

COMUNE DI CAPANNOLI

U.T.O.E. PER ATTIVITÀ PRODUTTIVE - "ZONA PRODUTTIVA" AMBITO UNITARIO DI PROGETTO – AUP 2.2



**Nota tecnica per la verifica della pavimentazione di progetto prevista
per le infrastrutture stradali interne all'area interessata dagli
interventi di lottizzazione/urbanizzazione**

COMMITTENTE

Studio associato di Architettura Aringhieri, Bini, Catarsi

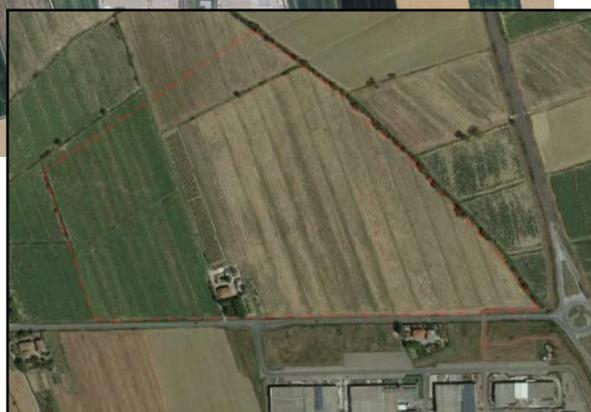


Ing. Armando Cofrancesco

Febbraio 2024

PREMESSA

Il sottoscritto Ing. Armando Cofrancesco è stato incaricato nel mese di Febbraio 2024 dallo Studio associato di architettura Aringhieri, Bini, Catarsi di verificare una soluzione progettuale per le pavimentazioni delle infrastrutture viarie da realizzare nell'ambito della lottizzazione della "U.T.O.E. per attività produttive - "Zona Produttiva" Ambito unitario di progetto – AUP 2.2" all'interno del Comune di Capannoli (PI).



La presente relazione descrive le procedure seguite per la modellazione e la verifica del pacchetto di pavimentazione proposto, nonché le caratteristiche dei materiali da porre in opera e le relative leggi di fatica, il tutto al fine di ottimizzare il dimensionamento della sovrastruttura in esame.

DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI REALIZZAZIONE DELLA PAVIMENTAZIONE

La pavimentazione stradale interna al lotto sarà realizzata secondo i due schemi stratigrafici descritti nel presente paragrafo. La scelta di ricorrere a due schemi differenti è legata alle differenti tipologie di mezzi transitanti nell'area: in particolare, le vie di accesso e di uscita dal lotto e le aree destinate al parcheggio e alla manovra dei mezzi pesanti (o comunque ad uso promiscuo) prevederanno un intervento più profondo, denominato "Soluzione A", mentre le aree parcheggio e la viabilità destinata esclusivamente al transito dei veicoli leggeri prevederà un pacchetto di spessore minore ("Soluzione B").

SOLUZIONE A

L'intervento in esame prevede:

- Strato di fondazione, di spessore complessivo pari a 60 cm, realizzato con materiale riciclato da demolizione di pezzatura 12/14 per uno spessore di 50 cm, e completato con uno strato di spessore pari a 10 cm di materiale riciclato da demolizione di pezzatura 7/8.
- Strato di Binder in Conglomerato bituminoso tradizionale per uno spessore di 10 cm.
- Strato di Usura in Conglomerato bituminoso tradizionale per uno spessore di 3 cm.

SOLUZIONE B

L'intervento in esame prevede:

- Strato di fondazione, di spessore complessivo pari a 40 cm, realizzato con materiale riciclato da demolizione di pezzatura 12/14 per uno spessore di 30 cm, e completato con uno strato di spessore pari a 10 cm di materiale riciclato da demolizione di pezzatura 7/8.
- Strato di Binder in Conglomerato bituminoso tradizionale per uno spessore di 7 cm.
- Strato di Usura in Conglomerato bituminoso tradizionale per uno spessore di 3 cm.



Figura 1 – Schema qualitativo di pavimentazione

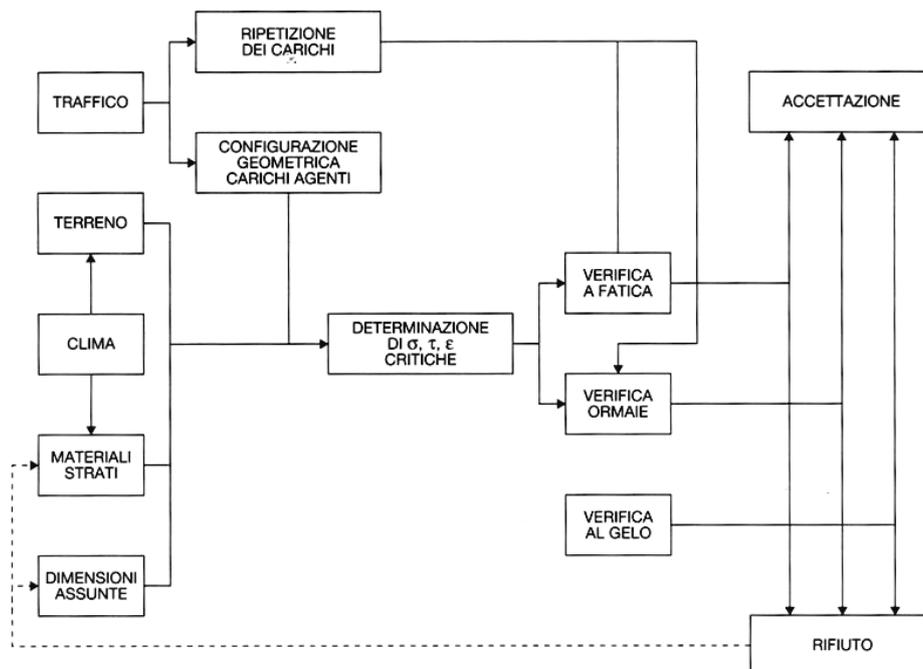
CRITERIO DI VERIFICA DEGLI INTERVENTI DI RIPRISTINO

Nel presente Capitolo viene descritto il metodo con cui è stata eseguita la verifica della soluzione progettuale, le ipotesi assunte in merito alle caratteristiche compositive e prestazionali dei materiali, le condizioni climatiche dell'area, l'entità del traffico di progetto e le leggi di fatica assunte per la verifica di durabilità.

Il metodo di progetto razionale

L'obiettivo dei metodi di dimensionamento delle pavimentazioni stradali consiste nel garantire adeguati livelli di durabilità alla sovrastruttura e al relativo sottofondo durante la sua "vita utile", ovvero per un periodo di tempo oltre il quale la degradazione da essa progressivamente subita per effetto del traffico e degli agenti atmosferici ne rende necessario il rifacimento. A tale scopo sono state proposte negli anni molteplici metodologie di progetto, tra cui quelle basate su un'analisi razionale dello stato tenso-deformativo indotto nella pavimentazione per effetto delle sollecitazioni indotte dai carichi di progetto.

Nel caso in esame la verifica dell'intervento di riqualifica descritto è stata eseguita sulla base del metodo di progetto razionale, di cui se ne riporta di seguito il diagramma di flusso. Tale metodologia di calcolo prevede la preliminare schematizzazione dell'insieme degli strati componenti la sovrastruttura in un multistrato elastico e la successiva determinazione dei valori delle tensioni e delle deformazioni indotte dai carichi nei vari strati. Tali valori di tensione e deformazione vengono successivamente confrontati con quelli che caratterizzano le resistenze dei materiali rispetto ai carichi ripetuti, consentendo di stimare il numero di ripetizioni di carico ammissibili attraverso l'utilizzo di opportune leggi di fatica.



La verifica delle soluzioni progettuali viene di norma eseguita sulla base della legge di accumulo lineare del danno proposta o legge di Miner che stabilisce quanto segue:

“siano $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$ k diversi livelli di tensione applicati rispettivamente per n_1, n_2, \dots, n_k cicli di carico senza nessun ordine particolare, si verifica la rottura per fatica quando

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

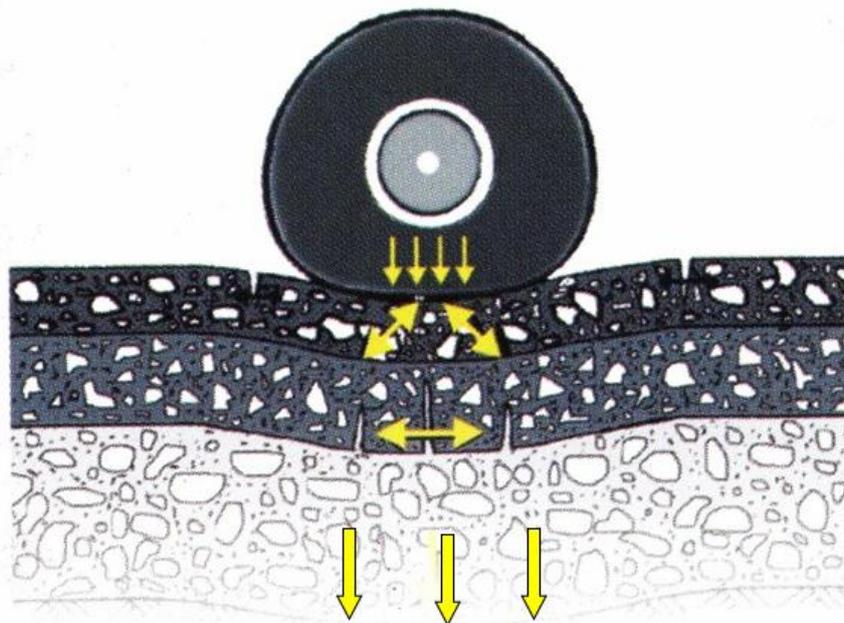
dove N_i è il numero di cicli di applicazione del carico che porterebbe a rottura il materiale qualora la tensione fosse sempre mantenuta uguale a σ_i (ripetizioni di carico massime ammissibili).”

Nel caso delle pavimentazioni stradali si assumono come carichi di progetto l'insieme degli assi che competono allo spettro di traffico scelto per l'infrastruttura in esame, pertanto, il danno cumulato per fatica viene determinato come somma del contributo fornito da ogni singolo asse, per ognuno dei periodi stagionali in cui viene suddiviso l'anno solare.

I criteri di verifica delle pavimentazioni

Il primo passo dell'analisi riguarda la determinazione dello stato tenso-deformativo indotto nella pavimentazione e nel sottofondo dai diversi carichi che compongono lo spettro di traffico. Per ciascun carico, le caratteristiche di sollecitazione da determinare e le relative posizioni all'interno della pavimentazione sono le seguenti:

- ϵ_t : massima deformazione orizzontale per trazione alla base degli strati in conglomerato bituminoso, correlata alla resistenza a fatica.
- ϵ_v : massima deformazione verticale di compressione in sommità del sottofondo o, più in generale degli strati non legati, correlata alla resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti (ormaiamento).



La vita utile residua, che rappresenta la riserva strutturale che la pavimentazione è in grado di esplicitare in termini di durabilità, viene successivamente determinata in base alle caratteristiche prestazionali dei materiali (numero di ripetizioni di carico ammissibili) e all'entità del traffico che si prevede interesserà l'infrastruttura.

Per la verifica della pavimentazione sono state utilizzate le seguenti relazioni $N-\epsilon$, attraverso le quali è possibile stimare il numero di ripetizioni di carico N che gli strati possono sopportare quando sottoposti ad una deformazione ϵ prima di giungere alla condizione ultima (fessurazione completa o deformazione eccessiva).

Legge di fatica dei conglomerati bituminosi

Per gli strati in conglomerato bituminoso il valore massimo della deformazione per trazione indotta dal passaggio dei veicoli risulta massima, e quindi più critica, alla base dello strato stesso. Il ripetersi nel tempo degli stati tenso-deformativi connessi ai diversi carichi di progetto produce l'innescio di fessurazioni (in questo caso di tipo "bottom-up") alla base dello strato, che successivamente migrano fino ad affiorare in superficie.

Nel caso in esame la durabilità dei conglomerati bituminosi è stata stimata mediante la legge di fatica proposta dall'Asphalt Institute, di cui si riporta di seguito l'espressione analitica. Tale formulazione identifica la rottura in corrispondenza di una percentuale di superficie fessurata pari a circa il 20%.

$$N = 0.0796 \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$$

dove:

- N_f : numero di ripetizioni di carico a rottura;
- ε_t : deformazione a trazione alla base del conglomerato bituminoso;
- E : modulo elastico del conglomerato bituminoso (espresso in psi).

Legge di fatica dello strato di sottofondo

Per la verifica a fatica del sottofondo è stata utilizzata la legge proposta dall'Austroroads (2010) di seguito riportata:

$$N = \left[\frac{9300}{\mu\varepsilon} \right]^7$$

dove:

- $\mu\varepsilon$: deformazione verticale massima sulla superficie dello strato non legato;
- N : numero di ripetizioni di carico (in milioni).

Moduli dei materiali costituenti la pavimentazione

I moduli di rigidezza dei materiali legati adottati per la soluzione di progetto proposta sono stati determinati a partire dalle informazioni reperibili nella letteratura di riferimento. Per quanto concerne il sottofondo il valore del modulo di rigidezza è stato assunto in funzione di quanto riportato nella Relazione Geologica di progetto. Il modulo dello strato di fondazione è stato ricavato in funzione del relativo spessore ed in base al valore del modulo di sottofondo secondo quanto indicato nella letteratura tecnica di settore.

SOLUZIONE A		
Strato	Spessore (cm)	Modulo (MPa)
Usura C.B. tradizionale	3	4000
Binder C.B. tradizionale	10	4500
Fondazione in materiale riciclato da demolizione	60	230
Sottofondo	-	60

SOLUZIONE B		
Strato	Spessore (cm)	Modulo (MPa)
Usura C.B. tradizionale	3	4000
Binder C.B. tradizionale	7	4500
Fondazione	40	180
Sottofondo	-	60

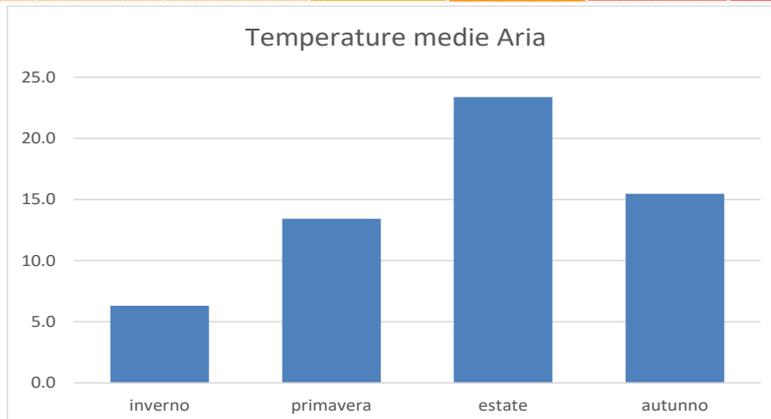
Condizioni climatiche

Tra le condizioni ambientali la temperatura influenza in modo determinante le caratteristiche di durabilità delle pavimentazioni: in particolare, ha effetti sui valori del modulo di rigidità del conglomerato e sul comportamento a fatica delle miscele, oltre ad avere un ruolo importante nel meccanismo di formazione delle ormaie.

Per tali ragioni, in fase di calcolo si è fatto riferimento a valori del modulo di rigidità corrispondenti a condizioni climatiche medie della zona interessata dall'infrastruttura, suddividendo l'anno solare in 4 periodi stagionali per ognuno dei quali è stata determinata la temperatura media caratteristica dell'aria. Il danno cumulato a fatica è stato calcolato come somma del contributo al danno totale prodotto durante ognuno dei 4 periodi stagionali.

Per la determinazione delle temperature stagionali della pavimentazione si è fatto riferimento ai valori della temperatura dell'aria reperibili per l'area in esame (URL: <https://it.climate-data.org>), riportati qui di seguito.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	5.4	6.2	9.5	12.9	17	21.4	24.1	24.1	19.7	15.4	10.5	6.5
Temperatura minima (°C)	1.6	1.8	4.5	7.6	11.7	16.1	18.7	18.8	14.9	11.2	6.9	2.8
Temperatura massima (°C)	9.6	10.7	14.2	17.8	21.7	26.3	29.1	29.3	24.5	19.8	14.4	10.5



Stagione	TMSA [°C]
Inverno	6.3
Primavera	13.4
Estate	23.4
Autunno	15.5

Nota la temperatura media dell'aria per ogni periodo stagionale, è stata quindi calcolata la temperatura nei diversi strati della pavimentazione e si è proceduto alla correzione dei moduli di progetto degli strati bituminosi, assumendo come riferimento la temperatura di 20°C. In particolare, la stima della temperatura della pavimentazione è stata eseguita mediante la legge proposta da Witczak e successivamente ripresa dal Prof. Marchionna in "Modello di Degradazione Strutturale delle Pavimentazioni – Fatica degli Strati Legati":

$$TMSP(Z) = (1.467 + 0.043 \cdot Z) + (1.362 - 0.005 \cdot Z) \cdot TMSA$$

dove:

- TMSA: è la temperatura media stagionale dell'aria (°C);
- Z: profondità, a partire dalla superficie, a cui si vuole calcolare la temperatura media (cm);
- TMSP(Z): è la temperatura media stagionale della pavimentazione alla profondità Z;

I valori ottenuti sono riportati di seguito.

Stagione	TMSP [°C]
Inverno	10.1
Primavera	19.6
Estate	32.7
Autunno	22.3

Per la correzione dei valori del modulo in relazione alle temperature stagionali in conformità a quanto esposto al precedente capitolo, si è applicata, sulla base delle informazioni reperibili nella letteratura di riferimento e della pratica corrente, la legge proposta dall'Asphalt Institute riportata di seguito.

$$E_s = 10^{\alpha \cdot (T^2 - T_s^2)} \cdot E_{20}$$

dove:

- T_s : temperatura media stagionale dello strato (in °F);
- T: temperatura di riferimento pari a 20 °C (68 °F);
- E_{20} : modulo dello strato bituminoso alla temperatura di riferimento di 20 °C (MPa);
- E_s : modulo dello strato bituminoso alla temperatura media stagionale (MPa);
- α : coefficiente che indica la suscettività termica del materiale. Tale valore è stato assunto pari 0.00011 per gli strati in conglomerato bituminoso.

TRAFFICO DI PROGETTO – STIMA DEI VOLUMI GENERATI DAL NUOVO POLO

La realizzazione del nuovo polo logistico determinerà un incremento dei flussi di traffico che è possibile valutare secondo modelli validati e consolidati. In particolare, è stata seguita la procedura descritta e sviluppata dall'Institute of Transportation Engineers, o ITE2, nel Manuale "Trip Generation", che consente una stima preliminare del traffico generato in presenza di differenti tipi di destinazione ed uso del suolo (land use). Questa procedura standardizzata si basa sull'utilizzo di funzioni generative e/o indici per categoria di destinazione ed uso del suolo parametrizzati su grandezze caratteristiche, come superficie di vendita, numero di addetti, e così via. La determinazione delle funzioni generative come degli indici per categoria è fatta sull'analisi statistica dei flussi di traffico rilevati per strutture analoghe. La stima del traffico generato dalla particolare infrastruttura è quindi ottenuta moltiplicando il valore tipico di uso del suolo preso a riferimento (es., i metri quadrati di superficie coperta destinata all'attività, il numero di addetti, la superficie dell'intera area, ecc.) per l'indice di generazione del corrispondente intervallo riportato dal Manuale ITE, ovvero sostituendo il valore specifico del parametro nella rispettiva equazione della curva di generazione. Per il caso in esame è stato considerato il codice relativo alle attività di "Warehousing" (Codice ITE Land Use: 150 - per attività di produzione e logistica).

La variabile indipendente considerata dal Manuale ITE è rappresentata dalla superficie lorda coperta, o GFA: il valore di tale variabile è prima espresso in metri quadri e poi convertito in migliaia di square feet, o 1000 sq ft, che è l'unità di misura con cui deve essere inserito nelle funzioni di generazione del caso in questione. A questo punto, come già detto, la stima col Metodo ITE del traffico generato è ottenuta sostituendo lo specifico valore del parametro di uso del suolo preso a riferimento, ovvero la Gross Floor Area, nella relativa equazione della curva di regressione dell'indice di generazione di seguito riportata:

$$T = 3,676(X) + 350,266$$

con T= traffico giornaliero medio.

Considerando una superficie coperta complessiva di 60000 mq si ottiene un TGM pari a circa 2700 veic/gg. Ipotizzando che l'aliquota del traffico pesante generato sia del 3%, si ottiene un numero di passaggi di veicoli pesanti giornaliero di ca 80 mezzi che, su un arco di vita utile pari a 10 anni, determina un numero di passaggi complessivo pari a 250000.

Con riferimento alle caratteristiche dei mezzi che si prevede transiteranno nell'area in esame in termini di tipologia di asse, riportate nel Bollettino Ufficiale C.N.R. n.178, sono stati ipotizzati, per le due differenti aree esaminate, i seguenti spettri di traffico:

SOLUZIONE A

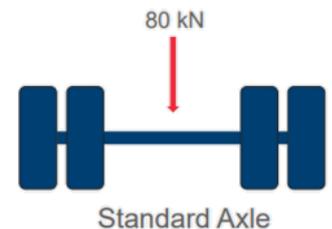
ID	Tipo di veicolo come da CNR BU 178															
	[%]															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Urbanizzazione	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	50	25	-	-	-	-

SOLUZIONE B

ID	Tipo di veicolo come da CNR BU 178															
	[%]															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Urbanizzazione	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-

Tipo di veicolo		Tipologia assi			Distribuzione dei carichi per asse [kN]			
1	Autocarri leggeri	S	S		10	20		
2	Autocarri leggeri	S	S		15	30		
3	Autocarri medi e pesanti	S	S		40	80		
4	Autocarri medi e pesanti	S	S		50	110		
5	Autocarri pesanti	S	T		40	80 + 80		
6	Autocarri pesanti	S	T		60	100 + 100		
7	Autotreni e autoarticolati	S	S	S S	40	90	80	80
8	Autotreni e autoarticolati	S	S	S S	60	100	100	100
9	Autotreni e autoarticolati	S	T	T	40	80 + 80	80 + 80	
10	Autotreni e autoarticolati	S	T	T	60	90 + 90	100 + 100	
11	Autotreni e autoarticolati	S	S	TR	40	100	80 + 80 + 80	
12	Autotreni e autoarticolati	S	S	TR	60	110	90 + 90 + 90	
13	Mezzi d'opera	S	S	TR	50	120	130 + 130 + 130	
14	Autobus urbani	S	S		40	80		
15	Autobus extraurbani	S	S		60	100		

Ai fini della progettazione e della verifica degli interventi di riqualifica descritti è stato assunto un **valore del traffico di veicoli commerciali pari a 1.140.000**, per una vita utile di 10 anni, considerando come rappresentativo l'asse standard da 80 kN con ruota gemellata. Il traffico totale transitante è stato quindi ripartito in modo omogeneo nelle 4 stagioni dell'anno solare (ca. 285.000 a stagione).



Per quanto riguarda le aree destinate al transito dei veicoli leggeri si è assunto, cautelativamente, un numero di passaggi di veicoli commerciali pari a 5 per giornata lavorativa. Sulla base di tale stima si ottiene un numero di passaggi complessivo dell'asse di riferimento, in 10 anni, pari a ca. 45.000 (ca. 11.000 passaggi stagionali).

Risultati delle verifiche

Di seguito si riportano le caratteristiche degli schemi di pavimentazione analizzati con riferimento alle caratteristiche di rigidità determinate per i diversi periodi stagionali.

SOLUZIONE A

Strato	h (cm)	E@20°C (MPa)	v	Moduli stagionali			
				E_I (MPa)	E_P (MPa)	E_E (MPa)	E_A (MPa)
Usura C.B. tradizionale	3	4000	0.35	7400	2600	1400	5500
Binder C.B. tradizionale	10	4500	0.35				
Fondazione in materiale riciclato da demolizione	60	230	0.40	250	250	250	250
Sottofondo	-	60	0.40	60	60	60	60

SOLUZIONE B

Strato	h (cm)	E@20°C (MPa)	v	Moduli stagionali			
				E_I (MPa)	E_P (MPa)	E_E (MPa)	E_A (MPa)
Usura C.B. tradizionale	3	4000	0.35	7500	2600	1400	5500
Binder C.B. tradizionale	7	4500	0.35				
Fondazione in materiale riciclato da demolizione	40	180	0.40	250	250	250	250
Sottofondo	-	60	0.40	60	60	60	60

Sulla base delle ipotesi fin qui assunte, i risultati della procedura di verifica sono riportati nella tabella seguente.

SOLUZIONE A

Strato	H (cm)	E@20°C (MPa)	v	CDF_I	CDF_P	CDF_E	CDF_A	CDF
Usura C.B. tradizionale	3	4000	0.35	0.04	0.29	0.44	0.16	0.93
Binder C.B. tradizionale	10	4500	0.35					
Fondazione in materiale riciclato da demolizione	60	230	0.40	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Sottofondo	-	60	0.40	0.07	0.14	0.18	0.10	0.49

SOLUZIONE B

Strato	H (cm)	E@20°C (MPa)	v	CDF_I	CDF_P	CDF_E	CDF_A	CDF
Usura C.B. tradizionale	3	4000	0.35	0.02	0.05	0.10	0.05	0.22
Binder C.B. tradizionale	7	4500	0.35					
Fondazione in materiale riciclato da demolizione	40	180	0.40	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Sottofondo	-	60	0.40	0.02	0.04	0.08	0.03	0.17

CONCLUSIONI

Le verifiche condotte sui pacchetti di pavimentazione proposti come soluzione progettuale per le pavimentazioni delle infrastrutture viarie da realizzare nell'ambito del Progetto di urbanizzazione della U.T.O.E. per attività produttive - "Zona Produttiva" ambito unitario di progetto – AUP 2.2" all'interno del Comune di Capannoli (PI), evidenziano come queste siano in grado di resistere ai carichi di traffico stimati per la vita utile assunta nelle procedure di verifica pari a 10 anni.



Ing. Armando Cofrancesco