruzzo che, a differenza delle pavimentazioni flessibili, possono essere collocate direttamente sul terreno di sottofondo opportunamente trattato, o su uno o più strati (Base e sottobase o fondazione) di materiale granulare non legato o stabilizzato con leganti. Le prime applicazioni prevedevano il semplice appoggio della piastra sul terreno di sottofondo. Successivamente, con l'incremento dei carichi da traffico in volume e in peso, per evitare soprattutto il fenomeno del pompaggio, in prossimità dei giunti, che portava velocemente al degrado la struttura, si preferì utilizzare uno strato di base in misto cementato ed eventualmente uno di sottobase (Fig. 11.1).

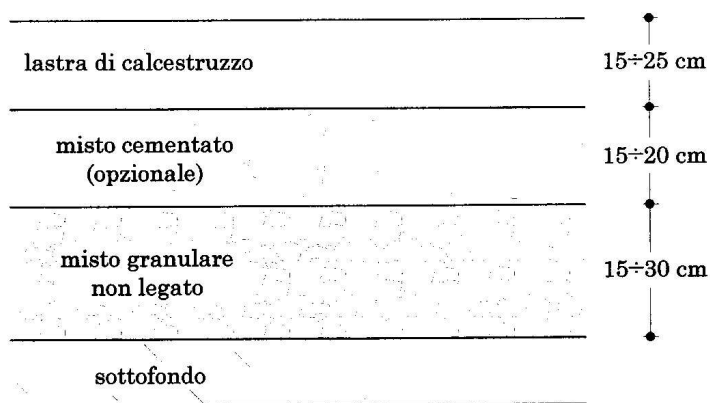


Figura 11.1 Sezione tipo di una pavimentazione rigida

2. TIPOLOGIE DI PAVIMENTAZIONI RIGIDE

Le pavimentazioni rigide in calcestruzzo si possono classificare in quattro tipologie strutturali (Fig. 11.2):

- Pavimentazioni in calcestruzzo giuntate (Jointed plain concrete pavement JPCP).
- Pavimentazioni in calcestruzzo giuntate e armate (Jointed reinforced concrete pavements JRCP).

- Pavimentazioni in calcestruzzo con armatura continua (Continuous reinforced concrete CRCP).
- Pavimentazioni in calcestruzzo precomprese (prestressed concrete pavement PCP).

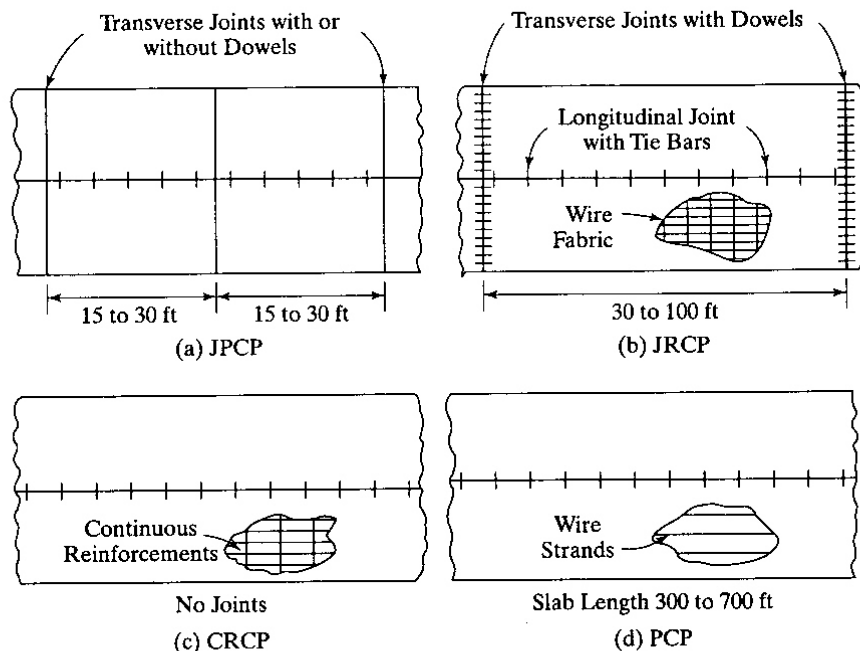


Figura 11.2 Tipologie di pavimentazioni in calcestruzzo

Le pavimentazioni giuntate (JPCP), sono caratterizzate da piastre in calcestruzzo prive di armatura di lunghezza variabile tra 4,5 e 9 m, con la presenza di giunti trasversali e longitudinali. Per consentire una migliore ripartizione dei carichi verticali alle lastre adiacenti si osserva la presenza di barre di acciaio (Dowels bars).

Le pavimentazioni armate (JRCP), sono caratterizzate da un rinforzo costituito da una rete metallica. L'armatura ha il compito di riprendere le sollecitazioni di trazione e permettere distanze tra i giunti di contrazione superiori. In queste sovrastrutture le distanze tra i giunti possono variare da 10 a 30 m.

La soluzione che prevede l'armatura continua (CRCP) ha l'obiettivo di eliminare quasi completamente i giunti di contrazione migliorando la regolarità superficiale e il possibile degrado della pavimentazione proprio nei giunti.

Un sistema per controllare completamente le sollecitazioni di trazione nella lastra e di eliminare completamente i giunti è quello della precompressione delle pavimentazioni in calcestruzzo (PCP). La precompressione aumenta la capacità di resistenza della sezione di calcestruzzo, consentendo una notevole riduzione dello spessore della lastra.

3. IL DEGRADO DELLE PAVIMENTAZIONI RIGIDE

I difetti più comuni che si riscontrano nelle pavimentazioni rigide e che conseguentemente portano rapidamente al loro completo degrado sono: il pumping, la differenza di livello nei giunti, la fessurazione trasversale e longitudinale delle lastre.

3.1. IL FENOMENO DEL PUMPING

Il Pumping è l'aspirazione di parte del materiale fino, presente nella fondazione delle pavimentazioni rigide, in prossimità dei giunti e delle fessurazioni, per effetto delle deflessioni verticali delle lastre nelle zone di discontinuità al passaggio dei carichi da traffico (Fig. 11.3). La perdita di parte del materiale della fondazione comporta una diminuzione della capacità portante in prossimità dei giunti. La conseguenza è un progressivo deterioramento con la formazione di vuoti nella fondazione, differenze di livello nei giunti adiacenti, possibili rotture negli angoli della lastra e fessurazioni trasversali (Fig. 11.4).

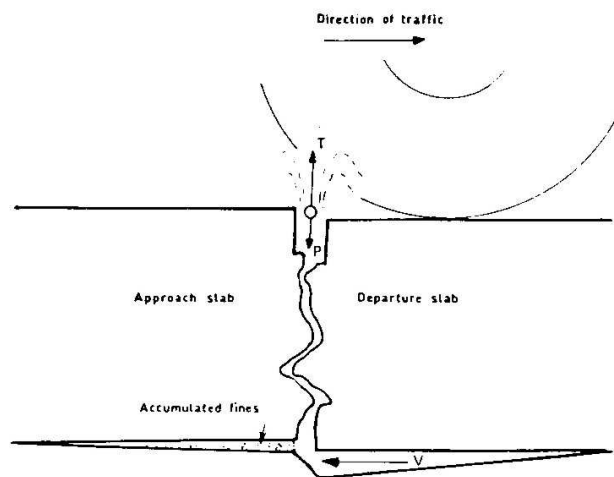


Figura 11.3 Effetto pumping in prossimità dei giunti

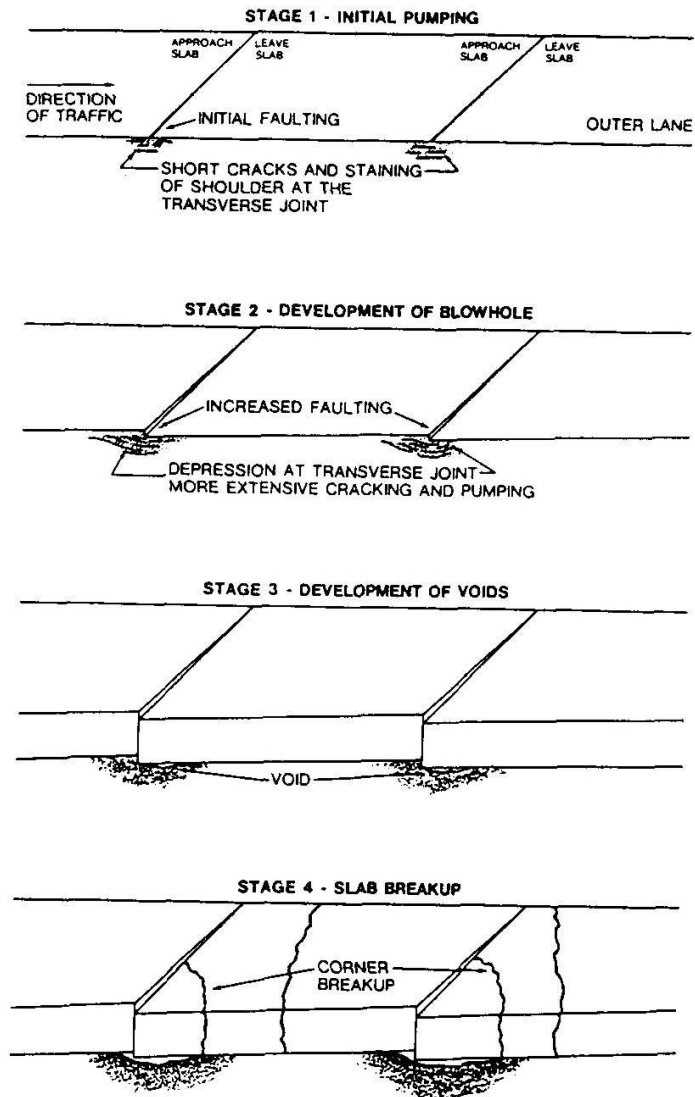


Figura 11.4 Fasi del degrado in conseguenza dell'effetto pumping

3.2. LA FESSURAZIONE LONGITUDINALE

Le fessurazioni longitudinali generalmente avvengono in prossimità della linea centrale della pavimentazione. Esse sono causate dalla combinazione delle sollecitazioni causate dai forti carichi stradali, dalla perdita di capacità portante in alcune zone della fondazione e dall'effetto curling. Lungo le fessure, in superficie si possono anche verificare distacchi di parti di calcestruzzo (Spalling).

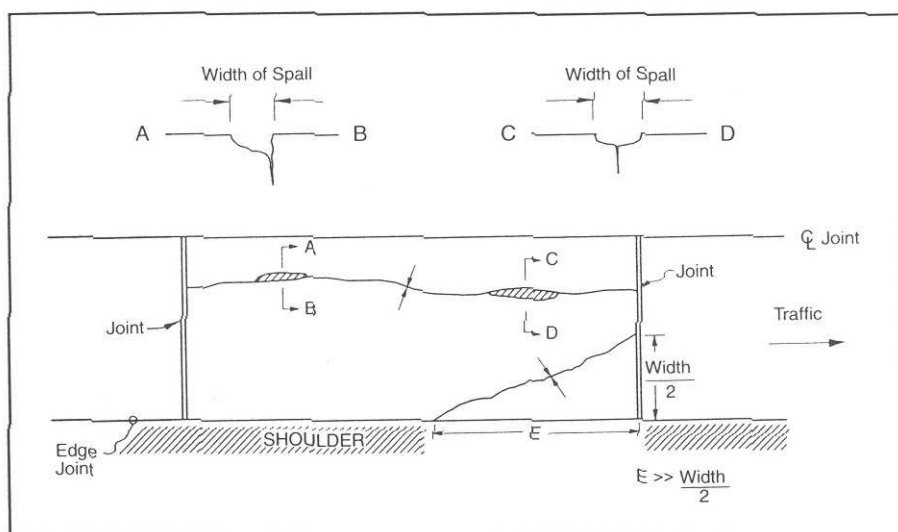


Figura 11.5 Fessurazioni longitudinali



Figura 11.6 Fessurazioni longitudinali

3.3. LA FESSURAZIONE TRAVERSALE

Le fessurazioni trasversali e diagonali delle lastre dipendono generalmente dalla ripetizione dei carichi stradali, dalle variazioni del gradiente termico nelle pavimentazioni e dal ritiro del calcestruzzo. Le parti adiacenti, distaccate per la presenza della fessura, possono anche presentare differenze di livello (faulting).

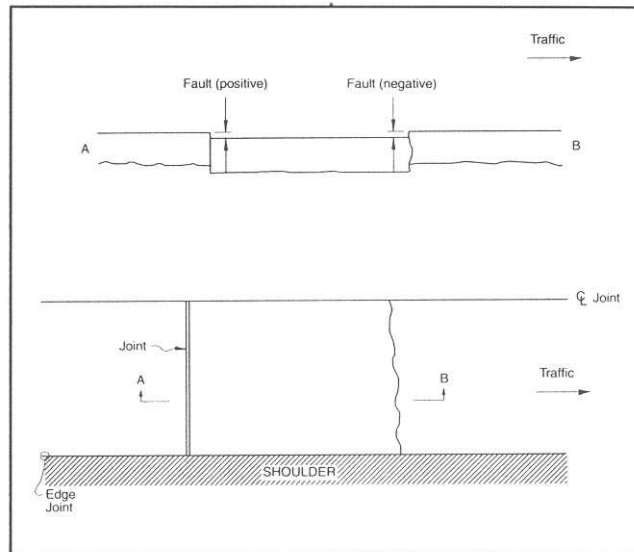


Figura 11.7 Fessurazione trasversale

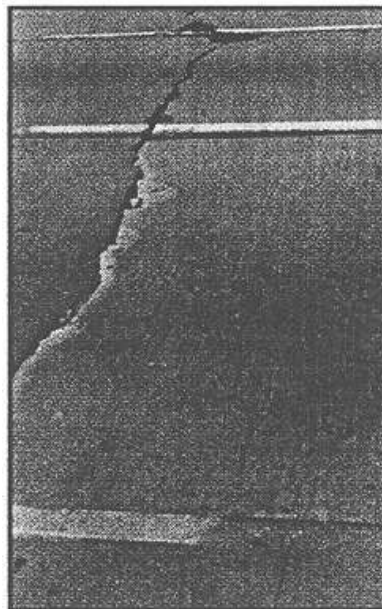


Figura 11.8 Fessurazione trasversale

4 MISURA DELLA FUNZIONALITA' DI UNA PAVIMENTAZIONE RIGIDA

Anche per le pavimentazioni rigide il concetto di funzionalità fu introdotto per la prima volta durante l'esperimento AASHO Road Test. Come per le pavimentazioni flessibili venne introdotto l'indicatore di funzionalità PSI in funzione di alcuni difetti facilmente misurabili.

$$PSI = 5,41 - 1,71 \log (1 + SV) - 0,09 \sqrt{C + P}$$

dove:

- Sv è la media della varianza della variazione di pendenza longitudinale misurata nei due profili longitudinali delle wheel paths
- C è la lunghezza delle fessurazioni riscontrate per unità di superficie della pavimentazione
- P è la superficie delle buche per unità di superficie.

5. SOLLECITAZIONE E DEFORMAZIONE NELLE PAVIMENTAZIONI RIGIDE

Le sollecitazioni e deformazioni indotte nella lastra in calcestruzzo hanno tre cause principali: la presenza di azioni esterne dovute ai carichi da traffico pesante, l'effetto di una differenza di temperatura riscontrabile sulle superfici della lastra durante il giorno e la notte (effetto curling) e una differenza di temperatura stagionale della lastra che può, a seconda che diminuisca o aumenti, provocare una diminuzione di volume (ritiro) o un aumento di volume (dilatazione) della lastra. Il fenomeno del ritiro, parzialmente impedito dall'attrito della piastra con la fondazione, causa delle sollecitazioni di trazione nel calcestruzzo. Inoltre la stagionatura del calcestruzzo (diminuzione della percentuale d'acqua) accentua il fenomeno. Per valutare lo stato della sollecitazione e deformazione nelle lastre in calcestruzzo si possono seguire tre impostazioni: espressioni in forma chiusa elaborate utilizzando la teoria di Westergaard, carte di progetto, elaborate sempre con la teoria di Westergaard, che consentono di considerare più carichi contemporaneamente e collocati in un qualsiasi punto della lastra, metodi numerici agli elementi finiti (FEM) con la fondazione schematizzata come uno strato indefinito continuo o alla Winkler (letto di molle o Liquid foundation).

5.1 SOLLECITAZIONE DOVUTA AI CARICHI STRADALI

5.1.1. Teoria di Westegaard

Per calcolare le sollecitazioni e le deformazioni dovute ai carichi stradali, la teoria più diffusa è stata sviluppata da Westergaard tra il 1926 e il 1948. La formulazione originaria prevedeva soltanto carichi applicati su impronte circolari e posizionati al centro, nell'angolo e nelle estremità dei lati di una lastra molto estesa su una fondazione alla Winkler (Liquid foundation). Il terreno di appoggio della lastra, sempre in contatto con la lastra stessa, reagisce unicamente con forze verticali proporzionali al cedimento nel punto (Fondazione costituita da un letto di molle).

5.2.1 Carico circolare nell'angolo

La formula più datata quella elaborata da Goldbeck (1919). Essa si basa sul calcolo della massima sollecitazione di trazione per effetto di un carico concentrato posizionato nell'angolo. Trascurando, in favore di sicurezza, la reazione della fondazione, si ottiene il valore della massima tensione di trazione nella superficie superiore della lastra lungo la bisettrice dell'angolo.

$$\sigma_t = \frac{P x}{\frac{1}{6} 2x h^2} = \frac{3 P}{h^2}$$

Westergaard (1926), ipotizzando un carico su impronta circolare applicato nell'angolo e considerando anche la reazione del terreno di appoggio, con un metodo che prevedeva successive approssimazioni individuò la seguente espressione per la stima del valore massimo della sollecitazione di trazione:

$$\sigma_t = \frac{3 P}{h^2} \times \left[1 - \left(\frac{a \sqrt{2}}{l} \right)^{0,6} \right]$$

la deflessione massima nell'angolo della piastra si calcola con la seguente espressione:

$$f = \frac{P}{k l^2} \times \left[1,1 - 0,88 \left(\frac{a \sqrt{2}}{l} \right) \right]$$

dove

- l è il raggio di rigidezza relativa
- a è il raggio della superficie del carico
- k è il modulo di reazione della fondazione

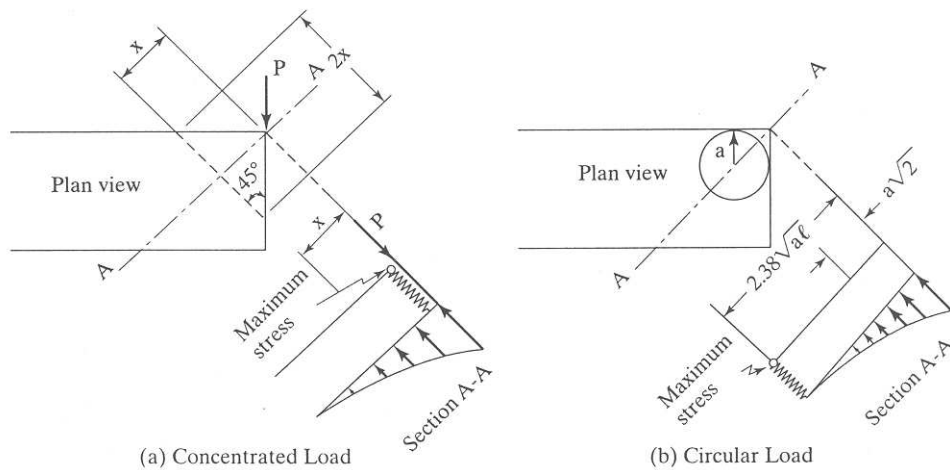


Figura 11.14 Sollecitazione nell'angolo della lastra

5.2.2 Carico circolare nel centro della piastra

L'espressione più datata è stata ancora sviluppata da Westergaard (1926). Essa individua la sollecitazione massima di trazione, al centro dell'area circolare del carico, nella superficie inferiore della piastra.

Per un valore del coefficiente di Poisson pari a 0,15 l'espressione diventa:

$$\sigma_t = \frac{0,316 P}{h^2} \times \left[4 \log_{10} \frac{l}{b} + 1,069 \right]$$

La deflessione massima al centro del carico applicato sull'impronta circolare è data dalla seguente espressione (Westergaard 1939):

$$f = \frac{P}{8 \cdot k \cdot l} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot l} \right) - 0,673 \right] \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\}$$

con

$$b = a \quad \text{quando} \quad a \geq 1,72 h$$

$$b = \sqrt{1,6 a^2 + h^2} - 0,675 h \quad \text{quando} \quad a < 1,72 h$$

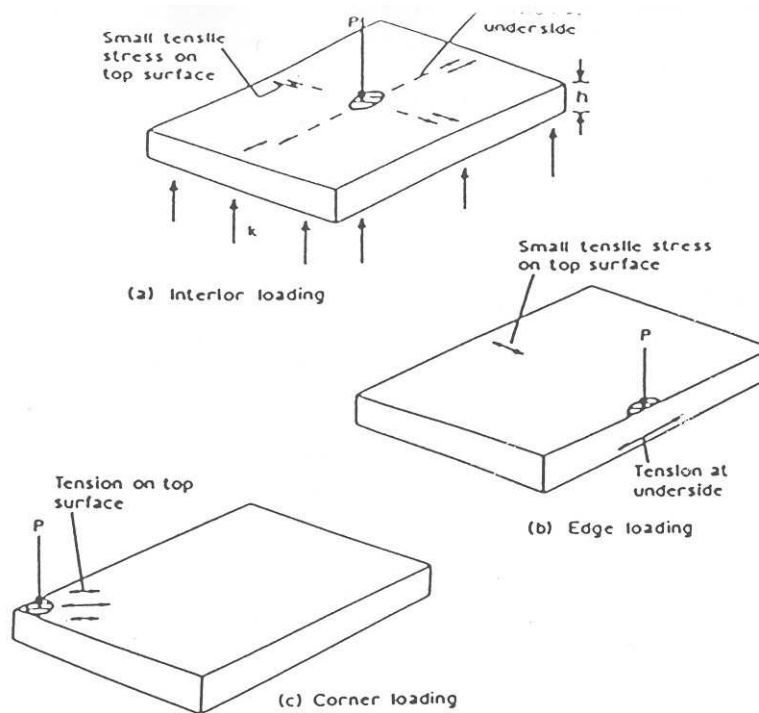


Figura 11.15 Sollecitazioni per carichi all'interno e al bordo della lastra

5.2.3 Carico circolare al bordo della piastra

In letteratura si trovano diverse espressioni proposte da Westergaard in diversi lavori. Il carico viene trasmesso attraverso un impronta circolare, semicircolare, ellittica e semiellittica. I risultati sono anche significativamente diversi. L'equazione proposta dal Westergaard nel suo primo lavoro è la seguente:

$$\sigma_t = \frac{0,572 P}{h^2} \times \left[4 \log_{10} \frac{l}{b} + 0,359 \right]$$

L'equazione più corretta per valutare la sollecitazione massima di trazione nel bordo inferiore della lastra per un carico applicato su un'area circolare di raggio a , ponendo il coefficiente di Poisson pari a 0,15, è l'equazione formulata da Ioannides (1985):

$$\sigma_t = \frac{0,803 P}{h^2} \times \left[4 \log_{10} \frac{l}{a} + 0,666 \frac{a}{l} - 0,034 \right]$$

Se il carico viene trasmesso su un'area semicircolare la sollecitazione massima di trazione al bordo inferiore della lastra diventa:

$$\sigma_t = \frac{0,803 P}{h^2} \times \left[4 \log_{10} \frac{l}{a} + 0,282 \frac{a}{l} + 0,650 \right]$$

Le deflessioni massime in corrispondenza dell'asse del carico si calcolano rispettivamente con le seguenti espressioni:

$$f = \frac{0,431 \cdot P}{k \cdot l^2} \cdot \left[1 - 0,82 \cdot \frac{a}{l} \right]$$

$$f = \frac{0,431 \cdot P}{k \cdot l^2} \cdot \left[1 - 0,349 \cdot \frac{a}{l} \right]$$

5.2.3 Carico esercitato da due ruote gemelle

Tutte le soluzioni proposte per il calcolo della sollecitazione massima di trazione nella lastra, applicando la teoria del Westergaard, partono dall'ipotesi di un carico applicato su un'impronta circolare, in qualche caso semicircolare, e talvolta ellittica. Quando la sollecitazione è trasmessa da un carico che agisce attraverso due ruote gemelle (Dual tires) è necessario trasformare l'impronta in una superficie circolare equivalente per utilizzare le stesse espressioni di calcolo delle St.

Un risultato soddisfacente viene ottenuto trasformando la superficie della figura che indica l'impronta delle due ruote gemelle e lo spazio tra le ruote, in un'area circolare equivalente.

Dal carico gravante su una ruota e dalla pressione di contatto si può ricavare la dimensione L dell'area di contatto.

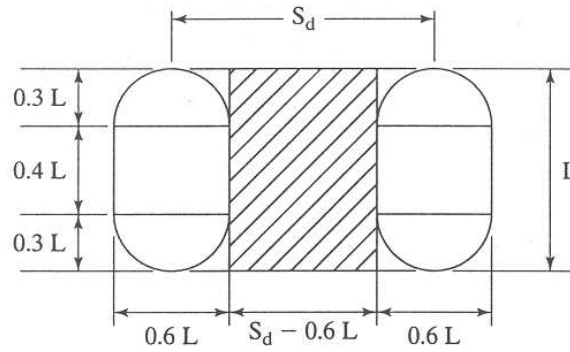


Figura 11.16 superficie d'impronta delle ruote gemelle

$$\frac{Q}{q} = \pi \cdot (0,3 \cdot L)^2 + (0,4 \cdot L) \cdot (0,6 \cdot L) = 0,5227 \cdot L^2$$

$$L = \sqrt{\frac{Q}{0,5227 \cdot q}}$$

L'area equivalente dell'impronta circolare si ottiene dalla seguente eguaglianza:

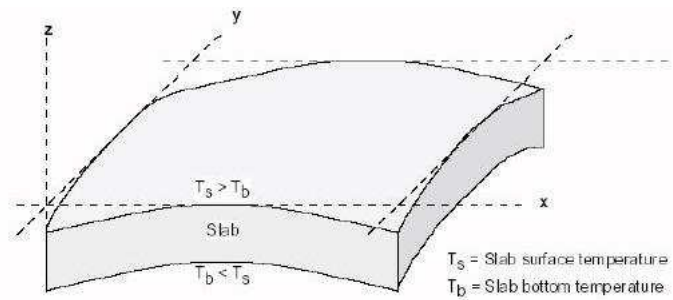
$$\pi \cdot a^2 = 2 \cdot 0,5227 \cdot L^2 + (S_d - 0,6 \cdot L) \cdot L = 0,4454 \cdot L^2 + S_d \cdot L$$

$$a = \sqrt{\frac{0,8521 \cdot Q}{q \cdot \pi} + \frac{S_d}{\pi} \cdot \left(\frac{Q}{0,5227 \cdot q}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

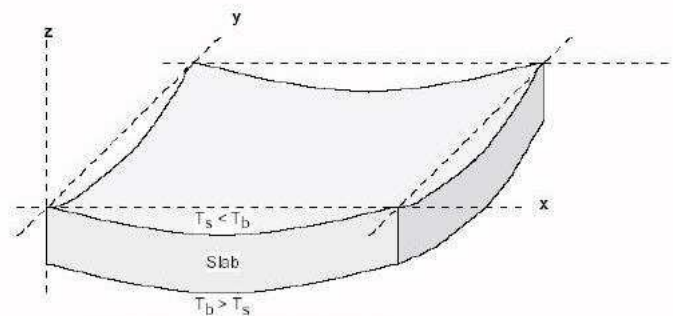
5.3 SOLLECITAZIONE DOVUTA ALL'EFFETTO CURLING

La lastra in calcestruzzo, per effetto dell'irraggiamento solare, della trasmissione del calore per convezione e dell'intensità del vento, assume in superficie una temperatura che dipende da quella esterna dell'aria. All'interno della lastra si instaura un regime termico, per opera della trasmissione del calore per conduzione, che comporta temperature variabili con lo spessore della lastra. Durante il giorno, quando la temperatura sulla superficie superiore della lastra è maggiore di quella che si riscontra sulla superficie inferiore, la parte esterna (superiore) della lastra tende a dilatarsi rispetto all'asse neutro; mentre la parte inferiore, per le stesse ragioni, tende a contrarsi. La dilatazione e la corrispondente contrazione, viene impedita dal peso proprio della lastra. Ciò induce delle sollecitazioni di compressione nella parte superiore, e delle sollecitazioni di trazione nella parte inferiore della lastra. Durante la notte, quando la temperatura della parte superiore della lastra è inferiore a quella della parte inferiore, per le stesse ragioni viste in precedenza, nascono delle sollecitazioni nelle due

estremità di segno opposto: trazione nella parte superiore e compressione nella parte inferiore. Tali sollecitazioni si possono combinare con quelle dovute ai carichi stradali.



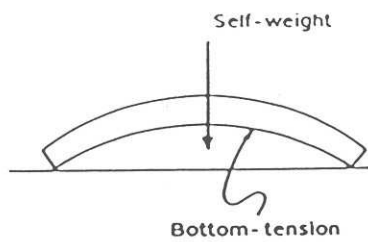
(a) Day (slab surface temp > bottom temp)



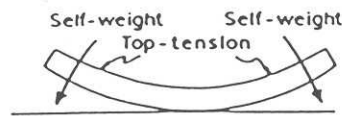
(b) Night (slab bottom temp > surface temp)

☀ Sun causes rapid rise in temperature of slab surface

↙ ↘ Rapid cooling of slab surface at night



(a) Hot day after a cold night



(b) Cold night after a hot day

Figura 11.9 Effetto Curling

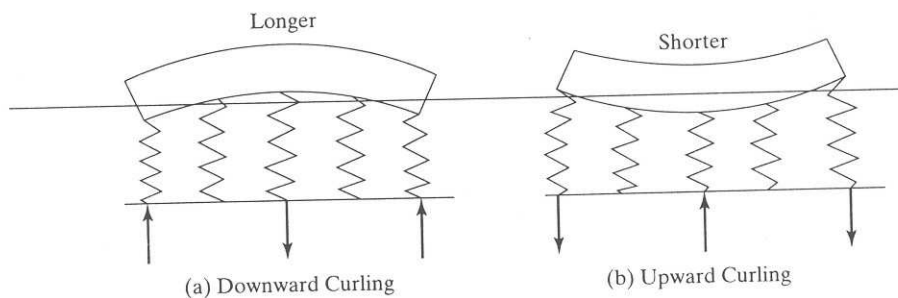


Figura 11.10 Effetto Curling

5.3.1 Sollecitazione per piastra indefinita

Considerando una piastra sollecitata nelle due direzioni in piano x ed y, la deformazione unitaria nella direzione x si calcola con la legge generalizzata di Hooke:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \times \frac{\sigma_y}{E}$$

dove, con E viene indicato il modulo elastico del calcestruzzo.

Analogamente nella direzione y si ha:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \times \frac{\sigma_x}{E}$$

Se la piastra è soggetta a flessione soltanto nella direzione x, per l'ipotesi di piastra indefinita, la deformazione unitaria nella direzione y è zero; pertanto imponendo ε_y uguale a zero si ottiene:

$$\sigma_y = \nu \sigma_x$$

sostituendo questo valore nella espressione di ε_x si ricava:

$$\sigma_x = \frac{E \varepsilon_x}{1 - \nu^2}$$

L'effetto "curling" impone la deflessione in entrambe le direzioni e quindi sarà necessario sommare gli effetti.

Se si ipotizza una lastra non vincolata alle estremità, con una differenza di temperatura di Δt tra le due superfici esterne della lastra, e una distribuzione lineare della temperatura all'interno della lastra, la parte esterna si dilaterà nelle due direzioni della quantità:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\alpha_1 \times \Delta t}{2}$$

Dove α_1 è il coefficiente di dilatazione lineare del calcestruzzo.

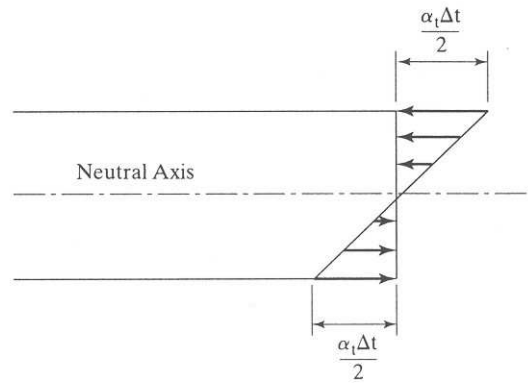


Figura 11.11 Distribuzione lineare della temperatura nella lastra

La sollecitazione nella direzione x dovuta alla flessione impedita nella stessa direzione x

$$\sigma_x = \frac{E \times \alpha_1 \times \Delta t}{2(1-\nu^2)}$$

Sommando a questa sollecitazione il contributo nella stessa direzione della flessione impedita nella direzione y :

$$\sigma_x = \frac{\nu \times E \times \alpha_1 \times \Delta t}{2(1-\nu^2)}$$

si ottiene:

$$\sigma_x = \frac{E \alpha_1 \Delta t}{2(1-\nu^2)} \times (1+\nu) = \frac{E \alpha_1 \Delta t}{2(1-\nu)}$$

5.3.2 Sollecitazione per piastra finita

Se la piastra ha dimensioni finite con una lunghezza L_x ed una larghezza L_y , la sollecitazione totale nella direzione x per effetto curling, al centro della piastra è data dall'espressione:

$$\sigma_x = \frac{C_x E \alpha_1 \Delta t}{2(1-\nu^2)} + \frac{C_y \nu E \alpha_1 \Delta t}{2(1-\nu^2)} = \frac{E \alpha_1 \Delta t}{2(1-\nu^2)} \times (C_x + \nu C_y)$$

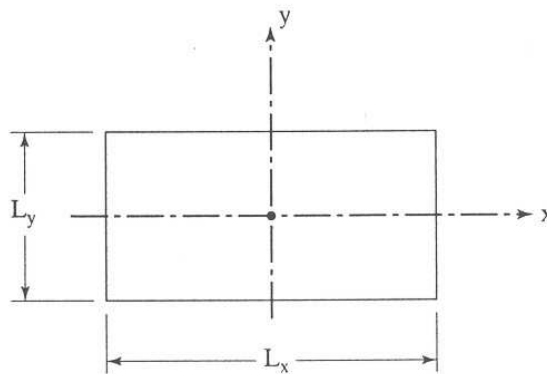


Figura 11.12 Lastra di dimensioni finite

Analogamente la sollecitazione nella direzione y si ottiene da un'espressione simile:

$$\sigma_y = \frac{E \alpha_1 \Delta t}{2(1-\nu^2)} \times (C_y + \nu C_x)$$

C_x e C_y sono due fattori di correzione calcolati da Bradbaury, usando la teoria di Westergaard, in funzione del rapporto tra la lunghezza libera della piastra ed il raggio di rigidezza della lastra.

$$l = \left[\frac{E h^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25}$$

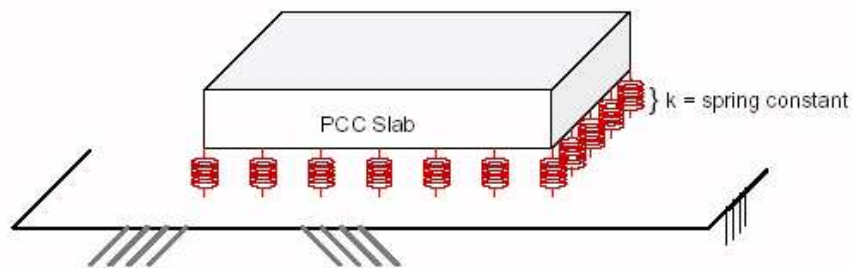
dove:

E è il modulo elastico del calcestruzzo

ν è il coefficiente di Poisson

h è lo spessore della lastra

k è il modulo di reazione del sottofondo (fondazione alla Winkler o Liquid foundation)



La sollecitazione massima all'estremità della piastra è data dalla seguente espressione:

$$\sigma = \frac{C E \alpha_1 \Delta t}{2}$$

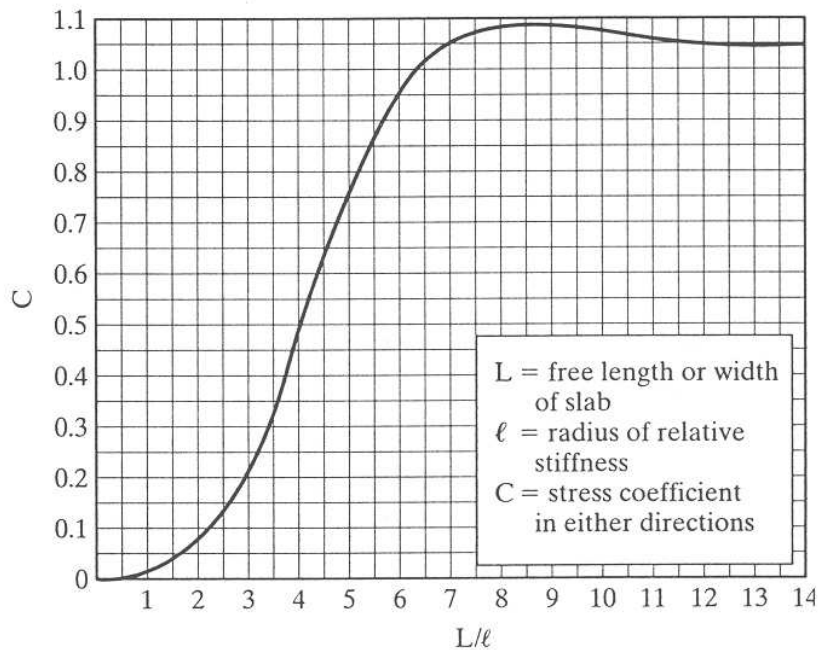


Figura 11.13 Diagramma per valutare i coefficienti C

5.4 SOLLECITAZIONE DOVUTA AL RITIRO E ALLA CONTRAZIONE

La pavimentazione in calcestruzzo, per effetto di una diminuzione della temperatura della lastra o per variazioni della percentuale d'acqua, subisce una diminuzione del suo volume. Ciò comporta due importanti effetti nel calcestruzzo. Il primo induce delle sollecitazioni di trazione che possono causare delle rotture trasversali; il secondo causa l'apertura dei giunti con riduzione dell'efficienza degli stessi nel trasferimento dei carichi.

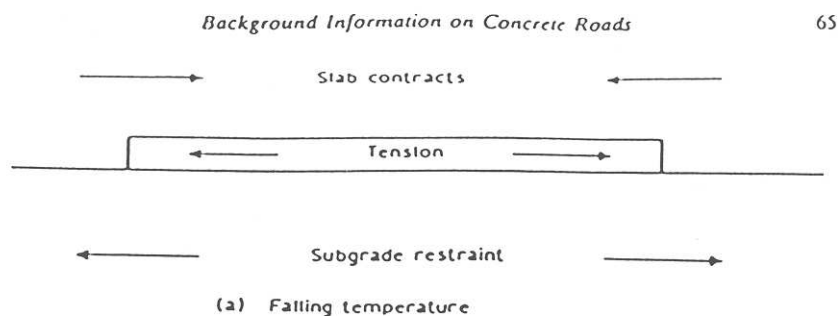


Figura 11.17 Sollecitazioni per ritiro e dilatazione della lastra

5.4.1 Sollecitazioni di trazione

Una lastra appoggiata su un terreno di fondazione, soggetta ad una diminuzione della sua temperatura, tende a contrarsi, muovendo entrambe le estremità verso il centro che per

simmetria rimane nella posizione iniziale. Il terreno di fondazione contrasta il movimento della lastra attraverso l'attrito che si innesca tra la superficie di appoggio della lastra. La reazione di attrito è massima all'estremità della lastra dove massimo è il movimento ed è nulla al centro della lastra.

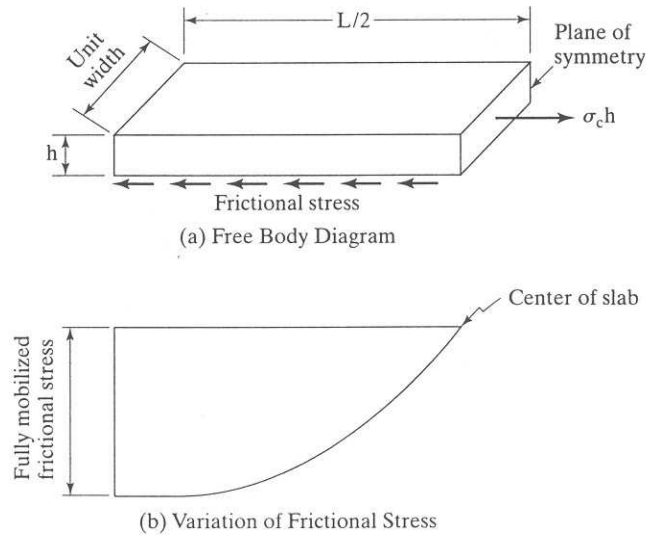


Figura 11.18 Sollecitazione di trazione per ritiro della lastra

Questo effetto determina, al centro della lastra, una sollecitazione di trazione massima che può essere determinata con la seguente equazione di equilibrio tra le forze che sollecitano la lastra.

$$\sigma_t = \frac{\gamma_c L f_a}{2}$$

dove:

- y è la massa volumica del calcestruzzo
- L è la lunghezza della lastra
- Fa è il coefficiente medio di attrito tra il terreno e la lastra

Si può osservare che la sollecitazione dipende dalla lunghezza della lastra ed è indipendente dallo spessore.

5.4.2 Apertura dei giunti

Lastre in calcestruzzo con giunti trasversali molto distanziati, soggette a contrazione per effetto della diminuzione della temperatura, causano aperture nei giunti con evidente diminuzione dell'efficienza degli stessi nel trasferimento dei carichi. L'apertura dei giunti di contrazione può essere stimata approssimativamente con la seguente formula:

$$\Delta L = C L (\alpha_1 \Delta t + \epsilon)$$

dove:

- ΔL è la larghezza del giunto causata dalla variazione della temperatura e dal ritiro del calcestruzzo
- α_1 è il coefficiente di dilatazione termica
- ε è il coefficiente di ritiro del calcestruzzo

6. I GIUNTI NELLE PAVIMENTAZIONI RIGIDE

Se una pavimentazione in calcestruzzo fosse costruita in modo da costituire un'unica lastra continua, inevitabilmente si formerebbero in esse a distanze regolari, un certo numero di fessurazioni, a causa delle sollecitazioni interne di trazione per variazioni termiche e dovute al ritiro del calcestruzzo, contrastate dall'attrito tra la lastra ed il terreno di appoggio. Per tale motivo nella pavimentazione vengono realizzate delle interruzioni dette giunti in senso trasversale e longitudinale. I giunti che hanno la prevalente funzione di consentire la diminuzione di volume del calcestruzzo, per diminuzione della temperatura e per il fenomeno del ritiro, sono detti giunti di contrazione. Quelli che invece permettono l'allungamento della lastra si chiamano giunti di dilatazione o espansione. Questi ultimi sono disposti trasversalmente soltanto in alcuni punti singolari per evitare la trasmissione di forti azioni di compressione; essi interessano tutto lo spessore della lastra, hanno una larghezza minima di 20 mm e devono essere provvisti di elementi che consentono il trasferimento dei carichi verticali fra le lastre adiacenti separate dal giunto.

I giunti di contrazione sono sempre disposti sia longitudinalmente che trasversalmente. Essi non interessano tutto lo spessore della pavimentazione; spesso vengono tagliati nel calcestruzzo parzialmente indurito per una larghezza non superiore ai 8 mm e una profondità pari a 1/5 dello spessore della lastra. In queste zone di minore resistenza l'accorciamento parzialmente impedito dall'attrito produce sollecitazioni tali da provocare la rottura.

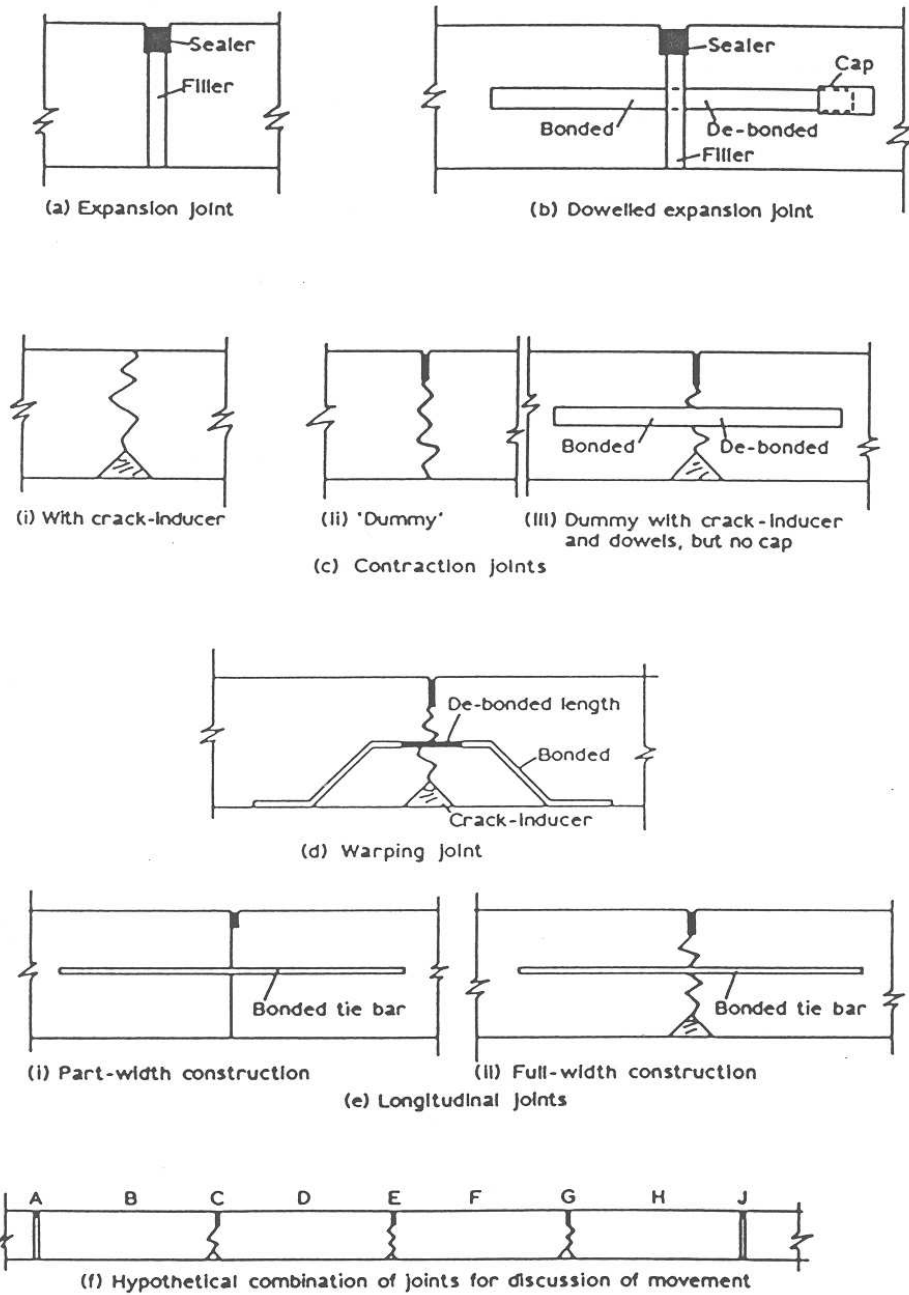


Figura 11.19 Tipologie di giunti

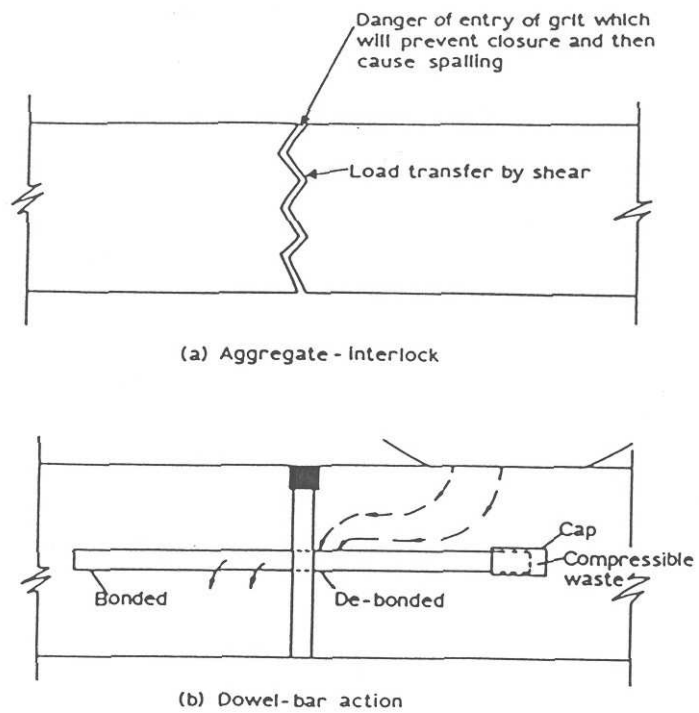


Figura 11.20 Giunti di contrazione (interlock e con dowel bars)



Figura 11.21 Giunti di contrazione (interlock)



Figura 11.22 Giunti di contrazione dowel bars)

7. TECNOLOGIA DEI MATERIALI

7.1 CARATTERISTICHE DEL CALCESTRUZZO

7.1.1 Resistenza alla compressione

Per individuare la qualità e la durabilità di un calcestruzzo, universalmente si impiega il valore della resistenza caratteristica a compressione mono assiale misurata su provini cubici di lato 150 mm con 28 giorni di stagionatura. La resistenza caratteristica definita come il frattile di ordine 0,05 della distribuzione delle resistenze a compressione, rappresenta quel valore della resistenza al di sotto del quale si trova il 5 % della popolazione dei valori misurati.

Allo scopo di orientare la progettazione e semplificare la produzione ed il controllo si fa riferimento alle classi di resistenza riportate nella tabella.

CLASSE Fck N/mm2	NOTE	
15	c.a. normale	Conglomerato per uso corrente
20		
25		
30	c.a. normale e precompresso	Solo previo studio preliminare E controlli
35		
40		
45		
50	c.a. precompresso	
55		

Tabella 11.1

7.1.2 Resistenza alla trazione

La resistenza alla trazione semplice generalmente viene determinata in conformità delle prescrizioni della norma UNI 6135. Il valore medio della resistenza a trazione, in mancanza di dati sperimentali diretti misurati su campioni stagionati a 28 giorni può essere assunta pari a:

$$f_{ctm} = (0,27 \times f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$f_{ctm} = (0,58 \times f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad [\text{Kg/cm}^2]$$

La resistenza a trazione per flessione può essere stimata con la seguente espressione:

$$f_{ctm} = 1,2 \times f_{ctm}$$

7.1.3 Modulo di elasticità

In mancanza di determinazioni dirette da eseguirsi secondo la norma UNI 6556 “Determinazione del modulo elastico secante a compressione” si possono assumere per il modulo elastico istantaneo il valore dato dall’espressione:

$$E_{cm} = 8900 \times (f_{ct} + 9,6)^{1/3} \quad [\text{N/mm}^2]$$

7.1.4 Ritiro

Quando non si ricorre ad additivi speciali, il ritiro totale del calcestruzzo può stimarsi mediante un coefficiente di contrazione in funzione dell’età del conglomerato, a partire dalla quale si considera l’effetto del ritiro to, dall’umidità relativa dell’aria e da un parametro geometrico della sezione esposta.

Per le pavimentazioni rigide il coefficiente di ritiro vale:

$$16 \times 10^{-5} \text{ per } f_{ck} 30 \text{ N/mm}^2$$
$$30 \times 10^{-5} \text{ per } f_{ck} \text{ uguale a } 55 \text{ N/mm}^2$$

7.1.5 Coefficiente di dilatazione termica

Il coefficiente di dilatazione termica medio del calcestruzzo si può stimare compreso:

$$\alpha = (10 \div 12) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

7.1.6 Resistenza alla fatica

Come è noto un carico applicato ripetutamente su una struttura può provocare la rottura anche se lo stato tensionale indotto non supera quello limite del materiale. Per individuare la legge di fatica del calcestruzzo si sottopongono dei provini prismatici ad sollecitazioni di flessione ripetute. In un diagramma in scala semilogaritmica viene indicato il log (N) che provoca la rottura in funzione del rapporto tra la sollecitazione massima di trazione indotta da ogni ciclo e il modulo di rottura a flessione. Le leggi determinate sperimentalmente indicano che se il rapporto tra la sollecitazione e il modulo di rottura è inferiore a 0,5 il numero di ripetizioni è praticamente illimitato.

La legge che mediamente rappresenta il comportamento a fatica del calcestruzzo è quella di Darter rappresentata dall’espressione:

$$\log(N) = 17,61 - 17,61 \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} \right)$$

dove:

- N è il numero delle ripetizioni del carico che provoca la rottura
 σ è la sollecitazione di trazione nel calcestruzzo.
 σ_R è la tensione di rottura per flessione del calcestruzzo.

7. LA PROGETTAZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI RIGIDE

I metodi di calcolo delle pavimentazioni rigide consistono unicamente nel verificare che le azioni dei carichi stradali ripetuti e le azioni ambientali dovute soprattutto alle variazioni termiche giornaliere e stagionali siano compatibili con la resistenza della lastra in calcestruzzo. Esistono dei metodi meccanicistici che preliminarmente impongono un'analisi tensionale per valutare lo stato della sollecitazione e deformazione nella lastra di calcestruzzo con diverse combinazioni di carichi e metodi empirici che richiamano i risultati di test eseguite su strade sperimentali o di altre realizzazioni.

In ogni caso i dati di input sono:

- Dati di traffico
- Fattori climatici
- Caratteristiche dei materiali

7.1. METODI MECCANICISTICI

Generalmente le pavimentazioni in calcestruzzo vanno verificate preliminarmente a rottura assumendo come carichi massimi di progetto quelli relativi ai mezzi d'opera (carico tridem da 39 KN) o quelli dei carichi eccezionali (carico tridem da 600 KN). La scelta del carico è fatta in funzione della tipologia di strada. Il catalogo delle pavimentazioni stradali del CNR, per il dimensionamento delle sovrastrutture rigide, prevede, per le pavimentazioni delle autostrade extraurbane, autostrade urbane, strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico e strade urbane di scorrimento, come carichi di progetto quelli eccezionali. In queste verifiche oltre ai carichi da traffico previsti è opportuno considerare anche gli effetti termici. Una volta stabilito uno spessore minimo della lastra si passa alla verifica a fatica con riferimento al traffico di progetto e allo spettro di traffico relativo alla tipologia di strada considerata. La sollecitazione massima viene stabilita dalla sovrapposizione degli effetti dovuti ai carichi di traffico e ai gradienti termici. Si utilizza la legge di Miner:

$$\sum \frac{n}{N} = 1$$

in cui n e N sono rispettivamente il numero effettivo e il numero ammissibile di ripetizioni di carico per ogni gradiente termico e per ogni condizione di trasferimento del carico ai giunti.