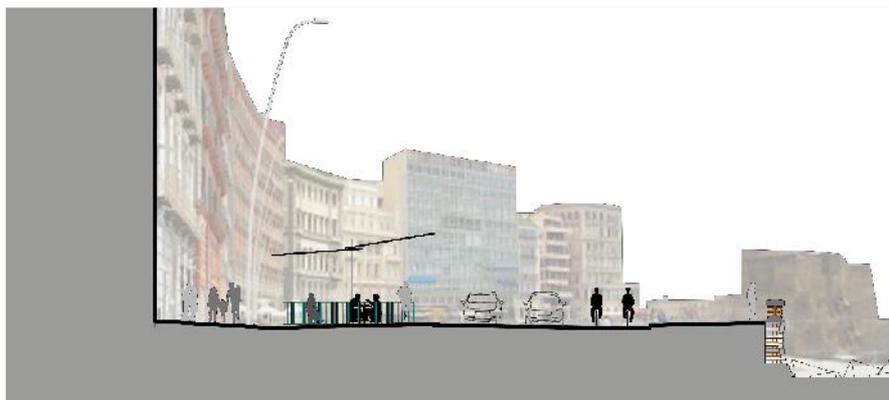




COMUNE DI NAPOLI
Direzione centrale Pianificazione e gestione del territorio - sito Unesco
Servizio Programma Unesco e valorizzazione della città storica

Riqualificazione lungomare

Tratto piazza Vittoria - Molosiglio



PROGETTO DEFINITIVO

Gruppo di progettazione

arch. Anna Rita Affortunato, arch. Daniela Buonanno, ing. Roberta Catapano, arch. Renata Ciannella, ing. Antonio d'Aniello, arch. Luca d'Angelo, ing. Marzia di Caprio (responsabile integrazione prestazioni specialistiche), geom. Luciano Marino, dott. Giuseppe Marzella, ing. Stefano Napolitano, geom. Italo Ricci.

Responsabile del procedimento

arch. Giovanni Lanzuise

Il Dirigente

arch. Massimo Santoro

Relazione e calcolo delle pavimentazioni stradali

ER PAV 01

emissione luglio 2015

revisione aprile 2018

1	<i>Premessa</i>	1
2	<i>Normativa di riferimento</i>	4
3	<i>Modello meccanico</i>	5
4	<i>Dimensionamento della pavimentazione</i>	6
4.1	<i>Analisi dei carichi</i>	6
4.2	<i>Dimensionamento strutturale</i>	8
4.3	<i>Valutazione dell'andamento delle temperature nella pavimentazione</i>	9
4.4	<i>Sollecitazioni indotte dai carichi</i>	12
4.5	<i>Soll.ni prodotte dal peso proprio in presenza di curvature di origine termica</i>	14
4.6	<i>Soll.ni dovute ai carichi in presenza di curvature di origine termiche</i>	15
5	<i>Verifiche strutturali</i>	17
5.1	<i>Limitazione delle tensioni di esercizio</i>	17
5.2	<i>Dimensionamento armatura necessaria al controllo dell'apertura delle fessure</i>	17
5.3	<i>Verifica a punzonamento</i>	18
5.4	<i>Verifica del distanziamento e del diametro delle barre di compartecipazione</i>	19

1. PREMESSA

Nella presente relazione sono sviluppate le considerazioni di carattere strutturale relativamente alle opere previste previsti da quanto stabilito dall'Amministrazione comunale di Napoli nei provvedimenti relativi alla mobilità del lungomare adottati nel corso del 2012 e del 2013. Provvedimenti che attualmente prevedono un uso prevalentemente pedonale e ciclabile del tratto di via Partenope - via Nazario Sauro, con particolare attenzione all'area pedonale che va da piazza Vittoria a via Lucilio.

In linea generale, il progetto prevede:

- la regolarizzazione della carreggiata stradale e la definizione della pista ciclabile;
- l'ampliamento del marciapiede lato edifici al fine di aumentare lo spazio pubblico e di regolamentare quello destinato alle occupazioni da parte di bar e ristoranti;
- la sostituzione della pavimentazione attuale in asfalto con una di pietra lavica
- l'eliminazione delle barriere architettoniche;
- la rifunzionalizzazione del sistema di raccolta delle acque di piattaforma e degli impianti fognari;
- l'adeguamento dell'impianto di pubblica illuminazione attraverso sistemi sostenibili e di risparmio energetico.

Si prevedono, in particolare, le seguenti categorie di lavoro:

- a) Disfacimento della pavimentazione stradale esistente con i relativi marciapiede;
- b) Scavo a sezione obbligata alle quote previste con previo ulteriore scavo di 10 cm di profondità per bonifica del piano di posa del cassonetto stradale;
- c) Realizzazione delle opere di smaltimento delle acque di piattaforma;
- d) Realizzazione per la sede viaria dello strato di bonifica del sottofondo stradale e successivo riempimento con misto granulare stabilizzato (tout venant) per la realizzazione della fondazione stradale, pari a 35 cm;
- e) Realizzazione dello strato di base della pavimentazione stradale con cls Rbk 28/35 dello spessore di 20 cm e doppiamente armata con $\varnothing 12/20$ nelle due direzioni; per i marciapiedi invece cls di spessore pari a 15 cm Rbk 28/35 semplicemente armata con rete elettrosaldata $\varnothing 8$ 20x20, impostando così i massetti delle due tipologie di pavimentazione con le pendenze trasversali previste per lo smaltimento delle acque di superficie. La piastra di cls sarà realizzata con dimensioni, in pianta, pari a 9.50x9.50 metri e tra ogni piastra contigua si realizzerà un giunto di contrazione di 0.5 cm. Per

garantire la continuità strutturale ed il trasferimento degli sforzi s'inseriranno delle barre di armatura, lunghezza di 1 metro, del diametro $\varnothing 24$ interdistanziate di 25 cm colleganti le due piastre contigue e posizionate a metà dell'altezza (in sezione) ovvero a 10 cm dal bordo inferiore o superiore;

- f) messa in opera della pavimentazione in pietra lavica, di dimensioni così come di seguito specificati, su strato di allettamento di malta cementizia (impasto di sabbia, acqua e cemento pari a 250 kg/mc) dello spessore pari a 4 cm.
- g) Piano viario in pietra lavica, 8 cm per la carrabilità e 6 cm per la pedonabilità.

Le verifiche sono state effettuate con riferimento alle Raccomandazioni ed alle Normative vigenti riportate di seguito

2. *NORMATIVA DI RIFERIMENTO*

Le verifiche statiche e la redazione della presente relazione sono state eseguite seguendo le prescrizioni delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, i cui riferimenti sono di seguito riportati:

- D.M. 14 Gennaio 2008 Norme tecniche per le costruzioni;
- Circolare 2 febbraio 2009, n° 617 Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni".

Inoltre sono state consultate altre normative e raccomandazioni:

- Eurocodice 2 Progettazione delle strutture di calcestruzzo
- Norme UNI 11146 Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo dei pavimenti di calcestruzzo ad uso industriale.
- Decreto Ministero LL.PP. del 9 gennaio 1996 Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche;
- Circolare Ministero LL.PP. n. 252 AA.GG./S.T.C. del 15 ottobre 1996 Istruzioni relative alle "Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in c.a. normale e precompresso e per le strutture metalliche" di cui al D.M. del 9 Gennaio 1996;

3. MODELLO MECCANICO

Il calcestruzzo per uso strutturale previsto è di classe C28/35 XC2

Classe di resistenza minima N/mm ²	R _{ck} N/mm ²	f _{ck} N/mm ²	f _{cm} N/mm ²	f _{cd} N/mm ²	f _{ctm} N/mm ²	E _{cm} N/mm ²
C28/35	35	28	36	15,87	2,77	3208

Classe di resistenza minima N/mm ²	Classe di esposizione	Rapporto A/C	Copriferro netto minimo (mm)	Diametro max inerti (mm)	Classe di lavorabilità
C28/35	XC2	0,55	40	32	S4

L'acciaio per cemento armato è del tipo B450C.

Tensione caratteristica allo snervamento f _{yk} N/mm ²	Tensione caratteristica allo snervamento f _{tk} N/mm ²	rapporto caratteristico f _t /f _y	Allungamento caratteristico A _{gtk} %
> 450	> 540	> 1,15	> 7,5

4. DIMENSIONAMENTO DELLA PAVIMENTAZIONE

La procedura di calcolo adottata è riferita all'esposizione del Westergaard, che considera la sovrastruttura rigida come una piastra poggiate su un suolo elastico con reazione alla Winkler e imponendo la ongruenza degli spostamenti verticali nei punti di contatto tra struttura e terreno.

4.1 ANALISI DEI CARICHI:

I dati progettuali inerenti i carichi da traffico in transito sulla pavimentazione intesi come l'entità dei carichi trasmessi dalle ruote dei veicoli, il tipo ed il numero di assi di cui essi sono dotati nonché il numero di ripetizioni sono desumibili dal Catalogo Italiano delle Pavimentazioni Stradali (CNR, 1995).

Secondo tale normativa, lo spettro veicolare utile al dimensionamento delle pavimentazioni stradali è costituito solo da veicoli commerciali (massa a pieno carico superiore a 3 t), poiché lo stato tenso-deformativo indotto dai veicoli leggeri può essere assunto al di sotto della soglia di fatica. Le caratteristiche in termini di assi e distribuzione della massa a pieno carico delle sedici tipologie di veicoli pesanti considerati nel Catalogo sono illustrate nelle successive Tabelle.

In funzione del tipo di strada, si assume una diversa composizione degli spettri di traffico in termini di frequenza di passaggi delle tipologie veicolari individuate (ultima Tabella).

Il nostro caso è una strada del tipo F – urbana di scorrimento.

N°	Classe veicolo		Tipo assi	Carico per asse [kN]										
	Tipo veicolo	Assi totali N°		Carico per asse			Asse anteriore interasse ruote [m]			interasse gemellate [m]				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Autocarro leggero	2	S	10			1.50							
2	Autocarro leggero	2	S	15			1.50							
3	Autocarro medio o pesante	2	S	40			2.10							
4	Autocarro medio o pesante	2	S	50			2.10							
5	Autocarro pesante	3	S	40			2.10							
6	Autocarro pesante	3	S	60			2.10							
7	Autotreni ed autoarticolati	4	S + S	40	90		2.10	2.16				0.40		
8	Autotreni ed autoarticolati	4	S + S	60	100		2.10	2.16				0.40		
9	Autotreni ed autoarticolati	5	S + T2	40	80	80	2.10	2.16	2.16			0.40	0.40	
10	Autotreni ed autoarticolati	5	S + T2	60	90	90	2.10	2.16	2.16			0.40	0.40	
11	Autotreni ed autoarticolati	5	S + S	40	100		2.10	2.16				0.40		
12	Autotreni ed autoarticolati	5	S + S	60	110		2.10	2.16				0.40		
13	Mezzi d'opera	5	S + S	50	120		2.16	2.16			0.40	0.40		
14	Autobus	2	S	40			2.10							
15	Autobus	2	S	60			2.10							
16	Autobus	2	S	50			2.10							

I caratteri in rosso si riferiscono ad assi gemellati, nella colonna "Tipo assi"; "S", è un asse singolo, "T2", un asse tandem, "T3" un asse tridem.

N°	Classe veicolo		Assi totali	Tipo assi	Carico per asse [kN]			Asse posteriore			interasse gemellate [m]		
	Tipo veicolo				interasse ruote [m]			interasse gemellate [m]					
			N°				1	2	3	1	2	3	
1	Autocarro leggero		2	S	20			1.80			0.30		
2	Autocarro leggero		2	S	30			1.80			0.30		
3	Autocarro medio o pesante		2	S	80			2.16			0.40		
4	Autocarro medio o pesante		2	S	110			2.16			0.40		
5	Autocarro pesante		3	T2	80	80		2.16	2.16		0.40	0.40	
6	Autocarro pesante		3	T2	100	100		2.16	2.16		0.40	0.40	
7	Autotreni ed autoarticolati		4	S + S	80	80		2.16	2.16		0.40	0.40	
8	Autotreni ed autoarticolati		4	S + S	100	100		2.16	2.16		0.40	0.40	
9	Autotreni ed autoarticolati		5	T2	80	80		2.16	2.16		0.40	0.40	
10	Autotreni ed autoarticolati		5	T2	100	100		2.16	2.16		0.40	0.40	
11	Autotreni ed autoarticolati		5	T3	80	80	80	2.10	2.10	2.10			
12	Autotreni ed autoarticolati		5	T3	90	90	90	2.10	2.10	2.10			
13	Mezzi d'opera		5	T3	130	130	130	2.16	2.16	2.16	0.40	0.40	0.40
14	Autobus		2	S	80			2.16					
15	Autobus		2	S	100			2.16					
16	Autobus		2	S	80			2.16			0.40		

I caratteri in rosso si riferiscono ad assi gemellati, nella colonna "Tipo assi", "S", è un asse singolo, "T2", un asse tandem, "T3" un asse tridem.

Spettri di traffico		Tipo veicolo																
		N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		Autocarro leggero	Autocarro leggero	Autocarro medio o pesante	Autocarro medio o pesante	Autocarro pesante	Autocarro pesante	Autotreni ed autoarticolati	Mezzi d'opera	Autobus	Autobus	Autobus						
autostrade extraurbane	A	12.2	0	24.4	14.6	2.4	12.2	2.4	4.9	2.4	4.9	2.4	4.9	0.1	0	0	12.2	
autostrade urbane	B	18.2	18.2	16.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6	18.2	27.3	0	
strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico	C	0	13.1	39.5	10.5	7.9	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.6	0.5	0	0	10.5	
strade extraurbane secondarie ordinarie	D	0	0	58.8	29.4	0	5.9	0	2.8	0	0	0	0	0.2	0	0	2.9	
strade extraurbane secondarie turistiche	E	24.5	0	40.8	16.3	0	4.15	0	2	0	0	0	0	0.05	0	0	12.2	
strade urbane di scorrimento	F	18.2	18.2	16.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6	18.2	27.3	0	
strade urbane di quartiere e locali	G	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	
corsie preferenziali	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	53	0	

Il traffico per cui sono verificate pavimentazioni del Catalogo è espresso dal numero complessivo di passaggi di veicoli commerciali, distribuiti secondo lo spettro associato al tipo di strada oggetto del dimensionamento e transiti sulla corsia di marcia più sollecitata. Sono previsti 6 livelli di traffico, non tutti compatibili con tutte le tipologie di strade esaminate, come illustrato nella successiva Tabella.

Numero di passaggi di veicoli commerciali previsti dal Catalogo per i tipi di strada						
	400000	1500000	4000000	10000000	25000000	45000000
autostrade extraurbane				X	X	X
autostrade urbane			X	X	X	
strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico		X	X	X	X	
strade extraurbane secondarie ordinarie	X	X	X	X		
strade extraurbane secondarie turistiche	X	X	X			
strade urbane di scorrimento		X	X	X	X	
strade urbane di quartiere e locali	X	X	X			
corsie preferenziali	X	X	X	X		

Le caratteristiche dei carichi trasmessi dai veicoli, ovvero la pressione di gonfiaggio delle ruote e le caratteristiche geometriche dell'impronta reale supposta circolare (dimensione del raggio R) o quadrata (dimensione del lato L) sono riportate, infine, di seguito:

N°	Classe Veicolo Tipo veicolo	pressione gonfiaggio [MPa]					L [mm]					R [mm]				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Autocarro leggero	0.200		0.300			158.11		182.57			89.21		103.01		
2	Autocarro leggero	0.250		0.350			173.21		207.02			97.72		116.80		
3	Autocarro medio o pesante	0.650		0.650			175.41		248.07			98.97		139.96		
4	Autocarro medio o pesante	0.775		0.800			179.61		262.20			101.33		147.93	0.00	
5	Autocarro pesante	0.650		0.650	0.650		175.41		248.07	248.07		98.97		139.96	139.96	
6	Autocarro pesante	0.800		0.775	0.775		193.65		254.00	254.00		109.25		143.30	143.30	
7	Autotreni ed autoarticolati	0.650	0.725	0.650	0.650		175.41	249.14	248.07	248.07		98.97	140.56	139.96	139.96	
8	Autotreni ed autoarticolati	0.800	0.775	0.775	0.775		193.65	254.00	254.00	254.00		109.25	143.30	143.30	143.30	
9	Autotreni ed autoarticolati	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	175.41	248.07	248.07	248.07	248.07	98.97	139.96	139.96	139.96	139.96
10	Autotreni ed autoarticolati	0.800	0.725	0.725	0.775	0.775	193.65	249.14	249.14	254.00	254.00	109.25	140.56	140.56	143.30	143.30
11	Autotreni ed autoarticolati	0.650	0.775	0.650	0.650	0.650	175.41	254.00	248.07	248.07	248.07	98.97	143.30	139.96	139.96	139.96
12	Autotreni ed autoarticolati	0.800	0.800	0.725	0.725	0.725	193.65	262.20	249.14	249.14	249.14	109.25	147.93	140.56	140.56	140.56
13	Mezzi d'opera	0.625	0.800	0.800	0.800	0.800	200.00	273.86	285.04	285.04	285.04	112.84	154.51	160.82	160.82	160.82
14	Autobus	0.650		0.650			175.41		248.07			98.97		139.96		
15	Autobus	0.800		0.775			193.65		254.00			109.25		143.30		
16	Autobus	0.775		0.650			179.61		248.07			101.33		139.96		

4.2 DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE

La pavimentazione in calcestruzzo si presenta, dal punto di vista geometrico, come un insieme di lastre appoggiate su un semispazio stratificato. Le numerose discontinuità, giunti o lesioni che separano le lastre, sono dimensionate per resistere alla ripetizione di carichi in esercizio e alle sollecitazioni termo-igrometriche e dotate di capacità di trasferimento dei carichi diverse e variabili nel tempo (Rossetti, V. A. e Ferraro, A., 2011).

Sia attraverso metodi razionali, utili nella valutazione delle sollecitazioni meccaniche, sia attraverso metodi empirici, consolidati negli anni attraverso l'analisi di sovrastrutture in esercizio, sono utilizzati per il dimensionamento di una pavimentazione in calcestruzzo.

Noi ci riferiremo ad una pavimentazione del tipo armata (JRCP, Jointed Reinforced Concrete Pavement), a pianta quadrata o rettangolare, con dimensione massima dei lati pari a circa 15 m;

Le azioni esterne principali sono dovute ai carichi di traffico ed alle condizioni climatiche, queste ultime possono introdurre nel problema strutturale condizioni di non linearità cinematica dovute principalmente alla variazione delle condizioni di vincolo durante le fasi di carico.

A tutto ciò si aggiunge la complessa risposta meccanica, spesso non lineare, dei materiali impiegati nella sovrastruttura, anche se, per quanto riguarda il calcestruzzo delle lastre, l'ipotesi di elasticità lineare è sufficientemente approssimata alla realtà, anche in relazione alla rapidità con cui vengono applicati i carichi di traffico. Numerosi sono i modelli proposti per schematizzare la pavimentazione in calcestruzzo vera e propria, il semispazio su cui essa poggia e infine il sistema complesso lastre-piano di appoggio.

Nella quasi generalità dei casi essi presuppongono alcune sostanziali ipotesi semplificatrici:

- la validità del principio della sovrapposizione degli effetti, secondo il quale le sollecitazioni prodotte dal traffico e quelle termiche si possono sommare algebricamente;
- almeno una delle dimensioni delle lastre sia tale da estendersi fino a distanza considerevole dalla zona caricata (lastre indefinite nel piano, semidefinite o infinitamente larghe);
- a seguito di deformazione, le sezioni piane ortogonali al piano mediano originario della lastra si mantengono piane e perpendicolari alla deformata elastica;
- lo spessore della lastra è piccolo in confronto allo sviluppo alle dimensioni ad esso normali.

4.3 VALUTAZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NELLA PAVIMENTAZIONE

Le condizioni climatiche influenzano il regime di sollecitazione che si verifica nelle pavimentazioni:

- modificando la portanza del sottofondo attraverso le precipitazioni meteoriche ed i cicli di gelo e disgelo;
- influenzando le caratteristiche meccaniche dei materiali per effetto delle temperature che s'instaurano nei vari strati;
- inducendo distorsioni termiche, ergo sollecitazioni.

Per valutare l'andamento della temperatura all'interno degli strati della pavimentazione faremo riferimento alla formula proposta da Barber:

$$T_{pav}(z,t) = T_{ag} + R + \left(\frac{A_g}{2} + 3 \cdot R \right) \cdot F \cdot e^{-Cz} \cdot sen \left[0.262 \cdot t - C \cdot z - \arctan \left(\frac{C}{H + C} \right) \right]$$

dove:

$T_{pav}(z,t)$ è la temperatura della pavimentazione alla profondità z ed al tempo t ;

T_{ag} è la temperatura media mensile dell'aria;

A_g è l'escursione media giornaliera della temperatura dell'aria;

z è la profondità del punto

$R = \frac{2}{3} \cdot \frac{b \cdot I}{24 \cdot h_c}$ è il contributo della radiazione solare alla temperatura effettiva dell'aria;

I è la radiazione media giornaliera;

$$C = \sqrt{\frac{0.131 \cdot s \cdot w}{k}} \quad F = \frac{H}{[(H + C)^2 + C^2]^{0.5}} \quad H = \frac{h_c}{k}$$

b è il grado di assorbimento della superficie;

s è il calore specifico;

k la conduttività termica

w la massa volumetrica apparente

Di seguito si riportano i valori medi indicativi delle grandezze climatiche per il territorio italiano:

	Italia settentrionale				Italia centrale				Italia meridionale ed insulare				Intervallo di tempo medio tra l'alba e lo zenit [ore, min.]
	Temperatura media Stagionale [°C]	Escursione media giornaliera [°C]	Radiazione solare totale giornaliera [kcal/gg m ²]	Velocità media del vento [km/h]	Temperatura media Stagionale [°C]	Escursione media giornaliera [°C]	Radiazione solare totale giornaliera [kcal/gg m ²]	Velocità media del vento [km/h]	Temperatura media Stagionale [°C]	Escursione media giornaliera [°C]	Radiazione solare totale giornaliera [kcal/gg m ²]	Velocità media del vento [km/h]	
Inverno	2 ÷ 4 (18.95%)	6 ÷ 8 (18.20%)	1996	9 ÷ 21	3 ÷ 5 (12.95%)	5 ÷ 7 (15.15%)	2718	13 ÷ 18	9 ÷ 11 (15.10%)	6 ÷ 8 (18.47%)	3223	16 ÷ 24	4h 50m
Primavera	12 ÷ 14 (20.53%)	9 ÷ 11 (20.38%)	5425	9 ÷ 17	11 ÷ 13 (17.65%)	8 ÷ 10 (20.71%)	5785	12 ÷ 19	14 ÷ 16 (19.77%)	9 ÷ 11 (19.22%)	6120	15 ÷ 22	6h 35m
Estate	22 ÷ 24 (16.36%)	10 ÷ 12 (18.27%)	6337	8 ÷ 13	22 ÷ 24 (17.69%)	10 ÷ 12 (18.41%)	6507	9 ÷ 15	24 ÷ 26 (22.26%)	10 ÷ 12 (15.18%)	6739	12 ÷ 20	7h 19m
Autunno	13 ÷ 15 (16.39%)	7 ÷ 9 (16.23%)	3380	8 ÷ 18	13 ÷ 15 (20.66%)	7 ÷ 9 (19.83%)	3547	11 ÷ 17	18 ÷ 20 (17.08%)	8 ÷ 10 (14.95%)	4097	12 ÷ 21	5h 32m

N.B. I dati tra le parentesi indicano la percentuale di rappresentatività.

I risultati dell'elaborazione per la nostra pavimentazione sono indicati di seguito:

SOLLECITAZIONI PRODOTTE DA VARIAZIONI TERMICHE				
	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO
T _{ag} temperatura media dell'aria (°C)	10	15	25	19
A _g escursione media giornaliera (°C)	7	10	11	9
I radiazione media giornaliera (kcal/mq gg)	3223	6120	6739	4097
v velocità del vento (km/h)	20	18	16	17
H	19,37	18,26	17,11	17,69
hc	26,35	24,83	23,27	24,05
F	0,77	0,76	0,75	0,75
R	2,04	4,11	4,83	2,84
t	17400	23700	26340	19920
b grado di assorbimento	0,6			
K conduttività termica	1,36			
s calore specifico	0,156			
w massa apparente	1800			
C	5,20			
arctan (C/C+H)	4,65	4,44	4,21	4,32

INVERNO	z (m)	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
	T _{pav} (z,t)	5,23	5,77	6,38	7,02	7,66	8,28	8,87
PRIMAVERA	z (m)	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
	T _{pav} (z,t)	14,99	16,94	18,52	19,75	20,68	21,35	21,80
ESTATE	z (m)	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
	T _{pav} (z,t)	16,72	19,22	21,47	23,45	25,17	26,63	27,85
AUTUNNO	z (m)	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
	T _{pav} (z,t)	18,68	18,03	17,64	17,47	17,46	17,59	17,81

La sollecitazione di tensoflessione, che si verifica nella sezione trasversale della piastra posta ad eguale distanza dai due giunti di *ritiro* / *contrazione*, produce al lembo inferiore tensioni di trazione, dovute alle variazioni di volume (indotte dal ΔT termico) e all'attrito con il piano di posa, pari a:

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{L}{2} \cdot f_m \cdot (\gamma_c \cdot h + \gamma_f \cdot A_f) \cdot \left(\frac{1}{h + \frac{E_f}{E_c}} + \frac{3}{h} \right)$$

dove $\sigma_{\Delta T}$ è la tensione di trazione che si verifica nel j-esimo periodo temporale nella sezione di mezzeria al lembo inferiore della piastra per effetto delle variazioni termiche uniformi e dell'attrito tra piastra e piano di posa

L distanza tra due giunti di costruzione (cm)	1000
γ_f peso specifico acciaio (daN/cm ³)	0,00785
h spessore della piastra (cm)	20
Af area armatura presente (cm ² /cm)	0,252
Ef modulo elastico acciaio (daN/cm ²)	2100000
Ec modulo elastico calcestruzzo (daN/cm ²)	337220
γ_c peso specifico calcestruzzo (daN/cm ³)	0,0025
s = 16933/Dt max (cm)	1520,35
f _m coefficiente medio di attrito	0,61

$\sigma_{\Delta T}$ (N/mm ²)	0,30
--	------

4.4 SOLLECITAZIONI PRODOTTE DAI VEICOLI

Le sollecitazioni prodotte sulla piastra dai veicoli dipendono dalla posizione in cui insistono i carichi prodotti dai passaggi degli assi, nei diversi punti della piastra: bordo, centro piastra, etc. Le sollecitazioni dovute ai carichi si sommano a quelle dovute ai gradienti termici; in presenza di gradienti termici positivi il solo peso proprio produce le massime sollecitazioni al centro della piastra (tensioni di trazione al lembo inferiore), mentre con gradienti termici negativi le massime si verificano ai bordi in prossimità degli spigoli (tensioni di trazione al lembo superiore).

Le massime sollecitazioni, dovute agli effetti combinati del peso proprio in presenza di curvature di origine termica, e dovute ai carichi trasmessi dai veicoli, si possono verificare non solo al centro della piastra, ma anche altrove.

Il calcolo delle sollecitazioni dovute ai carichi (veicoli e peso proprio) è stato condotto valutando le massime tensioni prodotte separatamente, dal carico di una ruota (gemellata) e dall'azione congiunta del peso proprio e delle curvature di origine termica (solo per le curvature dovute ai gradienti termici positivi).

Si riportano di seguito le espressioni proposte da *Westergaard* per calcolare la massima sollecitazione prodotta da un carico agente su un'area circolare o semi-circolare, posto rispettivamente al centro e al bordo della piastra.

$$\sigma_{c-westergaard} = 0.275 \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{P}{h^2} \left[4 \cdot \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 1.069 \right]$$

$$\sigma_{b-westergaard} = 0.529 \cdot (1 + 0.54 \cdot \nu) \cdot \frac{P}{h^2} \left[4 \cdot \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 0.359 \right]$$

$$\sigma_{a-westergaard} = \frac{3 \cdot P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a \cdot \sqrt{2l}}{l} \right)^{0.6} \right]$$

$\sigma_{c-westergaard}$ è la massima tensione di trazione sulla faccia inferiore della lastra, direttamente sotto il carico applicato al centro e cioè ad una considerevole distanza dai bordi;

$\sigma_{b-westergaard}$ è la massima tensione di trazione sulla faccia inferiore della lastra agente in direzione parallela al bordo, direttamente sotto il carico applicato al bordo a metà del lato;

$\sigma_{a-westergaard}$ è la massima tensione di trazione sulla faccia inferiore della lastra agente in direzione parallela alla bisettrice dell'angolo, sotto il carico applicato all'angolo;

per il significato degli altri elementi costituenti le formulazioni del Westergaard si rimanda alla letteratura tecnica.

Di seguito si allegano lo sviluppo delle formulazioni per la ricerca del massimo valore di tensione nel nostro caso.

STRADE URBANE DI SCORRIMENTO												
TIPO DI VEICOLO	ASSI TOTALI	TIPO DI ASSI	CARICO PER ASSE (kN)					SPETTRO DI TRAFFICO	R (mm)		A (cm ²)	
			1	2	3	4	5		sgonfio	gonfio	sgonfio	gonfio
Autocarro leggero	2	S	10	20	0	0	0	18,2	89,21	103,01	249,89	333,19
Autocarro leggero	2	S	15	30	0	0	0	18,2	98,97	116,80	307,56	428,37
Autocarro medio o pesante	2	S	40	80	0	0	0	16,5	101,33	147,33	322,41	681,57
Mezzi d'opera	5	S + S + T3	50	120	130	130	130	1,6	112,84	160,82	399,81	812,10
Autobus	2	S	40	80	0	0	0	18,2	98,97	139,96	307,56	615,09
Autobus	2	S	60	100	0	0	0	27,3	109,25	143,30	374,78	644,80

SOLLECITAZIONI PRODOTTE DAI VEICOLI								
spessore piastra (mm)	200	Rck (N mm ⁻²)	35	FS	1,2			
K coefficiente di sottofondo (Mpa/m)	60	f _{ck} (N mm ⁻²)	29,05	f _{cfm-1} (N mm ⁻²)	2,83			
v coefficiente poisson cls	0,15	f _{ctm} (N mm ⁻²)	2,83					
E cls (N/mm ²)	32308	f _{cfm} (N mm ⁻²)	3,40					
l raggio di rigidità relativo (mm)	778,46							
	b raggio fittizio		σ _{p-centro} (N mm ⁻²) ASSE 1		σ _{p-centro} (N mm ⁻²) ASSE 2		σ _{p-centro} (N mm ⁻²) ASSE 3	
	sgonfio	gonfio	sgonfio	gonfio	sgonfio	gonfio	sgonfio	gonfio
Autocarro leggero	94,64	103,70	0,19	0,18	0,37	0,36	0,00	0,00
Autocarro leggero	100,95	113,65	0,27	0,26	0,55	0,52	0,00	0,00
Autocarro medio o pesante	102,55	138,37	0,73	0,64	1,45	1,29	0,00	0,00
Mezzi d'opera	110,71	150,27	0,88	0,78	2,11	1,86	2,29	2,02
Autobus	100,95	132,10	0,73	0,66	1,46	1,31	0,00	0,00
Autobus	108,10	134,92	1,07	0,98	1,78	1,63	0,00	0,00
			σ _{p-bordo} (N mm ⁻²) ASSE 1		σ _{p-bordo} (N mm ⁻²) ASSE 2		σ _{p-bordo} (N mm ⁻²) ASSE 3	
Autocarro leggero			0,14	0,14	0,29	0,28	0,00	0,00
Autocarro leggero			0,21	0,20	0,42	0,40	0,00	0,00
Autocarro medio o pesante			0,55	0,48	1,11	0,96	0,00	0,00
Mezzi d'opera			0,67	0,57	1,61	1,38	1,74	1,49
Autobus			0,56	0,49	1,12	0,98	0,00	0,00
Autobus			0,81	0,73	1,35	1,22	0,00	0,00
			σ _{p-spigolo} (N mm ⁻²) ASSE 1		σ _{p-spigolo} (N mm ⁻²) ASSE 2		σ _{p-spigolo} (N mm ⁻²) ASSE 3	
Autocarro leggero			0,24	0,24	0,49	0,47	0,00	0,00
Autocarro leggero			0,36	0,34	0,72	0,69	0,00	0,00
Autocarro medio o pesante			0,95	0,84	1,91	1,69	0,00	0,00
Mezzi d'opera			1,16	1,01	2,78	2,44	3,01	2,64
Autobus			0,96	0,86	1,92	1,73	0,00	0,00
Autobus			1,40	1,28	2,34	2,14	0,00	0,00

4.5 SOLLECITAZIONI PRODOTTE DAL PESO PROPRIO IN PRESENZA DELLE CURVATURE DI ORIGINE TERMICA

Le variazioni giornaliere di temperatura sono spesso causa dell'ingobbamento della piastra. Durante il giorno, per effetto dell'irraggiamento solare, la superficie inferiore della sovrastruttura si trova ad una temperatura minore rispetto a quella del piano medio, mentre il contrario si verifica per la superficie superiore; la piastra tende quindi a incurvarsi con

concavità verso l'alto. Durante la notte, poiché il raffreddamento della superficie superiore avviene più rapidamente, l'ingobbamento si manifesta con convessità verso il basso.

Il peso proprio, l'attrito con la fondazione e con i bordi delle piastre adiacenti o il collegamento fra queste, nel caso di giunti armati o non completamente tagliati, si oppongono a tali variazioni di curvatura, per cui si destano sollecitazioni di trazione nel calcestruzzo.

L'espressione proposta da Bradbury per calcolare la massima sollecitazione prodotta dall'azione del peso proprio, in presenza delle curvature di origine termica, è la seguente:

$$\sigma_{\delta T} = C \frac{E \cdot \alpha \cdot \delta T}{2}$$

$\sigma_{\delta T}$ massima tensione di trazione al lembo inferiore della piastra

SOLLECITAZIONI PRODOTTE DAL PESO PROPRIO IN PRESENZA DELLE CURVATURE DI ORIGINE TERMICA					
E modulo elastico cls (MN/mq)	33,722	<table border="1"> <tr> <td>$\sigma_{\delta T}$ (N/mm²)</td> <td>1,50</td> </tr> </table>		$\sigma_{\delta T}$ (N/mm ²)	1,50
$\sigma_{\delta T}$ (N/mm ²)	1,50				
L dimensione della piastra (m)	10				
α coeff dilat termica cls (°C-1)	0,00001				
δT max	11,14				
C	0,8				

4.6 SOLLECITAZIONI DOVUTE AI CARICHI IN PRESENZA DELLE CURVATURE DI ORIGINE TERMICA

Le massime sollecitazioni dovute ai carichi sono state ottenute sommando quelle al centro, al bordo e al lembo superiore o inferiore:

$\sigma_{\delta Tj}$	N/mm ²	Fibra
$\sigma_{L1j} = \sigma_{Pci} + \sigma_{\delta Tj}$	3,28	al centro della piastra e al lembo inferiore
$\sigma_{L2j} = \sigma_{Pbi} + \sigma_{\delta Tj}$	2,86	al bordo della piastra e a lembo inferiore
$\sigma_{L3j} = \sigma_{Psi} + \sigma_{\delta Tj}$	3,84	allo spigolo della piastra e a lembo inferiore

Bisogna verificare che nella piastra non si raggiungano, in condizioni particolarmente sfavorevoli (massimo gradiente termico, carichi eccezionali e posizione del carico nell'angolo o sull'estremità libera della piastra), tensioni superiori a quelle limite di rottura per flessione.

Nella pavimentazione di progetto, conformemente alla normativa vigente, è stato assunto come valore della resistenza media a trazione per flessione del calcestruzzo f_{cfm} :

$$f_{cfm} = 1.2 \times f_{ctm}$$

in relazione al numero di cicli di carico-scarico della pavimentazione è bene assumere la tensione di esercizio del calcestruzzo in relazione ad un fattore di sicurezza

Rck (N mm-2)	35	FS	1,2	
f_{ck} (N mm-2)	29,05	f_{cfm-1} (N mm-2)		2,83
f_{ctm} (N mm-2)	2,83			
f_{cfm} (N mm-2)	3,40			

Poiché le tensioni che si verificano nella piastra sono superiori a quella limite ammissibile di rottura per flessione, è stato necessario ricorrere all'utilizzo di armatura, pertanto si realizza una piastra caratterizzata dalla presenza di armatura continua con giunti di contrazione realizzati a formare una maglia quadrata di 9.50 m di lato. Le deformazioni termiche che provocano la fessurazione del calcestruzzo in corrispondenza dei giunti di contrazione, vengono assorbite da apposita armatura rimanendo in campo elastico, in tutte le combinazioni di carico, quindi al disotto delle tensioni ammissibili dell'acciaio.

5. VERIFICHE STRUTTURALI

5.1 LIMITAZIONE DELLE TENSIONI DI ESERCIZIO

Nell'ipotesi di cls resistente a trazione ed assenza di armatura, a partire dalla tensione maggiore, pari a 3.84 N/mm^2 , si ottiene il valore del momento flettente corrispondente pari a 12.8 kNm .

Applicando tale momento alla sezione armata, con doppia maglia $\varnothing 12/20$ superiormente ed inferiormente nelle due direzioni, ed che la sezione si possa fessurare, si è ricavato il valore della tensione nell'acciaio, che risulta pari a 157 N/mm^2 .

La verifica delle tensioni nell'acciaio è stata eseguita utilizzando il software Vcaslu del Prof Piero Gelfi e risulta verificata in quanto la tensione nell'acciaio teso risulta inferiore alla tensione ammissibile.

Verifica C.A. S.L.U. - File: verifica piastra

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	20

N°	As [cm²]	d [cm]
1	5,65	4
2	5,65	16

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni
S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 0 kN
M_{xEd} 13 12,8 kNm
M_{yEd} 0 0

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Materiali

B450C		C28/35	
ϵ_{su}	67,5 ‰	ϵ_{c2}	2 ‰
f_{yd}	391,3 N/mm ²	ϵ_{cu}	3,5 ‰
E_s	200.000 N/mm ²	f_{cd}	15,87
E_s/E_c	15	f_{cc}/f_{cd}	0,8
ϵ_{syd}	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	11
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm ²	τ_{co}	0,6667
		τ_{c1}	1,971

σ_c -3,923 N/mm²
 σ_s 156,6 N/mm²
 ϵ_s 0,7832 ‰
d 16 cm
x 4,369 w/d 0,2731
δ 0,7813

Verifica
N° iterazioni: 4
 Precompresso

5.2 DIMENSIONAMENTO DELL'ARMATURA METALLICA NECESSARIA AL CONTROLLO DELL'APERTURA DELLE FESSURE

Il dimensionamento dell'armatura metallica necessaria al controllo dell'apertura delle fessure è stato eseguito in accordo alle "Linee guida per la redazione di un capitolato prestazionale per pavimentazioni stradali in calcestruzzo", mentre la verifica è stata utilizzata la formula riportata nel "Manual of Concrete Practice" ACI Standard 360 "Design of Slabs on Grade". Tale formula, nota come "Equazione dello scorrimento", si basa sul calcolo delle sollecitazioni a trazione che si esplicano per effetto dell'attrito e che, in corrispondenza del giunto fessurato, vengono sopportate dalla sola armatura metallica. L'equazione parte dal presupposto che la forza di attrito che si esplica tra un corpo appoggiato su un piano orizzontale ed il piano stesso, è proporzionale al peso del corpo e all'attrito esplicito dalla superficie di contatto tra corpo e piano. Il coefficiente di proporzionalità è definito "coefficiente di attrito statico".

$$A_s = \frac{f_m \cdot L \cdot (\gamma_c \cdot h)}{2 \cdot \sigma_{fadm}}$$

DIMENSIONAMENTO ARMATURA METALLICA PER IL CONTROLLO DELL'APERTURA DELLE FESSURE					
fm coeff attrito statico pavimento sottofondo	1,65	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">A_s</td> <td style="text-align: center;">1,59</td> </tr> </table>		A_s	1,59
A_s	1,59				
L distanza fra due giunti successivi (m)	10				
γc peso specifico calcestruzzo (kg/mc)	2500				
h spessore della piastra (m)	0,2				
σf tensione ammissibile acciaio (kg/cmq)	2600				

Valore ben al di sotto dell'armatura già adottata per i carichi di cui al punto 5.1.

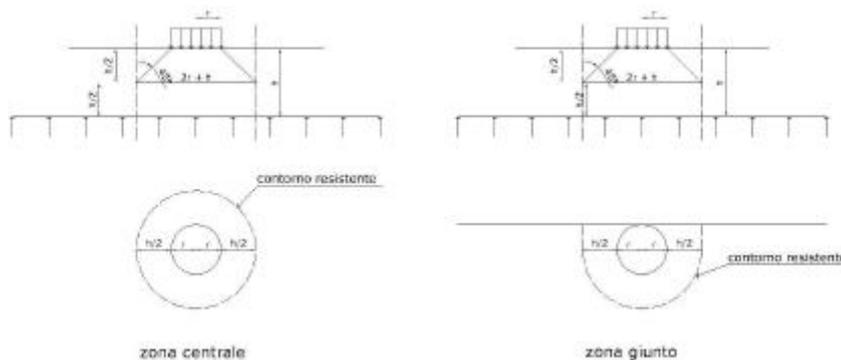
5.3 VERIFICA A PUNZONAMENTO

Di seguito si riportano i risultati dei calcoli di verifica a punzonamento della pavimentazione secondo quanto disposto dall' Eurocodice 2 (4.3.4.5.2), al fine di valutare la necessità di disporre localmente un'armatura aggiuntiva.

Sono state considerate due ipotesi di carico; la prima corrisponde a quella in cui il carico agente è situato nella zone centrale della piastra, la seconda quando il carico ricade nella zona perimetrale del giunto. Il carico considerato ai fini della presente verifica è quello corrispondente alla ruota del carico da mezzo d'opera, carico su semiasse costituita da ruote pari a 130 kN.

Tenendo conto che, il rischio di punzonamento è limitato alla zona critica immediatamente circostante la forza applicata e considerando un meccanismo di rottura (come schematizzato

nella figura seguente) con direzioni principali di trazione inclinate di 45° rispetto alla direzione della forza applicata, si ricava il perimetro critico per le due condizioni di carico:



VERIFICA A PUNZONAMENTO				
A superficie d'impronta (cmq)	812,1	<table border="1"> <tr> <td>V_{rd} (kg/cm)</td> <td>107,37</td> </tr> </table>	V_{rd} (kg/cm)	107,37
V_{rd} (kg/cm)	107,37			
r raggio d'impronta (cm)	16			
h spessore della piastra (cm)	20			
U_c perimetro critico nella zona centrale (cm)	163,28			
U_g perimetro critico nella zona del giunto (cm)	113,64			
P carico (kg)	6500			
V_c azione punzonante al centro (kg/cm)	39,81			
V_g azione punzonante al giunto (kg/cm)	57,20			
ρ_x percentuale geometrica di armatura	0,0044			
ρ_y percentuale geometrica di armatura	0,0044			
ρ_l percentuale geometrica di armatura bidir	0,0044			

La resistenza a punzonamento, nella zona centrale e di bordo, del solo cls (V_{Rd}) risulta abbondantemente superiore alle azioni punzonanti. Le verifiche risultano soddisfatte e non occorre ulteriore armatura a punzonamento.

5.4 VERIFICA DEL DISTANZIAMENTO E DEL DIAMETRO DELLE BARRE DI COMPARTICIPAZIONE

Nella pavimentazioni rigide è necessario verificare che il diametro d e il distanziamento δ delle barre di compartecipazione siano tali da scongiurare il pericolo di rottura nelle piastre in corrispondenza dei giunti di costruzione, dovuto all' elevate tensioni di contatto che si possono generare tra le barre e le piastre stesse, per effetto del passaggio dei carichi da una piastra a quella immediatamente adiacente. S'impone pertanto che la tensione massima, nelle piastre, in prossimità delle barre s_g sia inferiore ad una tensione limite ammissibile:

$$\sigma_g \leq \sigma_{g\text{-lim}}$$

$$\sigma_{g\text{-lim}} = \left(\frac{4 - \frac{d}{2.54}}{3} \right) \cdot R_C$$

Tensione limite ammissibile per lo stato tensionale indotto dall'interazione tra barre e piastre di calcestruzzo.

Avendo utilizzato barre $\varnothing 24$ ad interasse di 25 cm e cls Rck 35, per la determinazione della tensione σ_g è stata utilizzata la soluzione trovata da Timoshenko e Friberg, in cui si ipotizza che le barre si comporti come una trave su un supporto elastico (calcestruzzo della piastra) alla Winkler e in tal caso si ha:

$$\sigma_g = \frac{K_c \cdot P_b \cdot (2 + \beta \cdot S)}{4 \cdot \beta^3 \cdot E_b \cdot I_b}$$

VERIFICA DEL DISTANZIAMENTO DELLE BARRE DI COMPARTICIPAZIONE			
d diametro barra di compartecipazione (cm)	2,4		
Rc resistenza a rottura del cls	350		
$\sigma_{g\text{-lim}}$ tensione limite ammissibile	35,64		
Kc modulo di reazione del supporto delle barre (Mpa/m)	330000		
β rigidezza relativa della barra nel cls	27,72		
Ib momento d'inerzia della barra (m ⁴)	1,628E-08	σ_g (N/mm ²)	33,90
S apertura del giunto in corrispondenza delle barre (m)	0,005		
Eb modulo elastico barra (Mpa)	206000		
I raggio di rigidità piastra (m)	0,78		
Pt sforzo trasmesso attraverso il giunto (MN)	0,025		
δ distanza tra le barre di partecipazione (m)	0,25		
Pb sforzo di taglio trasmesso da una singola barra (MN)	0,014		

Pertanto la verifica risulta soddisfatta adottando delle barre di compartecipazione $\varnothing 24/25$ ed aventi lunghezza pari ad un metro.