



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento
di Ingegneria Civile
Edile e Ambientale

RELAZIONE

Comparazione tecnica ed economica
di pavimentazioni cementizie
e bituminose in galleria



Federbeton
CONFINDUSTRIA



Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

RELAZIONE

Comparazione tecnica ed economica
di pavimentazioni cementizie e bituminose in galleria

Marzo 2017

prof.ssa **Paola Di Mascio**
prof.ssa **Laura Moretti**



LA PAVIMENTAZIONE IN CALCESTRUZZO IN GALLERIA È SINONIMO DI SICUREZZA E SOSTENIBILITÀ

SICUREZZA E SOSTENIBILITÀ SOCIALE

Una pavimentazione in calcestruzzo in galleria può migliorare la sicurezza e il comfort di marcia degli utenti stradali.

Un materiale inerte non combustibile e atossico come il calcestruzzo contribuisce, infatti, ad aumentare la sicurezza di utenti e squadre di soccorso anche per la non deformazione del manto stradale.

La ridotta necessità di interventi di manutenzione insieme alla maggiore luminosità del calcestruzzo riduce il rischio di incidenti e il disagio causato agli utenti dalle interruzioni del traffico dovute ai cantieri.

Le caratteristiche di luminosità aumentano anche il comfort della pavimentazione, così come le prestazioni acustiche costanti nel tempo.

Essendo il calcestruzzo un materiale di provenienza e produzione locale, esso favorisce l'integrazione della struttura nel territorio, poiché è in grado di contribuire alla crescita economica e al benessere delle comunità ove le opere vengono realizzate.

SOSTENIBILITÀ ECONOMICA

Il colore chiaro della pavimentazione consente un risparmio considerevole sull'illuminazione che, unito alla maggiore durabilità del materiale, porta un vantaggio economico variabile dal 20 al 26% a seconda della lunghezza della galleria e della vita utile di progetto (20 o 30 anni).

Si aggiungono poi i vantaggi economici legati ai minori danni alla struttura in conseguenza di incendi nonché i minori costi sociali determinati dalla riduzione del rischio di incidenti.

SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Il calcestruzzo è un materiale da costruzione di basso impatto ambientale. La sua durabilità assicura uniformità della superficie della pavimentazione e del grip.

Una perdita accidentale di carburante non danneggia la pavimentazione in calcestruzzo.

Le pavimentazioni in calcestruzzo sono di colore chiaro e pertanto riducono il consumo di energia legato all'illuminazione elettrica in galleria.

Il calcestruzzo è un materiale che consente l'utilizzo di numerose materie prime secondarie per la sua produzione, limitando il consumo di risorse non rinnovabili.

La stessa pavimentazione in calcestruzzo, al termine del periodo di servizio, può essere riciclata per la produzione di aggregati.

SINTESI

OGGETTO

Confronto fra pavimentazione in conglomerato bituminoso e in calcestruzzo in gallerie stradali su strade extraurbane secondarie ordinarie.

METODO

Analisi dei costi della pavimentazione (costruzione e manutenzione) e dell'illuminazione a LED (installazione, esercizio e manutenzione) lungo il ciclo di vita.

RIFERIMENTI NORMATIVI

B.U. Catalogo delle Pavimentazioni Stradali CNR 178/95, per gallerie progettate secondo il D.M. Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade 5/11/2001.

RISULTATI PRINCIPALI

Lo studio ha quantificato i vantaggi, in termini economici e di efficienza energetica, legati all'utilizzo di pavimentazioni in calcestruzzo all'interno delle gallerie rispetto alla tradizionale soluzione in conglomerato bituminoso.

Il colore chiaro della pavimentazione consente un risparmio considerevole sull'illuminazione che, unito alla maggiore durabilità del materiale, consente un importante vantaggio economico.

Tale vantaggio economico oscilla **tra il 20 e il 26%** a seconda della lunghezza della galleria e della vita utile di progetto (20 o 30 anni).

Ad esempio per una galleria di 2000 m di lunghezza, considerando una vita utile di 30 anni, si ha un costo complessivo attualizzato di 5,7 milioni di euro nel caso di pavimentazione in calcestruzzo e di 7,4 milioni di euro nel caso di pavimentazione in conglomerato bituminoso. Il vantaggio economico è, quindi, quantificato in circa **1,7 milioni di euro**.

Anno in cui il costo attualizzato della pavimentazione in calcestruzzo, comprensivo dei costi di costruzione e manutenzione della pavimentazione e dell'impianto di illuminazione, diventa inferiore all'equivalente con pavimentazione in conglomerato bituminoso (break-even point*)

Lunghezza galleria (m)	750	1000	1250	1500	2000
Break-even point (anni)	0	0	2	3.5	6.5

*il vantaggio economico inizia a manifestarsi, per gallerie di lunghezza pari o superiore a 1250m dopo circa 2-6 anni.

INTRODUZIONE

1	VANTAGGI E CRITICITÀ DELLE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO	
1.1	Le pavimentazioni stradali	13
1.2	Le pavimentazioni in calcestruzzo	14
1.2.1	Pavimentazioni a lastre in calcestruzzo non armato	15
1.3	Vantaggi	16
1.3.1	Durabilità	16
1.3.2	Costi	17
1.3.3	Riduzione dei costi di illuminazione	18
1.3.4	Ridotta manutenzione stradale	18
1.3.5	Caratteristiche superficiali	19
1.3.6	Sicurezza in galleria	20
1.4	Criticità	21
1.4.1	Difficoltà tecniche esecutive	22
1.4.2	Manutenzione dei giunti	22
1.4.3	Costo iniziale	22
1.4.4	Gestione dei sottoservizi	22
2	DIMENSIONAMENTO	
2.1	Generalità sui metodi di calcolo delle pavimentazioni in calcestruzzo	26
2.2	Definizione dei dati di input	27
2.2.1	Traffico	27
2.2.2	Fattori climatici	29
2.2.3	Portanza del sottofondo	29
2.3	Dimensionamento e verifica delle pavimentazioni	30
2.3.1	Il catalogo CNR 178/95 delle pavimentazioni stradali	30
2.3.2	Guida AASHTO 1993 - pavimentazioni in calcestruzzo	30
2.3.3	Guida AASHTO 1993 - pavimentazioni in conglomerato bituminoso	31
3	ANALISI ECONOMICA DEI COSTI DI COSTRUZIONE E MANUTENZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI	
3.1	Caso A: costi di costruzione - pavimentazione a lastre non armate	36
3.2	Caso B: costi di costruzione - pavimentazione in conglomerato bituminoso	38
3.3	Caso A: costi di manutenzione - pavimentazione a lastre non armate	38
3.4	Caso B: costi di manutenzione - pavimentazione in conglomerato bituminoso	39
4	ILLUMINAZIONE	
4.1	Luminanza	42
4.2	Calcolo illuminotecnico	43
4.2.1	Potenza di illuminamento complessiva degli impianti di illuminazione	44
4.3	Costi di installazione dell'impianto di illuminazione	45
4.4	Costi di esercizio dell'impianto di illuminazione	45
4.5	Costi di manutenzione dell'impianto di illuminazione	47
5	ANALISI DEI COSTI DI COSTRUZIONE E MANUTENZIONE DELLA PAVIMENTAZIONE E DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	
6	CONCLUSIONI	56
7	BIBLIOGRAFIA	60

INTRODUZIONE

La presente relazione riporta i contenuti dello studio condotto nell'ambito della convenzione stipulata fra Federbeton Federazione delle Associazioni della filiera del cemento, del calcestruzzo e dei materiali di base per le costruzioni nonché delle applicazioni e delle tecnologie ad esse connesse (nel seguito indicata come Federbeton) e il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale della Sapienza Università di Roma (nel seguito indicato come DICEA), relativo alla Comparazione tecnica ed economica di pavimentazioni cementizie e bituminose in galleria.

Scopo della ricerca è valutare i vantaggi economici delle pavimentazioni rigide in galleria e fornire uno strumento operativo ai decisori.

Il carattere innovativo dello studio risiede sia nell'approccio, basato sull'intero ciclo di vita, sia nella valutazione dei costi di realizzazione, gestione e manutenzione dell'impianto di illuminazione.

L'approccio basato sul ciclo di vita dell'opera è di particolare attualità in quanto introdotto dal nuovo codice dei contratti pubblici quale criterio per la valutazione delle offerte.

Il Rapporto è suddiviso in 4 parti:

- 1) ricerca bibliografica sulle pavimentazioni stradali in calcestruzzo, con particolare attenzione alle realizzazioni in galleria e analisi dei vantaggi e delle criticità correlati;
- 2) dimensionamento strutturale di pavimentazioni in calcestruzzo a lastre non armate e in conglomerato bituminoso soggette a tre livelli di traffico. Il riferimento normativo per il dimensionamento è il "Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali" (BU 178/95);
- 3) analisi tecnica ed economica delle pavimentazioni dimensionate al punto 2 in riferimento al loro ciclo di vita;
- 4) analisi tecnica ed economica degli impianti di illuminazione posti in opera in gallerie di cinque lunghezze diverse realizzate con le pavimentazioni in calcestruzzo e in conglomerato bituminoso esaminate nei punti precedenti; rappresentazione grafica dell'andamento del costo attualizzato unitario delle sovrastrutture esaminate in funzione della lunghezza della galleria e del traffico.

Nella prima parte viene illustrato lo stato dell'arte sulle pavimentazioni stradali in calcestruzzo, con particolare attenzione agli aspetti peculiari delle realizzazioni in galleria. Vista la scarsa diffusione di questa tecnologia sul territorio italiano, sarà esaminata l'esperienza maturata all'estero nel campo delle pavimentazioni rigide, confrontandone i vantaggi e le criticità tecnici ed economici rispetto all'impiego di una pavimentazione in conglomerato bituminoso.

Nella seconda parte viene presentato il dimensionamento strutturale delle pavimentazioni in calcestruzzo a lastre non armate e in conglomerato bituminoso dimensionate secondo il B.U. Catalogo delle Pavimentazioni Stradali CNR 178/95, per

gallerie progettate secondo il D.M. 5/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

Nella terza parte, coerentemente con i dati forniti da ANAS e a disposizione del DICEA, è condotta una analisi economica delle pavimentazioni dimensionate al punto due, valutandone sia i costi di primo impianto che i costi di manutenzione nel corso della vita utile assunta pari a 20 e 30 anni.

Nella quarta parte, coerentemente con i dati forniti da ANAS e a disposizione del DICEA, è condotta una analisi economica dei costi di illuminazione della galleria, quantificando in termini monetari il vantaggio derivante dall'impiego di una pavimentazione in calcestruzzo, piuttosto che di una in conglomerato bituminoso. Lo studio verrà condotto sulle strade extraurbane secondarie ordinarie, che costituiscono un'importante tipologia sia per le caratteristiche prestazionali e funzionali sia per la diffusione sul territorio nazionale. In particolare, la sezione stradale esaminata sarà del tipo C2, secondo quanto previsto nel D.M. 5/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

1 VANTAGGI E CRITICITÀ
DELLE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO



1.1 LE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Una pavimentazione stradale è formata da una successione di strati costituiti da materiali di caratteristiche fisiche e meccaniche diverse, in relazione alla funzione da assolvere all'interno della struttura e al tipo di sollecitazione prevalente.

La pavimentazione stradale deve garantire la sicurezza della circolazione dei veicoli, resistere alle sollecitazioni verticali (peso del veicolo) e tangenziali (azioni impresse da una variazione vettoriale della velocità) e trasferire il carico al piano di posa compatibilmente con la portanza di quest'ultimo, in modo tale da mantenere una struttura stabile nel tempo e poco deformabile.

Le pavimentazioni stradali possono essere di tipo flessibile, semirigido o rigido in funzione degli strati che le compongono (Figura 1):

- le pavimentazioni flessibili sono sostanzialmente costituite dai seguenti strati:
 - manto in conglomerato bituminoso composto a sua volta di due strati, usura e collegamento o binder;
 - base in conglomerato bituminoso, misto bitumato o misto granulare;
 - fondazione generalmente in misto granulare;
 - sottofondo costituito dal terreno naturale o dallo strato più superficiale del terreno del rilevato opportunamente sagomato e costipato;
- le pavimentazioni semirigide sono generalmente costituite da una successione di strati identica a quelle delle pavimentazioni flessibili, ma lo strato di base è legato con cemento (misto cementato);
- le pavimentazioni rigide sono costituite da una lastra in calcestruzzo posata su uno o più strati di fondazione in misto cementato e/o misto granulare o direttamente poggiata sul terreno di sottofondo.

Le pavimentazioni rigide utilizzate in campo stradale sono essenzialmente di due tipologie:

- lastre di calcestruzzo non armate (Figura 2a) con presenza di giunti trasversali relativamente frequenti;

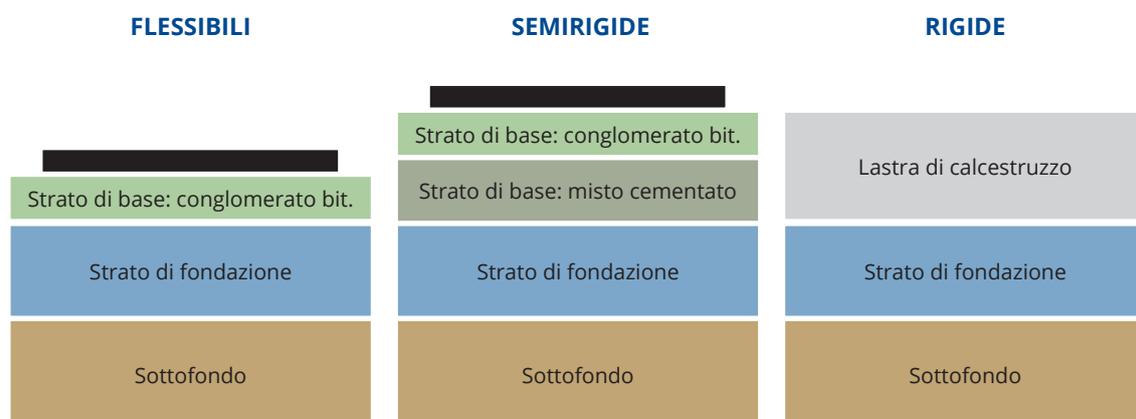


Figura 1: Esempio di tipologie di pavimentazioni stradali

- lastre ad armatura continua (Figura 2b) caratterizzate dall'assenza di giunti trasversali, a eccezione di quelli di costruzione e dalla presenza di un'armatura longitudinale di acciaio, che ha il compito di tenere chiuse le lesioni che si formano nella lastra per effetti igrotermici.

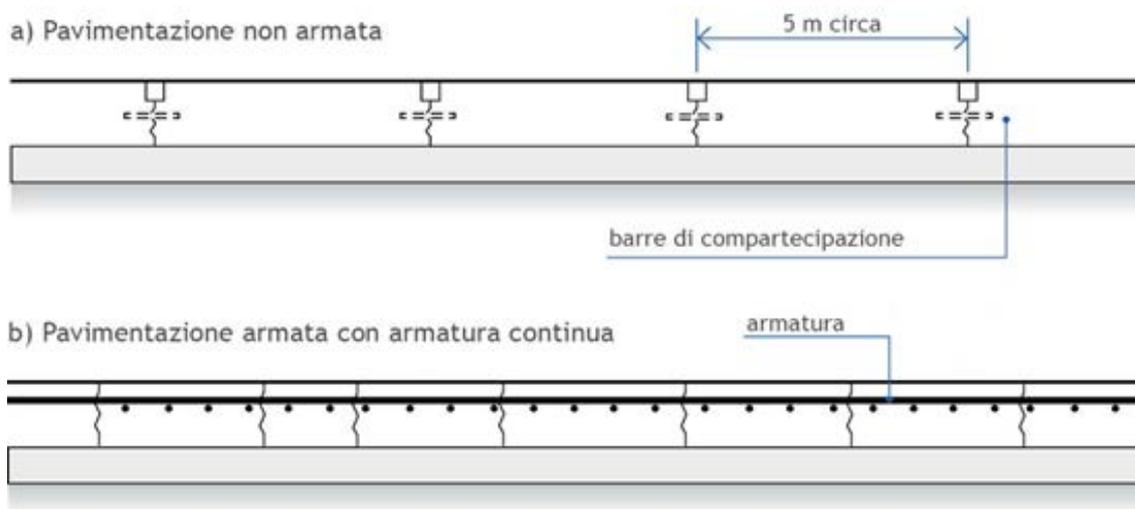


Figura 2: Tipologie di pavimentazioni rigide

Il dimensionamento di una pavimentazione stradale dipende dal traffico, dai fattori climatici, dalle caratteristiche del terreno di sottofondo e da quelle dei materiali che compongono i singoli strati.

Per rispettare le specifiche funzionali e ottenere gli attesi livelli di servizio della circolazione, occorre non solo costruire ma soprattutto mantenere correttamente la strada. I lavori di manutenzione previsti durante la vita di servizio della pavimentazione condizionano perciò le scelte progettuali e i relativi costi devono essere considerati nella valutazione del costo globale della sovrastruttura durante tutta la sua vita utile.

1.2 LE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO

Le pavimentazioni in calcestruzzo sono una tecnologia ampiamente sperimentata e utilizzata all'estero, ma non ancora diffusa in Italia. Stati Uniti, Canada, Germania, Austria, Belgio, Olanda e Regno Unito hanno maturato esperienze decennali e tuttora svolgono ricerche volte al raggiungimento di nuovi, stimolanti obiettivi quali la sicurezza stradale e la mitigazione dell'impatto ambientale. In effetti, l'impiego del calcestruzzo offre una valida alternativa tecnica alle soluzioni comunemente adottate in conglomerato bituminoso.

I fattori che devono essere considerati per un confronto obiettivo delle alternative tipologiche sono molto numerosi e devono essere esaminati durante tutta l'intera vita di servizio della pavimentazione.

Appropriati studi di tipo Life Cycle Cost Analysis (LCCA), cioè di analisi del ciclo di

vita, hanno determinato, nei paesi Europei più sensibili a questi nuovi indirizzi (per esempio Austria e Germania), un ritorno alla realizzazione di pavimentazioni in calcestruzzo (Breyer, G., 1990 e Springenschmid, R. e Fleischer, W., 2001), in virtù delle loro caratteristiche di elevata durabilità e ridotta manutenzione.

1.2.1 Pavimentazioni a lastre in calcestruzzo non armato

Le pavimentazioni in calcestruzzo non armato (JPCP, acronimo del termine inglese Jointed Plain Concrete Pavement) sono costituite da lastre prive di armatura strutturale, realizzate con un sistema di giunti longitudinali e trasversali, generalmente armati con ferri di legatura e barre di compartecipazione.

I giunti possono essere di contrazione, costruzione e dilatazione, a seconda della loro funzione e conformazione.

I giunti di contrazione permettono la contrazione termica e il ritiro del calcestruzzo controllando la fessurazione delle lastre e consentendo anche la dilatazione, fino all'originaria lunghezza della lastra. I giunti di contrazione vengono tagliati nel calcestruzzo per una larghezza di 8÷10 mm con profondità di circa 1/3÷1/4 dello spessore della lastra: in questo modo vengono realizzate sezioni di minor resistenza nelle quali si formano spontaneamente delle lesioni per ritiro sul restante spessore.

Il taglio del calcestruzzo per la formazione del giunto può avvenire mediante fresatura del conglomerato appena indurito oppure mediante coltelli vibranti o inserimento per vibrazione di inserti di plastica quando il calcestruzzo è ancora fresco. La compartecipazione fra le lastre attraverso il giunto di contrazione può essere assicurata mediante il mutuo incastro fra gli aggregati delle superfici a contatto delle lastre che formano il giunto oppure, quando i carichi di traffico sono elevati, mediante dispositivi di trasferimento del carico quali barre di acciaio generalmente di grande diametro ($\varnothing 30$) lunghe 500÷700 mm poste a cavallo del giunto.

In senso longitudinale i giunti di contrazione servono a prevenire gli effetti di possibili cedimenti differenziali lasciando la lastra libera di ruotare.

I giunti di costruzione (Figura 3), necessari ogni qualvolta si decida di interrompere il getto della pavimentazione per più di un'ora, devono sempre essere dotati di ferri di legatura ad aderenza migliorata per il trasferimento del carico e il mantenimento delle due stese.

I giunti di dilatazione interessano tutto lo spessore della lastra, hanno una larghezza di 18-20 mm e sono costituiti da materiale di riempimento compressibile. Essi devono consentire l'espansione delle lastre durante i periodi più caldi e fungono anche da giunti di contrazione. Data la loro ampiezza, i giunti di dilatazione sono sempre dotati di barre di compartecipazione in quanto non si può fare affidamento su nessuna azione di mutuo incastro fra le facce del giunto. Questi giunti sono previsti solo in corrispondenza delle opere d'arte e nelle intersezioni con altre carreggiate.

I giunti di isolamento (Figura 4) devono essere realizzati in adiacenza ai bordi o alle strutture adiacenti al nastro di stesa. Un elemento comprimibile di riempimento

continuo per giunti deve essere inserito nella parte inferiore della scanalatura del giunto e nella parte superiore deve essere realizzata una scanalatura del giunto ampio almeno 20 mm e profondo 20 mm; la scanalatura deve essere sigillata. La funzione di isolamento della pavimentazione dalle strutture ad essa adiacente è garantita inoltre dall'assenza di vincoli o armature poste sul bordo.

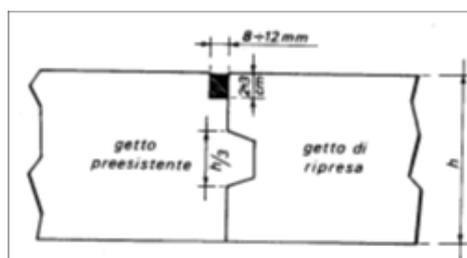


Figura 3: Giunto di costruzione

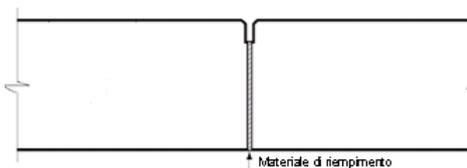


Figura 4: Giunto di isolamento

Le caratteristiche geometriche in pianta di una lastra sono definite da lunghezza e larghezza: per lunghezza della lastra si intende la distanza che intercorre tra due giunti trasversali consecutivi; per larghezza della lastra si intende la distanza che intercorre tra i due giunti longitudinali che la delimitano.

In generale, i giunti trasversali sono disposti a intervalli pari a 25 volte lo spessore della lastra. La lunghezza della lastra non deve eccedere più di 1,5 volte la sua larghezza. Ove possibile, si devono realizzare lastre a pianta quadrata per migliorare la distribuzione delle tensioni.

Nel caso di giunti senza barre di compartecipazione, per spessori inferiori a 20 cm, la lunghezza massima è 4 m; nel caso di giunti armati e lastre spesse più di 20 cm tale dimensione può raggiungere i 5 m.

1.3 VANTAGGI

1.3.1 Durabilità

La vita utile di una pavimentazione è definita come quel periodo di tempo al di là del quale, a causa della degradazione prodotta dalle azioni del traffico e dagli agenti atmosferici, non vengono più garantiti i requisiti funzionali e strutturali ed è necessario il rifacimento della pavimentazione. La vita utile di una pavimentazione in calcestruzzo è maggiore di quella di una pavimentazione in conglomerato bituminoso. I manuali di progettazione consultati in ambito internazionale indicano periodi di esercizio in ogni caso superiori a 20 anni, non di rado pari a 30 prima che si renda necessario un intervento strutturale su una pavimentazione in calcestruzzo.

L'esperienza maturata dimostra come la resistenza meccanica e chimica del calcestruzzo, unita all'assenza di termosuscettibilità del materiale, permettano anche di superare i 50 anni di esercizio, come per la Mölltalroad in Carinzia, aperta al traffico nel 1956, e per la Lorraine Avenue in Belgio, costruita nel 1925 e rimasta in servizio fino al 2003 (AAVV, 2009).

1.3.2 Costi

Il costo di primo impianto di una pavimentazione in calcestruzzo è generalmente superiore a quello di una pavimentazione in conglomerato bituminoso, ma, considerando la ridotta necessità di manutenzione, il costo complessivo di una sovrastruttura rigida risulta inferiore. Un recente studio realizzato dal Ministero delle Infrastrutture e Trasporti del Belgio fornisce interessanti spunti di riflessione. Il documento sviluppa un confronto dei costi tra le realizzazioni di pavimentazioni in conglomerato bituminoso e pavimentazioni in calcestruzzo ad armatura continua, con l'obiettivo di valutare il Life Cycle Cost cumulato dai due tipi di pavimentazione in 50 anni di esercizio e attualizzato all'anno 2001 con tasso del 2,6%. Alla data di investimento iniziale si registra un maggiore costo della pavimentazione in calcestruzzo pari a circa il 26%, il break-even point è a 10 anni dalla costruzione, mentre dopo 30 anni di esercizio la soluzione rigida consente un risparmio del 27% rispetto a quella flessibile (Figura 5) (Walloon Ministry of Infrastructure and Transport, 2006).

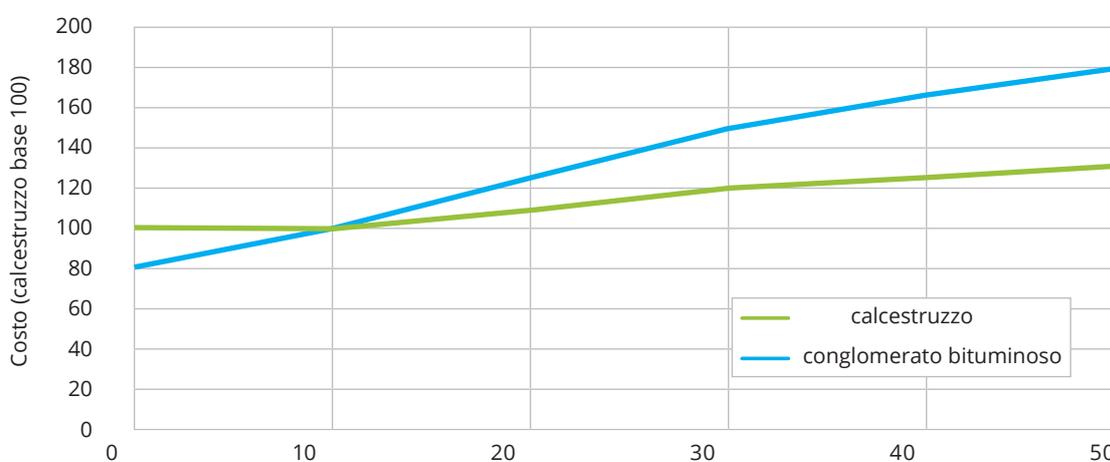


Figura 5: Confronto dei costi complessivi di pavimentazioni in calcestruzzo e in conglomerato bituminoso nel corso della vita utile

Il vantaggio a lungo termine delle pavimentazioni in calcestruzzo è dimostrato anche da uno studio sviluppato negli USA dall'American Concrete Pavement Association sulla pavimentazione di un tratto di strada ad alta percorrenza in Tennessee. La sovrastruttura è in calcestruzzo per il 44% e in conglomerato bituminoso per il restante 56%. Il valore LCC della prima, in termini di costo equivalente annuale per miglio di corsia, calcolato con un fattore di attualizzazione temporale pari al 3,55%, per un periodo di 30 anni, risulta essere inferiore del 25% (Figura 6) (AAVV, 2009).

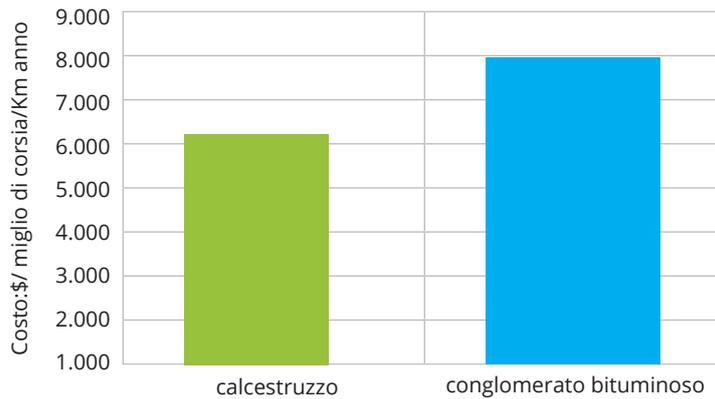


Figura 6: Calcolo del valore LCC elaborato da ACPA

1.3.3 Riduzione dei costi di illuminazione

Un rapporto della Portland Cement Association evidenzia come le pavimentazioni in calcestruzzo garantiscano in esercizio una maggiore luminanza rispetto al conglomerato bituminoso. Il coefficiente di luminanza delle pavimentazioni in calcestruzzo è pari a 0.10, mentre per le pavimentazioni bituminose è pari a 0.07. Ciò offre indubbi vantaggi soprattutto in galleria sia per i conducenti che per i gestori dell'infrastruttura: i primi riconoscono meglio eventuali ostacoli e percepiscono correttamente le dimensioni della carreggiata, mentre i secondi sostengono minori costi per l'installazione, la manutenzione e l'accensione degli impianti di illuminazione. A parità di livello di illuminazione all'interno di una galleria, la costruzione di una pavimentazione in calcestruzzo può garantire durante l'intera vita di esercizio dell'impianto di illuminazione un risparmio complessivo del 31% rispetto ai costi necessari in caso di pavimentazione flessibile (Gajda, J. W. e Van Geem, M. G., 1997).

1.3.4 Ridotta manutenzione stradale

Gli effetti sulla sicurezza e sul livello di servizio dei cantieri stradali per gli interventi manutentivi sulle pavimentazioni sono spesso sottovalutati: garantire la durabilità di una sovrastruttura e mantenere adeguati livelli di servizio durante la vita utile dell'opera ha ripercussioni sulla fruibilità dell'infrastruttura. Per ridurre al minimo il disagio arrecato all'utenza dall'interruzione o dalla limitazione del servizio di viabilità, è necessario predisporre un piano di manutenzione che preveda l'esecuzione di interventi in condizioni ottimali e l'adozione di tecniche valide e veloci, possibilmente ad alto rendimento.

Il disagio causato da una chiusura parziale o totale deve essere valutato considerando l'ampio intervallo di tempo che intercorre tra due interventi successivi: tipicamente per una pavimentazione in calcestruzzo il primo si registra a 10-15 anni dalla posa della sovrastruttura ed è mirato a garantire un adeguato livello di servizio per un altro decennio. La riduzione dell'apertura dei cantieri necessari per effettuare la manutenzione stradale limita di conseguenza le perdite di tempo, il rischio di incidenti al personale presente sul cantiere stradale e l'inquinamento ambientale associato alle code causate dagli stessi cantieri. Tale aspetto diventa cruciale in galleria, la cui manutenzione della pavimentazione richiede la chiusura del fornice, con

deviazione del traffico sull'altro fornice se esistente, con conseguenti rischi per la circolazione, o deviazione del traffico su altri itinerari, con forti disagi per l'utenza e aumento di emissioni nell'ambiente.

1.3.5 Caratteristiche superficiali

Le superfici in calcestruzzo una volta poste in opera vengono trattate ancora fresche meccanicamente o chimicamente per migliorarne le caratteristiche di aderenza. Le tecniche più diffuse consistono nella spazzolatura o nel trattamento con agenti ritardanti della presa. La spazzolatura o striatura consiste nel solcare la superficie in direzione longitudinale o trasversale rispetto al senso di marcia con utensili spesso meccanizzati scelti in funzione del grado di rugosità ricercato.

La superficie delle moderne pavimentazioni in calcestruzzo, se trattate con la tecnica dell'esposizione degli aggregati superficiali mediante spazzolatura, mantiene valori elevati del coefficiente di aderenza trasversale (CAT) nel tempo, come si evidenzia in Figura 7. Questo permette di ridurre, rispetto alle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, gli interventi manutentivi della superficie della pavimentazione, necessari per ripristinare i valori del CAT quando questi scendono sotto la soglia minima di sicurezza (Haider, M., Steigenberger, J. e Piber H., 2008).

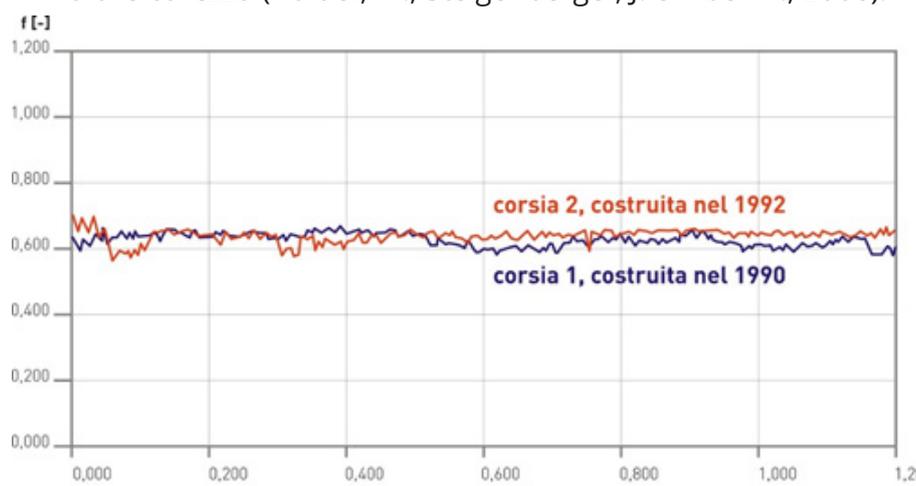


Figura 7: Valori di aderenza trasversale per una pavimentazione con aggregato esposto, misurati 5 e 7 anni dopo la costruzione

Le pavimentazioni con aggregato esposto hanno notevolmente migliorato molti parametri delle superfici delle pavimentazioni rigide.

I risultati raggiunti concordano con quanto elaborato dal dipartimento dei trasporti e dei lavori pubblici della Nova Scotia su sezioni adiacenti flessibili e rigide costruite nel 1994 lungo l'autostrada 104 (Nova Scotia Transportation and Public Works, 1999). La pavimentazione in calcestruzzo ha dimostrato di avere nel tempo caratteristiche migliori per quanto riguarda la regolarità e il comfort di marcia. La regolarità superficiale è stata quantificata attraverso l'indice PRI (Profile Ride Index), che dal 1998 è stato sostituito dall'IRI. Nel tempo la regolarità superficiale del calcestruzzo evidenzia un degrado notevolmente inferiore a quello del conglomerato bituminoso, come illustrato in Figura 8, ove valori meno elevati indicano una maggiore regolarità di marcia.

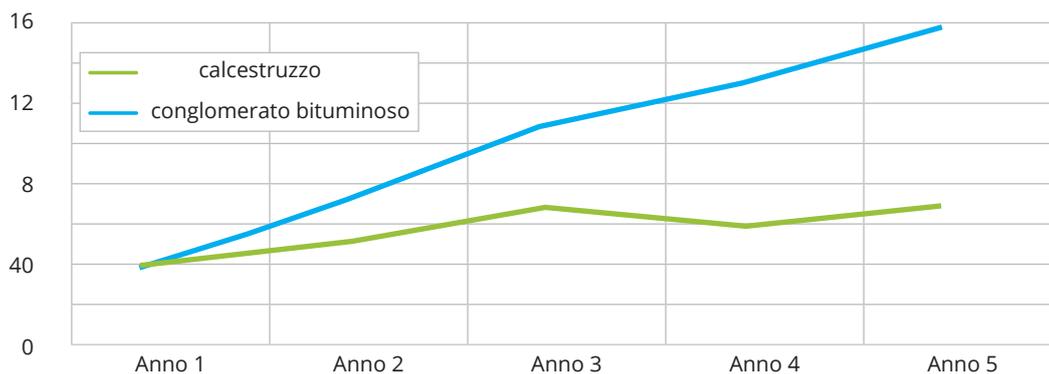


Figura 8: Valori nel tempo dell'indice PRI di pavimentazioni flessibili e rigide lungo l'autostrada 104 in Nova Scotia

1.3.6 Sicurezza in galleria

Dopo il 1999 - anno dell'incendio all'interno del traforo del Monte Bianco e di quello del tunnel austriaco Tauern - sono state avviate in Europa numerose iniziative, sia in ambito tecnico-scientifico che a livello normativo, per accrescere la sicurezza in galleria. Alcuni Paesi europei hanno emanato normative/raccomandazioni/linee guida che riportano alcune indicazioni riguardanti le pavimentazioni in galleria, indicando i requisiti dei materiali più idonei. In Tabella 1 è riportato un elenco di dette norme.

Nazione	Titolo	Note
Austria	RVS 09.01.23 - Innenausbau Tunnel, Österreichische Forschungsgesellschaft	L'uso della pavimentazione in calcestruzzo è consigliato in galleria, ma non è obbligatorio. L'uso del conglomerato bituminoso chiuso è ammesso sotto specifiche condizioni di progettazione della miscela. L'uso del conglomerato bituminoso drenante non è ammesso.
Germania	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten - ZTV-ING), Part 5, Tunnel construction) (ZTV-ING Teil 5, 2007)	All'interno delle gallerie devono essere usati solo materiali da costruzione di classe A delle norme DIN 4102. La classe di costruzione deve essere verificata da prove effettuate in un laboratorio riconosciuto. Non possono essere impiegati materiali che, sotto l'effetto del fuoco, rilascino sostanze pericolose per le persone e l'infrastruttura. Secondo le norme DIN, i calcestruzzi cementizi appartengono alla classe A, mentre i conglomerati bituminosi appartengono alla classe B2.
Slovacchia	PIARC Committee on Road Tunnels (C5) Fire And Smoke Control in Road Tunnels, 2005	Obbligo di pavimentazioni in calcestruzzo in gallerie di nuova costruzione lunghe più di 1000 m.
Slovenia	Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji. [Regolamento sulle norme tecniche e progettuali delle gallerie stradali in Slovenia]	Per motivi di sicurezza e luminosità, nelle gallerie di nuova costruzione e in caso di manutenzione straordinaria delle gallerie esistenti, devono essere realizzate pavimentazioni in calcestruzzo. Sono ammesse deroghe purché sia dimostrato un adeguato livello di sicurezza.
Spagna	Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural	Raccomandazione sulla classe di resistenza al fuoco di lastre armate.

Tabella 1: Stato dell'arte normativo europeo

Nel 2002 la Commissione Europea ha inoltre finanziato il progetto SAMARIS, tra i cui obiettivi è compreso lo studio della reazione al fuoco dei materiali stradali bituminosi. I risultati hanno confermato la criticità dei materiali bituminosi e consentito l'elaborazione di una metodologia per la selezione di materiali stradali da impiegare in galleria: il calcestruzzo risponde ai requisiti di sicurezza.

Nel 2003 la Federazione nazionale francese dei Vigili del Fuoco ha esplicitamente affermato che “[nelle gallerie] la semplice logica dovrebbe imporre la sostituzione dei manti [stradali bituminosi] con un materiale totalmente inerte come il calcestruzzo”.

In effetti, le pavimentazioni in calcestruzzo in galleria offrono un contributo di sicurezza passiva in caso di incendio: il calcestruzzo è un materiale incombustibile e atossico, che mostra un comportamento migliore rispetto al conglomerato bituminoso, come sperimentato e approfondito da alcune recenti ricerche (De Lathawer, W., 2007).

Il conglomerato bituminoso esposto alla temperatura di 500 °C, raggiunta in caso di incendio di veicoli leggeri, in pochi minuti emette sostanze gassose tossiche e soffocanti, la cui concentrazione è alta e la cui dispersione è ostacolata dallo scarso ricambio d'aria. La reazione fortemente esotermica causa la perdita delle caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso, ostacolando l'evacuazione dei presenti, le operazioni di soccorso e lotta contro l'incendio. Il calcestruzzo invece è un materiale inerte rispetto alla combustione. Inoltre, le pavimentazioni rigide mantengono le proprie caratteristiche funzionali e strutturali anche in caso di esposizione a elevate temperature.

1.4 CRITICITÀ

L'utilizzo del calcestruzzo per le pavimentazioni stradali, diffuse in molti paesi sia in Europa che nel Mondo, è per l'Italia una soluzione poco praticata.

In realtà si tratta di una tradizione che il settore delle costruzioni nostrano ha perso nel tempo e che si sta nuovamente affacciando nel nostro Paese sotto l'influenza tedesca e austriaca.

La scarsa diffusione delle pavimentazioni rigide in calcestruzzo in Italia è dovuta a vari fattori fra cui la limitazione dei finanziamenti disponibili per la costruzione e la mancata considerazione dei vantaggi economici ottenibili considerando il costo dell'intero ciclo di vita del progetto. All'inizio degli anni 80 del secolo scorso, hanno pesato anche alcuni errori realizzativi dovuti alla limitata conoscenza tecnica da parte della committenza, alla limitata preparazione tecnica e organizzativa delle imprese e scelte tecniche e applicative non sempre adeguate allo scopo. Ma già alla fine degli anni 80, si è concretizzata una realizzazione di successo, la bretella Fiano - San Cesareo, apprezzata anche in Paesi di maggiore esperienza di quella italiana, fino alle esperienze positive di questi ultimi anni delle gallerie del Quadrilatero Umbria-Marche e Laives, vicino Bolzano.

Dal punto di vista costruttivo, ogni tipo di pavimentazione è sostanzialmente differente dagli altri e richiede per la sua realizzazione macchine e attrezzature particolari, che non hanno alternative equivalenti, non sempre flessibili al punto da

poter essere impiegate in casi differenti, nonché tecnici e manodopera specializzata. Sotto questo punto di vista, l'esperienza acquisita da ciascuna Nazione, Ente o Amministrazione a riguardo dei problemi affrontati nella realizzazione di un tipo di pavimentazione e l'attrezzatura di cui dispongono le imprese appaltatrici locali o nazionali sono spesso parametri tecnico-pratici che condizionano le scelte finali.

1.4.1 Difficoltà tecniche esecutive

La realizzazione di una pavimentazione in calcestruzzo richiede particolari attenzioni in fase costruttiva onde evitare prematuri danneggiamenti della sovrastruttura. Le prescrizioni costruttive di una pavimentazione rigida sono più simili a quelle di una struttura in elevazione che a quelle di una pavimentazione flessibile. Il calcestruzzo fresco è un materiale molto delicato, caratterizzato da proprietà spesso antitetiche di lavorabilità e segregazione. Il mantenimento delle caratteristiche reologiche di progetto, unitamente al pieno rispetto delle prescrizioni progettuali, è un requisito indispensabile per la buona riuscita di una pavimentazione rigida. In Italia, la scarsa disponibilità di macchinari e personale specializzati nella posa del calcestruzzo per pavimentazioni rende ancor più critiche le problematiche costruttive. Rispetto a una pavimentazione flessibile, è inoltre maggiore il tempo di attesa prima dell'apertura al traffico del tratto di strada pavimentato.

1.4.2 Manutenzione dei giunti

I giunti realizzati per motivi costruttivi o per il controllo dei fenomeni fessurativi del calcestruzzo richiedono il regolare monitoraggio dello stato e la tempestiva risigillatura per garantire la regolarità della superficie della pavimentazione, il comfort per gli utenti e la protezione delle armature presenti in corrispondenza del giunto. Il mancato svolgimento degli interventi di manutenzione ordinaria favorisce il processo di degrado del calcestruzzo in prossimità del giunto. In tali circostanze, non è sufficiente la sola sigillatura per ripristinare lo stato iniziale della superficie di rotolamento, ma occorre provvedere alla riparazione del calcestruzzo adiacente al giunto, con conseguenti maggiori oneri per il gestore e per gli utenti. Nei casi di maggior degrado, occorre inoltre verificare che il danneggiamento del giunto non abbia causato l'innescò e la propagazione della corrosione delle armature.

1.4.3 Costo iniziale

In Italia i costi di costruzione di una pavimentazione in calcestruzzo sono superiori a quelli di una equivalente pavimentazione in conglomerato bituminoso. Tale differenza è variabile fra il 25% e il 40% (Di Mascio et al., 2009; Di Mascio et al., 2010; Domenichini et al., 2006; Roads, 2006; Walloon Ministry of Infrastructure and Transport, 2006; Gajda e Van Geem, 1997) evidentemente in funzione del progetto, delle macchine e dei materiali impiegati.

1.4.4 Gestione dei sottoservizi

Per garantire la durabilità di una pavimentazione in calcestruzzo, è indispensabile la preliminare pianificazione dei sottoservizi, soprattutto in ambito urbano. La ra-

zionalizzazione delle infrastrutture sotterranee è finalizzata alla limitazione degli interventi futuri e al contenimento di eventuali interventi demolitivi della pavimentazione, causa di diseconomie nel medio e lungo termine. Ove possibile, i sottoservizi non devono trovarsi al di sotto delle corsie di marcia, ma le reti devono preferibilmente essere ubicate sotto ai margini della sede stradale.

2 DIMENSIONAMENTO



Il dimensionamento delle pavimentazioni in calcestruzzo e in conglomerato bituminoso viene eseguito facendo riferimento allo spettro di traffico previsto nel Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali per le strade extraurbane secondarie ordinarie. La verifica degli spessori di pavimentazione viene effettuata sul criterio della verifica a fatica considerando il numero cumulato dei soli veicoli pesanti (cioè di peso totale superiore a 3 tonnellate) che transitano in tutta la vita utile della pavimentazione. Infatti tale verifica non è influenzata dai veicoli leggeri. In particolare, verranno esaminati tre livelli di traffico:

1. 1,5 milioni di passaggi di veicoli pesanti nella vita utile (di seguito T1);
2. 4 milioni di passaggi di veicoli pesanti nella vita utile (di seguito T2);
3. 10 milioni di passaggi di veicoli pesanti nella vita utile (di seguito T3).

Il traffico T1 è un traffico pesante tipico di strade extraurbane quali per esempio la SS7 (Appia) nei pressi di Monte San Biagio (LT); il traffico T2 può essere considerato caratteristico dei tratti della SS4 (Salaria) vicino a Fara Sabina (RI), mentre il traffico T3 è tipico di tratti a maggior traffico pesante quali per esempio la SS1 (Aurelia) nei pressi di Fiumicino o di Montalto di Castro (VT).

2.1 GENERALITÀ SUI METODI DI CALCOLO DELLE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO

Per il dimensionamento delle pavimentazioni stradali in calcestruzzo si può far riferimento a numerosi metodi e procedure consolidate. In generale si possono distinguere due categorie di metodi di calcolo: i metodi empirici e i metodi razionali. I primi sono basati unicamente su dati sperimentali riguardanti il comportamento nel tempo di pavimentazioni esistenti aperte al traffico o di sezioni stradali (piste sperimentali) appositamente costruite. Dall'osservazione del comportamento nel tempo di queste pavimentazioni sono stati definiti dei diagrammi di facile impiego in cui in funzione di pochi parametri (per esempio la portanza del sottofondo e il numero di ripetizioni di carico di un asse stabilito) si determinano gli spessori degli strati della pavimentazione. È evidente che questi metodi possono fornire risultati validi solo se vengono impiegati per il dimensionamento di pavimentazioni che si trovano in condizioni ambientali e costitutive molto simili a quelle del campo di sperimentazione.

Per ampliare il campo di impiego di tali metodi sono nati i metodi semi-empirici che, pur fornendo ancora diagrammi di dimensionamento di impiego immediato, hanno corretto i dati empirici mediante opportune interpretazioni su base teorica dei comportamenti rilevati. Fra questi metodi si può citare quello dell'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) del 1993.

Per analisi più approfondite, riguardanti specifici aspetti del problema strutturale del dimensionamento, bisogna ricorrere a indagini del tipo cosiddetto "razionale".

Le fasi di un metodo di calcolo razionale sono sostanzialmente due:

- calcolo delle sollecitazioni e delle deformazioni indotte dai carichi di traffico e dalle escursioni termiche;
- verifica del danno cumulato della pavimentazione.

In genere nella prima fase per le pavimentazioni in calcestruzzo si fa ricorso a metodi di analisi basati sulle teorie delle lastre sottili e in particolare sulla soluzione di Westergaard. La seconda fase viene invece espletata con l'utilizzo di curve di fatica e di evoluzione degli ammaloramenti durante la vita utile, sperimentalmente sviluppate da diversi Enti. Recentemente, nel 2002, è stato infine sviluppato il metodo meccanicistico della AASHTO, che utilizza curve derivate dai dati raccolti durante il programma di ricerca LTPP (Long Term Pavement Performance).

All'Università di Roma La Sapienza è stato messo a punto un programma di verifica strutturale e analisi economica di pavimentazioni in calcestruzzo, Economic Sustainability of Concrete pavements (ESC). L'analisi strutturale delle lastre è condotta secondo la teoria delle lastre sottili, verificate a fatica secondo la legge di Miner. Il programma consente una rapida valutazione della pavimentazione dimensionata, non solo relativamente alla resistenza strutturale, ma anche in relazione alle prestazioni funzionali in esercizio, dalle quali dipendono gli interventi di manutenzione preventiva e a guasto che concorrono alla valutazione del costo complessivo della pavimentazione.

In questo studio, il dimensionamento delle pavimentazioni in calcestruzzo verrà effettuato con due metodi:

- CNR B.U. 178/95 "Catalogo delle pavimentazioni stradali";
- AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials "Guide for Design of Pavement Structures", Washington D.C., 1993.

2.2 DEFINIZIONE DEI DATI DI INPUT

2.2.1 Traffico

Il traffico di progetto T delle pavimentazioni oggetto di studio è stato definito sulla base dei dati complessivi indicati nel paragrafo 2.

Per il calcolo del TGM (Traffico Giornaliero Medio), il traffico è assunto costante e diverso da zero solo nei 300 giorni feriali annui in cui statisticamente si registra la maggior parte del transito dei veicoli pesanti considerati ai fini del calcolo.

Si stima inoltre per il traffico annuo un incremento variabile nel corso degli anni i , in linea con le previsioni economiche di andamento del PIL in Italia nei prossimi decenni. In particolare, il tasso di crescita sarà dapprima nullo, poi crescente fino a un massimo stimato del 1% a 20 anni (per vita utile V_a) o del 1,5% a 30 anni (per vita utile V_b), come risulta in Tabella 2

$$T = \sum_i TGM_i \cdot 300 = 17955140$$

Anno	i%	TGM	Anno	i%	TGM
1	0,8	1775	16	1	1903
2	1,1	1775	17	1	1922
3	1,1	1775	18	1	1942
4	1,1	1784	19	1	1961
5	1,1	1793	20	1	1981
6	0,5	1802	21	1	2000
7	0,5	1811	22	1	2020
8	0,5	1820	23	1	2041
9	0,5	1829	24	1	2061
10	0,5	1838	25	1	2082
11	0,5	1847	26	1	2102
12	0,5	1856	27	1,5	2134
13	0,5	1866	28	1,5	2166
14	0,5	1875	29	1,5	2198
15	0,5	1884	30	1,5	2231

Tabella 2: Andamento del TGM

Definito il numero complessivo di passaggi di veicoli commerciali nella vita utile e il tasso di crescita del traffico, ne consegue che i valori del TGM iniziale ($TGM_{0,a}$ per vita utile V_a e traffico T_1 , $TGM_{0,b}$ per vita utile V_b sono riportati in Tabella 3.

	T1	T2	T3
$TGM_{0,a}$	222	590	1476
$TGM_{0,b}$	137	365	912

Tabella 3: Traffico giornaliero medio per i sei scenari esaminati

Lo spettro di traffico secondo cui è ripartita la circolazione di veicoli commerciali è riportato in Tabella 4.

N.	Tipo veicolo															
	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 e autoarticolati	Mezzi d'opera	Autobus	Autobus	Autobus					
% passaggi	0	0	58,8	29,4	0	5,9	0	2,8	0	0	0	0	0,2	0	0	2,9

Tabella 4: Spettro di traffico di progetto

2.2.2 Fattori climatici

I dati climatici di progetto recepiscono quanto previsto nel Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali, in cui si assume che le condizioni climatiche di progetto siano differenti secondo il tipo di sovrastruttura per tener conto della diversa sensibilità delle varie soluzioni alle variazioni di temperatura. Per le pavimentazioni flessibili e semirigide si fa riferimento a situazioni climatiche medie dell'Italia Centrale e per le pavimentazioni rigide si fa riferimento a situazioni climatiche medie dell'Italia Settentrionale. I valori medi stagionali di progetto per le sovrastrutture flessibili sono riportati in Tabella 5.

	Temperatura giornaliera media stagionale dell'aria (°C)	Escursione termica giornaliera media stagionale (°C)	Velocità del vento media annuale (km/h)
Inverno	4.5	6	13
Primavera	11.5	7.5	
Estate	22.0	10.6	
Autunno	14.0	8.3	

Tabella 5: Condizioni climatiche di progetto per sovrastrutture flessibili

I valori medi stagionali di progetto per le sovrastrutture rigide sono riportati in Tabella 6.

	Temperatura giornaliera media stagionale dell'aria (°C)	Escursione termica giornaliera media stagionale (°C)	Velocità del vento media annuale (km/h)
Inverno	5.03	7.66	12.45
Primavera	13.39	10.66	
Estate	23.93	12.38	
Autunno	15.03	9.39	

Tabella 6: Condizioni climatiche di progetto per sovrastrutture rigide

Nel caso delle gallerie lunghe fino a 600 m, gli effetti delle variazioni termiche sulle sollecitazioni totali che si registrano nelle pavimentazioni si possono considerare alla stessa stregua di quelli che si hanno sulle pavimentazioni stradali all'aperto. In questo studio le condizioni climatiche sono state considerate costanti lungo tutta la lunghezza delle gallerie. Ciò comporta un sovradimensionamento degli spessori delle pavimentazioni (e quindi dei costi di primo impianto) più accentuato nel caso delle pavimentazioni in calcestruzzo.

2.2.3 Portanza del sottofondo

Dal momento che lo studio esamina condizioni medie di progetto, la portanza del sottofondo è assunta pari a 90 MPa di Modulo resiliente. Tale valore è intermedio tra quelli di progetto previsti nel Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali (minimo 30 MPa e massimo 150 MPa).

2.3 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE PAVIMENTAZIONI

Il dimensionamento e la verifica delle pavimentazioni è stato effettuato con due diversi metodi di calcolo:

- Catalogo delle Pavimentazioni Stradali (CNR 178/95);
- guida AASHTO 1993.

2.3.1 Il catalogo CNR 178/95 delle pavimentazioni stradali

Per le strade oggetto di studio, di tipo extraurbana secondaria, tenuto conto delle ipotesi esposte, le schede 4RG e 4F del Catalogo CNR prevedono le seguenti soluzioni (Tabella 7 e Tabella 8):

	T1	T2	T3
Lastra in calcestruzzo (cm)	18	20	23
Fondazione in misto cementato (cm)	15	15	15
Fondazione in misto granulare non legato (cm)	15	15	15

Tabella 7: Soluzioni di progetto per sovrastrutture rigide - scheda 4RG

	T1	T2	T3
Usura in conglomerato bituminoso (cm)	4	5	5
Binder in conglomerato bituminoso (cm)	5	6	6
Base in conglomerato bituminoso (cm)	12	13	17
Fondazione in misto granulare non legato (cm)	15	15	15

Tabella 8: Soluzioni di progetto per sovrastrutture flessibili - scheda 4F

2.3.2 Guida AASHTO 1993 - pavimentazioni in calcestruzzo

La guida AASHTO del 1993 fornisce la seguente espressione per il calcolo del numero di passaggi di assi equivalenti da 8.16 t (ESAL) che la pavimentazione rigida può sopportare nel corso della vita utile di progetto:

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 PSI_{finale}) \log \frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right]}$$

dove:

- W_{18} = numero di assi equivalenti da 18 kips (8,16 t);
- Z_R = deviazione standard normalizzata;

- S_0 = deviazione standard = 0.30-0.40; per le pavimentazioni rigide la guida consiglia $S_0=0.34$;
- D = spessore della lastra in calcestruzzo, in inch;
- $\Delta PSI = PSI_{iniziale} - PSI_{finale}$;
- PSI = Present Serviceability Index;
- S'_c = resistenza a trazione per flessione del calcestruzzo in libbre/inch²;
- J = coefficiente di trasferimento del carico tra lastre adiacenti;
- C_d = coefficiente di drenaggio;
- E_c = modulo di elasticità del calcestruzzo in libbre/inch²;
- K = modulo di reazione del sottofondo in libbre/inch³.

Per il calcolo di W_{18} sono state assunte le ipotesi riportate in Tabella 9,

$PSI_{iniziale}$	4,5	
ΔPSI	2,0	
Z_r	-1,037	affidabilità = 85%
S_0	0,34	
k	27,70	kg/cm ³
S'_c	50	kg/cm ²
J	3,2	
E_c	400000	kg/cm ²

Tabella 9: Dati per il calcolo del numero di ripetizioni di progetto

Per ottenere il numero di ripetizioni in termini di assi equivalenti da 81.6 kN, N_{18} (ESAL), sono state adottate le consolidate relazioni della guida AASHTO 1993. In Tabella 10 sono riportati i valori di W_{18} e N_{18} per le configurazioni esaminate.

Livello di traffico	W_{18}	N_{18}	Verifica $W_{18} > N_{18}$
T1	7,53E+06	2,74E+06	sì
T2	1,24E+07	7,42E+06	sì
T3	2,62E+07	1,91E+07	sì

Tabella 10: Verifica AASHTO 1993 per le pavimentazioni rigide

Le pavimentazioni rigide oggetto di studio sono verificate con un sufficiente margine di sicurezza.

2.3.3 Guida AASTO 1993 - pavimentazioni in conglomerato bituminoso

La guida AASHTO del 1993 fornisce la seguente espressione per il calcolo del numero di assi equivalenti da 8.16 t (ESAL) che la pavimentazione flessibile può sopportare nel corso della vita utile di progetto:

$$\log W_{18} = Z_r \cdot S_0 + 9.36 \cdot (\log SN + 1) - 0.2 + \frac{\log \frac{PSI_{iniziale} - PSI_{finale}}{4.2 - 1.5}}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log M_r - 8.07$$

dove:

- W_{18} = numero di assi equivalenti da 18 kips (8,16 t);
- Z_R = deviazione standard normalizzata;
- S_0 = deviazione standard = 0.40-0.50; per le pavimentazioni flessibili la guida consiglia $S_0=0.45$;
- SN = indicatore della resistenza strutturale della pavimentazione, in pollici;
- $\Delta PSI = PSI_{iniziale} - PSI_{finale}$;
- PSI = Present Serviceability Index;
- M_r = modulo resiliente del sottofondo, in psi;

Per il calcolo di W_{18} sono state assunte le ipotesi riportate in Tabella 11,

PSI _{iniziale}	4,2		
ΔPSI	1,7		
Z_r	-1,037		affidabilità = 85%
S0	0,45		
CBR	9	%	
M_r	900	kg/cm ²	13500psi
SN	3,53		

Tabella 11: Dati per il calcolo del numero di ripetizioni di progetto

Per ottenere il numero di ripetizioni in termini di assi equivalenti da 81.6 kN N_{18} (ESAL) sono state adottate le consolidate relazioni della guida AASHTO 1993.

Livello di traffico	W_{18}	N_{18}	Verifica $W_{18} > N_{18}$
T1	5,57E+06	2,69E+06	sì
T2	1,19E+07	7,06E+06	sì
T3	2,34E+07	1,77E+07	sì

Tabella 12: Verifica AASHTO 1993 per le pavimentazioni flessibili

Le pavimentazioni flessibili oggetto di studio sono verificate con un sufficiente margine di sicurezza.

3 ANALISI ECONOMICA DEI COSTI DI COSTRUZIONE E MANUTENZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI

L'analisi economica dei lavori di stesa e manutenzione delle pavimentazioni riportate al paragrafo 2.3 è stata condotta nell'ipotesi che sia la pavimentazione rigida sia la pavimentazione flessibile siano poste in opera in un'unica stesa da una macchina a casseforme scorrevoli o vibrofinitrice i cui cingoli si muovono sul piedritto della galleria (Figura 9).

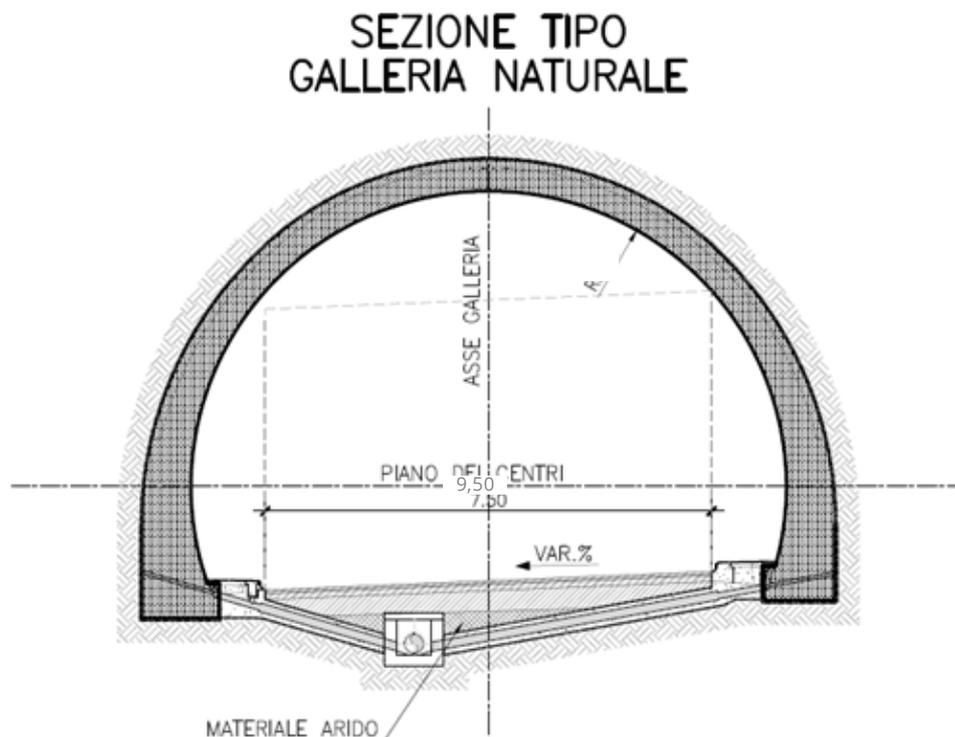


Figura 9: Esempio sezione tipo in galleria naturale

I costi unitari di costruzione e manutenzione sono derivati dall'Elenco prezzi Anas 2015 (Costi elementari - Nuove costruzioni e manutenzione straordinaria - Manutenzione ordinaria).

3.1 CASO A: COSTI DI COSTRUZIONE - PAVIMENTAZIONE A LASTRE NON ARMATE

I dati geometrici della pavimentazione a lastre non armate sono riportati in Tabella 13:

larghezza di stesa	9	m
lunghezza	variabile	m
numero carreggiate	1	
larghezza corsie	3.50	m
spessore calcestruzzo	variabile	m

Tabella 13: Dati di progetto JPCP

Si prevede la realizzazione di una unica stesa, con giunto di contrazione longitudi-

nale simmetrico rispetto alla geometria del fornice. Si ipotizzano lastre quadrate in pianta di lato 4,50 m.

Per le operazioni di posa si assume una velocità di posa pari a 0,6 m/min. Per la manodopera, viste le esperienze europee, si assume una squadra composta da 3 operai specializzati, 2 operai qualificati, 3 operai comuni. La compartecipazione delle lastre sarà garantita da barre lunghe 500 mm, disposte con interasse 35 cm (Tabella 14); trasversalmente, in numero pari a 3 per ciascuna lastra, verranno disposti ferri di legatura di diametro 20 mm lunghi ciascuno 800 mm (Tabella 15).

		Livello di traffico		
		T1	T2	T3
Diametro	mm	16	20	22
Interasse	m	0.30	0.30	0.30
Lunghezza	mm	500	500	500

Tabella 14: Dati barre di compartecipazione JPCP

Diametro	20	mm
Numero per lastra	3	
Lunghezza	0.8	m

Tabella 15: Ferri di legatura

I ferri di legatura sono disposti su appoggi puntuali in materiale plastico. Sia le operazioni di taglio e pulizia sia le operazioni di sigillatura e riempimento dei giunti sono svolte da una squadra di tre operai, con produzione oraria di 30 m/h. Si assume che il trasporto del calcestruzzo avvenga con autobetoniera dalla centrale di betonaggio al cantiere, distante 3 km.

Il calcestruzzo fresco è trattato con antievaporante e curing (0,2 kg/m² ciascuno). Le corsie di marcia sono delineate con segnaletica orizzontale conforme al Codice della Strada.

I costi di primo impianto sono riportati in Tabella 16:

Costi di primo impianto €/m ²	
T1	62,83
T2	64,89
T3	68,15

Tabella 16: Costi di primo impianto

Questi costi sono maggiori di quelli di altri Paesi Europei (ad es. Belgio o Austria) nei quali la tecnologia delle pavimentazioni in calcestruzzo è consolidata da anni. In Italia il costo di primo impianto potrebbe diminuire negli anni, man mano che le imprese acquisteranno il know-how.

3.2 CASO B: COSTI DI COSTRUZIONE PAVIMENTAZIONE IN CONGLOMERATO BITUMINOSO

I dati geometrici della pavimentazione flessibile sono riportati in Tabella 17:

Larghezza	9	m
Lunghezza	variabile	m
Numero carreggiate	1	
Larghezza corsie	3.50	m

Tabella 17: Dati di progetto pavimentazioni flessibili

I costi di primo impianto sono riportati in Tabella 18:

	Costo di primo impianto €/m ²
T1	31,55
T2	35,57
T3	40,24

Tabella 18: Costi di primo impianto pavimentazione flessibile

3.3 CASO A: COSTI DI MANUTENZIONE PAVIMENTAZIONE A LASTRE NON ARMATE

Per le pavimentazioni a lastre non armate, le tipologie di interventi manutentivi previsti sulla pavimentazione sono:

- il ripristino dell'aderenza superficiale;
- la sigillatura dei giunti.

In Tabella 19 è riportato il programma degli interventi di manutenzione ordinaria previsti.

Tipo di intervento	Anno	Estensione	
Sigillatura dei giunti	10	100%	Lunghezza giunti
Sigillatura dei giunti	15	60%	Lunghezza giunti
Ripristino aderenza superficiale	15	100%	Corsie di marcia
Sigillatura dei giunti	20	60%	Lunghezza giunti
Ripristino aderenza superficiale	25	100%	Corsie di marcia
Sigillatura dei giunti	25	60%	Lunghezza giunti

Tabella 19: Esempio di piano di manutenzione ordinaria su pavimentazione in calcestruzzo

I costi degli interventi di manutenzione sono calcolati sulla base di prezzi presenti nell'Elenco prezzi ANAS 2015 e di prezzi in possesso dell'Università utilizzati recentemente per studi simili. L'analisi dei costi ha tenuto conto dei valori del tasso di inflazione e del tasso di sconto assunti costanti durante l'intera vita utile (valori medi

ultimi 15 anni in Italia e previsioni del Fondo Monetario Internazionale - Tabella 20).

Tasso di inflazione	Tasso di sconto
0.015	0.004

Tabella 20: Tasso di inflazione e tasso di sconto

I costi di manutenzione sostenuti all'anno x , assunto 0 l'anno di costruzione, sono rivalutati rispetto ai prezzi dell'anno di costruzione attraverso il tasso di inflazione:

$$C_x = C_0(1 + i)^x$$

in cui:

C_x è il costo di manutenzione all'anno x ;
 C_0 è il costo di manutenzione nell'anno di costruzione;
 i è il tasso di inflazione.

I costi di manutenzione così calcolati sono attualizzati all'anno 0 secondo la:

$$C_{A,x} = \frac{C_x}{(1 + r)^x}$$

in cui:

$C_{A,x}$ è il costo di manutenzione sostenuto all'anno x attualizzato all'anno di costruzione;
 r è il premio di rischio annuale, pari alla somma del tasso di inflazione e del tasso di sconto.

I costi di manutenzione, attualizzati all'anno di costruzione delle pavimentazioni a lastre non armate, sono riportati in Tabella 21:

	Costo di manutenzione €/m ²	
	Vita utile 20 anni - Va	Vita utile 30 anni - Vb
T1 - T2 - T3	5,16	10,12

Tabella 21: Costi di manutenzione JPCP

3.4 CASO B: COSTI DI MANUTENZIONE PAVIMENTAZIONE IN CONGLOMERATO BITUMINOSO

Per le pavimentazioni flessibili, le tipologie di interventi manutentivi previsti sono:

- l'asportazione e rappezzo degli strati di usura e binder;
- la fresatura e rifacimento dello strato di usura;
- il risanamento profondo.

In Tabella 22 è riportato il programma degli interventi di manutenzione ordinaria previsti.

Tipo di intervento	Anno	Estensione	
Asportazione e rappezzo usura+binder	4	1%	Corsie di marcia
Fresatura e rifacimento usura	9	100%	Corsie di marcia + banchina
Asportazione e rappezzo usura+binder	14	2%	Corsie di marcia
Risanamento profondo (usura+binder)	18	100%	Corsie di marcia + banchina
Asportazione e rappezzo usura+binder	23	1%	Corsie di marcia
Fresatura e rifacimento usura	27	100%	Corsie di marcia + banchina

Tabella 22: Esempio di piano di manutenzione ordinaria su pavimentazione flessibile

I costi di manutenzione, attualizzati all'anno di costruzione delle pavimentazioni flessibili, sono riportati in Tabella 23:

Costo di manutenzione €/m ²		
Livello di traffico	Vita utile 20 anni - Va	Vita utile 30 anni - Vb
T1	30,25	41,53
T2	37,22	51,32
T3	37,22	51,32

Tabella 23: Costi di manutenzione pavimentazioni flessibili

4 ILLUMINAZIONE



Le valutazioni riguardanti l'impianto di illuminazione sono state sviluppate secondo quanto previsto dalle seguenti normative:

- UNI 11095:2011 Illuminazione delle gallerie stradali;
- UNI 10439:2001 Illuminotecnica – Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato;
- UNI 11248:2012 Illuminazione stradale - Selezione delle categorie illuminotecniche;
- UNI EN 13201-2:2004 Illuminazione stradale - Parte 2: Requisiti prestazionali.

La Norma UNI 11095 suddivide la sezione longitudinale del tunnel in cinque zone di riferimento per la prescrizione dei requisiti illuminotecnici durante le ore diurne:

- zona di accesso: costituita dal tratto precedente l'ingresso in galleria. In essa, un'automobilista deve poter vedere all'interno del tunnel un eventuale ostacolo entro una distanza pari a quella di arresto;
- zona di soglia: costituita dal tratto iniziale del tunnel. La sua illuminazione dipende dalla luminanza nella zona di accesso e la sua lunghezza è pari alla distanza di visibilità per l'arresto calcolata alla velocità di progetto;
- zona di transizione: tratto di tunnel in cui i livelli di luminanza devono essere gradualmente ridotti per consentire il progressivo adattamento dell'occhio;
- zona interna: tratto interno del tunnel, in cui i livelli di luminanza sono normalmente mantenuti a un valore costante;
- zona di uscita: zona terminale del tunnel. In questa zona solitamente la visibilità non è critica in quanto gli eventuali ostacoli sono individuati come corpi scuri su fondo chiaro.

La Norma UNI 11095 richiede il calcolo della luminanza debilitante L_v per la determinazione dei valori di luminanza da garantire all'interno della galleria:

$$L_v = L_{seq} + L_{atm} + L_{par} + L_{cru}$$

dove L_{seq} è la luminanza debilitante, L_{atm} è la luminanza atmosferica, L_{par} è la luminanza del parabrezza e L_{cru} è la luminanza del cruscotto.

Per il calcolo di L_v si è tenuto conto della velocità di progetto di 90 km/h; della visibilità meteorologica V_m pari a 10 km e di un illuminamento orizzontale E_h di 58 klux.

A partire dal valore di L_v si può determinare la luminanza da garantire nella zona di soglia, che deve risultare non inferiore al valore:

$$L_e = c \cdot L_v$$

in cui c è un fattore dipendente dal tipo di impianto, pari a 0.23 per un impianto di tipo a controflusso (flusso luminoso diretto contro il senso di marcia).

La luminanza media mantenuta della zona interna L_i deve essere:

$$L_i \geq 2 \cdot L_e$$

essendo L il valore minimo della luminanza media prescritta dalle norme UNI 11248:2007 e UNI EN 13201-2:2004.

Trattandosi di strada extraurbana secondaria classificata dalla norma UNI 10439 con indice della categoria illuminotecnica 5 (ME3a secondo la UNI EN 13201), ma dato che l'impianto permanente prevede l'uso di lampade a LED (indice di resa cromatica molto elevato, superiore a 60), ai sensi della norma UNI 11248:2012 si può applicare la riduzione di un livello alla categoria illuminotecnica, pertanto si considera la categoria 4 (ME3b secondo la UNI EN 13201), per la quale:

$$L = 1 \text{ cd/m}^2$$

$$U_{0_{\text{minimo}}} = 0,4$$

$$U_{I_{\text{minimo}}} = 0,6$$

$$T_{I_{\text{massimo}}} = 0,15$$

Pertanto nella zona interna delle gallerie oggetto di studio, l'impianto di illuminazione permanente fornirà un valore di luminanza media non inferiore a:

$$L_i \geq 2 \times 1 = 2 \text{ cd/m}^2$$

4.1 LUMINANZA

Tenuto conto delle considerazioni di cui sopra, la curva di luminanza delle gallerie in esame, calcolata in condizioni medie per il contesto nazionale, è riportata in Figura 10, essendo 130 cd/m^2 la luminanza di entrata.

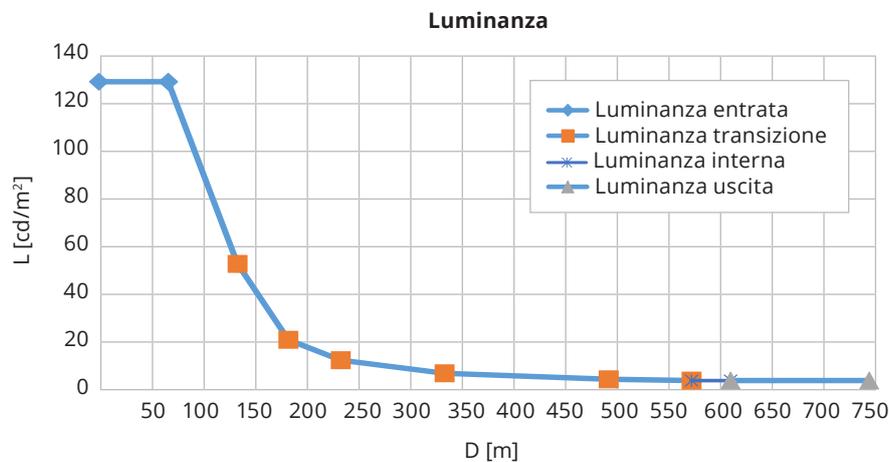


Figura 10: Curve di luminanza

Alle curve di luminanza di Figura 10 si associano le curve di illuminamento di Figura 11, tracciate rispettivamente per i casi di pavimentazione della galleria in conglomerato bituminoso (c.b.) e in calcestruzzo (cls), ossia tenendo conto dei diversi valori dei coefficienti fotometrici di riflessione del materiale che costituisce lo strato superficiale della pavimentazione.

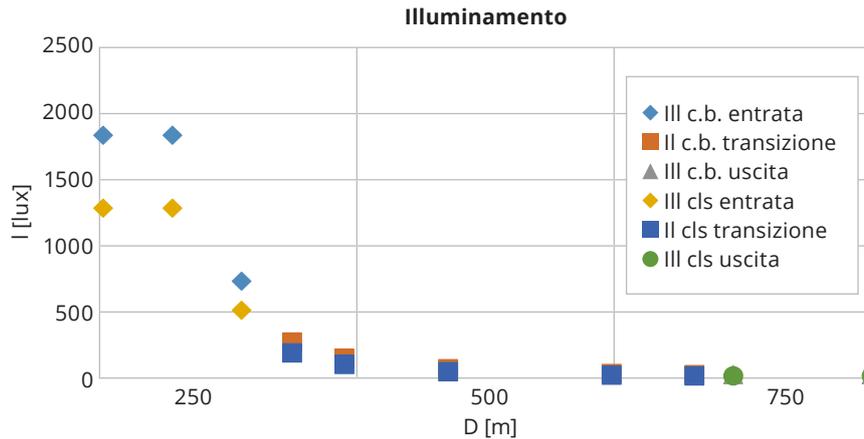


Figura 11: Curve di illuminamento

4.2 CALCOLO ILLUMINOTECNICO

Ai fini del calcolo illuminotecnico, si considerano cinque lunghezze di galleria: 750, 1000, 1250, 1500 e 2000 m.

L'impianto illuminotecnico di ciascuna corsia di marcia presente nelle gallerie oggetto di studio è composto da un impianto permanente e sette impianti di rinforzo. Gli apparecchi sono disposti su fila unica (impianto permanente) o su due file a quinconce (impianti di rinforzo).

La spaziatura tra gli apparecchi è tale da prevenire l'effetto Flicker, ovvero minore di 2,27 m (frequenza 11 Hz) o maggiore di 6,25 m (frequenza 4 Hz).

Tutti i calcoli sono stati eseguiti assumendo un coefficiente di manutenzione pari a 0.9; la classe di riflessione C1 per la pavimentazione stradale in calcestruzzo (norma UNI 10439) e C2 per la pavimentazione in conglomerato bituminoso; un fattore di riflessione diffuso medio delle pareti pari a 0.5.

Per il calcolo della curva minima da rispettare è stato adottato il sistema con "osservatore variabile" in quanto con questo metodo viene garantito il massimo risparmio energetico. Per rispettare la curva di luminanza si sono divise le zone di entrata e transizione in più tratti a luminanza costante, con rapporto tra il valore della luminanza di ciascun gradino non minore della metà della luminanza del gradino precedente (Figura 12 e Tabella 24).

Tipo di impianto	Progressiva m	Luminanza di progetto cd/m ²
Permanente	0-fine galleria	2
rinforzo1	0-80	130
rinforzo2	80-115	110
rinforzo3	115-155	80
rinforzo4	155-200	40
rinforzo5	200-250	20
rinforzo6	250-350	10
rinforzo7	350-577	5

Tabella 24: Luminanza di progetto per tipo di impianto

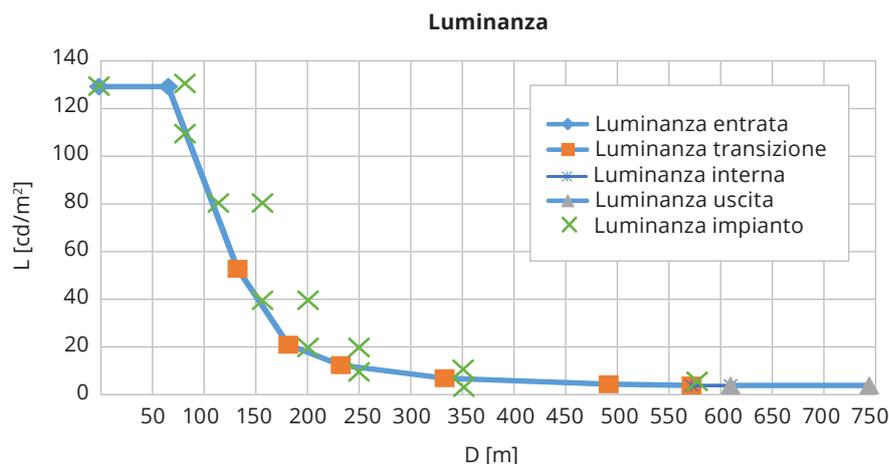


Figura 12: Curve di luminanza di progetto e di impianto per gallerie lunghe 750m

4.2.1 Potenza di illuminamento complessiva degli impianti di illuminazione

Tenuto conto dei requisiti illuminotecnici sopra illustrati, gli impianti sono stati dimensionati e verificati con il software Prolite 7.0. In Tabella 25 è riportata la potenza nominale assorbita dagli impianti di illuminazione di entrambe le corsie nelle due configurazioni di pavimentazione stradale per la galleria lunga 750 m.

A parità di luminanza sul manto stradale, l'impianto di illuminazione in presenza di pavimentazione in calcestruzzo richiede una potenza complessiva media inferiore del 29% rispetto a quanto verificato in presenza di pavimentazione in conglomerato bituminoso.

	Potenza assorbita [W]	
	Pavimentazione in calcestruzzo	Pavimentazione in conglomerato bituminoso
Impianto permanente	6143	8663
Zona rinforzo 1	33281	48244
Zona rinforzo 2	13933	19867
Zona rinforzo 3	11609	15996
Zona rinforzo 4	6561	9094
Zona rinforzo 5	3535	4921
Zona rinforzo 6	2919	4319
Zona rinforzo 7	3448	4974

Tabella 25: Dettaglio della potenza nominale assorbita galleria 750 m

In Tabella 26 è riportata la potenza nominale complessiva assorbita dagli impianti di illuminazione di entrambe le corsie di marcia nelle due configurazioni di pavimentazione stradale per le cinque lunghezze di galleria esaminate.

Lunghezza galleria (m)	Potenza nominale assorbita (W)	
	Pavimentazione in calcestruzzo	Pavimentazione in conglomerato bituminoso
750	81429	107415
1000	83476	118965
1250	85523	121852
1500	87571	124740
2000	91666	130515

Tabella 26: Potenza nominale assorbita

4.3 COSTI DI INSTALLAZIONE DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

Tenuto conto dell'Elenco prezzi ANAS 2015 Impianti tecnologici e del costo di fornitura e posa in opera degli apparecchi di illuminazione modulare a LED per illuminazione permanente e di rinforzo in galleria, sono stati calcolati i costi di installazione degli impianti dimensionati (Tabella 27).

Lunghezza galleria (m)	Costo di installazione (€)	
	Pavimentazione in calcestruzzo	Pavimentazione in conglomerato bituminoso
750	732000	1024000
1000	758000	1058000
1250	785000	1094000
1500	811000	1130000
2000	863000	1202000

Tabella 27: Costi di installazione impianti di illuminazione

4.4 COSTI DI ESERCIZIO DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

Il calcolo dei costi di illuminazione tiene conto del fatto che la potenza dell'impianto illuminotecnico deve essere regolata sia nel corso delle 24 ore sia nel corso dell'anno solare, sia per motivi legati alla variazione della luminanza esterna, sia per esigenze di risparmio energetico.

Si assume pertanto che in un anno solare la potenza media assorbita dall'impianto sia distribuita secondo quanto riportato in Tabella 28:

	Ore/anno	Potenza media assorbita / Potenza nominale
Giornate luminose	2950	100
Giornate nuvolose	700	40
Ore alba-tramonto	1460	50
Notte	3650	20

Tabella 28: Potenza assorbita

In Tabella 29 è riportato il prezzo medio effettivo globale dell'energia elettrica (for-

nitura energia elettrica per utenze di illuminazione pubblica in media tensione) considerato nel presente studio (Moretti, L., Cantisani, G., Di Mascio, P. 2016):

Prezzo medio energia elettrica [€/kWh]		
ore 8-19 lun-ven	ore 7-8 e 19-23 lun-ven ore 7-23 sab	ore 0-7 e 23-24 lun-sab ore 0-24 dom ore 0-24 festivi
F1	F2	F3
0,154	0,154	0,149

Tabella 29: Prezzo dell'energia elettrica

Tenuto conto della potenza nominale dell'impianto di illuminamento e della potenza realmente assorbita, in Tabella 30 e Tabella 31 sono riportati i consumi annuali per l'illuminazione dei due fornic in presenza di pavimentazione in calcestruzzo e in conglomerato bituminoso.

	Consumo effettivo [kWh/anno]		
	F1	F2	F3
Impianto permanente	1,10E+04	4,14E+03	3,08E+03
Giornate luminose	1,35E+05	5,08E+04	3,78E+04
Giornate nuvolose	1,20E+04	3,01E+03	6,02E+03
Ore alba-tramonto	0,00E+00	5,70E+04	1,17E+04
Notte	0,00E+00	0,00E+00	4,95E+04

Tabella 30: Consumo con pavimentazione in calcestruzzo

	Consumo effettivo [kWh/anno]		
	F1	F2	F3
Impianto permanente	1,55E+04	5,84E+03	4,35E+03
Giornate luminose	1,92E+05	7,24E+04	5,39E+04
Giornate nuvolose	1,72E+04	4,30E+03	8,59E+03
Ore alba-tramonto	0,00E+00	8,13E+04	1,67E+04
Notte	0,00E+00	0,00E+00	7,06E+04

Tabella 31: Consumo con pavimentazione in conglomerato bituminoso

Il costo dell'illuminazione delle gallerie oggetto dello studio, calcolato all'anno di costruzione e arrotondato al migliaio di euro, è riportato in Tabella 32.

Lunghezza galleria (m)	Costo di illuminazione (€/anno)	
	Pavimentazione in calcestruzzo	Pavimentazione in conglomerato bituminoso
750	58000	83000
1000	59000	84000
1250	60000	85000
1500	61000	87000
2000	63000	89000

Tabella 32: Costi di illuminazione

4.5 COSTI DI MANUTENZIONE DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

Per la manutenzione degli impianti di illuminazione, si assume che gli apparecchi siano dotati di sistema di dissipazione del calore concepito per la lunga durata dei LED di 80.000 ore a massima resa e che il prodotto sia garantito almeno 5 anni. Con riferimento ai soli interventi di sostituzione delle lampade, si assume che la sostituzione sia programmata con periodicità determinata dalla durata presunta di funzionamento, pari a 80000 ore (Elenco prezzi ANAS Impianti tecnologici 2015). Si assume che le lampade a LED siano sostituite ogni 10 anni, nel corso dei quali garantiscono il mantenimento dei livelli di luminanza prescritti dalla normativa. Ciascun intervento di sostituzione delle lampade LED, previo smontaggio, recupero o smaltimento del corpo illuminante esistente, compreso di ogni altro onere necessario a dare l'opera completa e funzionante, si assume che abbia un costo pari al costo di installazione del sistema di illuminazione.

Per quanto riguarda la pulizia delle lampade, si assume che ogni 2,5 anni vi sia un intervento volto al mantenimento del coefficiente di manutenzione assunto in fase di progettazione. Il costo complessivo dell'intervento di pulizia è stimato pari a 20 €/apparecchio comprensivo di manodopera e nolo del cestello.

In analogia a quanto esposto in 3.3, i costi complessivi di manutenzione degli impianti di illuminazione dimensionati per le gallerie oggetto di studio, attualizzati all'anno di costruzione, sono riportati nella Tabelle 33 e 34.

Lunghezza galleria (m)	Costo di manutenzione dell'impianto di illuminazione - pavimentazione in calcestruzzo(€)	
	Va - 20 anni	Vb - 30 anni
750	796000	1516000
1000	826000	1573000
1250	856000	1629000
1500	886000	1685000
2000	943000	1795000

Tabella 33: Costi attualizzati di manutenzione degli impianti di illuminazione - pavimentazione in calcestruzzo

Lunghezza galleria (m)	Costo di manutenzione dell'impianto di illuminazione - pavimentazione in conglomerato bituminoso (€)	
	Va - 20 anni	Vb - 30 anni
750	1109000	2114000
1000	1146000	2184000
1250	1184000	2258000
1500	1223000	2332000
2000	1301000	2480000

Tabella 34: Costi attualizzati di manutenzione degli impianti di illuminazione - pavimentazione in conglomerato bituminoso

5 ANALISI DEI COSTI
DI COSTRUZIONE E MANUTENZIONE DELLA
PAVIMENTAZIONE E DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE



I costi cumulati e attualizzati di costruzione e manutenzione della pavimentazione e dell'impianto di illuminazione a lampade LED dimensionati secondo la normativa italiana per tre livelli di traffico circolanti su 5 gallerie stradali di lunghezza variabile e geometria conforme al tipo di strada extraurbana secondaria C2 sono di seguito riportati in forma grafica. Gli andamenti riportati si riferiscono all'orizzonte temporale di vita utile pari a 30 anni, i cui risultati sono perfettamente sovrapponibili a quelli ottenuti per l'orizzonte temporale di vita utile pari a 20 anni. Come evidenziato in Figura 19 per le gallerie di 750 m di lunghezza, il traffico non ha molto influenza sul costo attualizzato complessivo della pavimentazione e dell'illuminazione, soprattutto per quanto riguarda la pavimentazione in calcestruzzo.

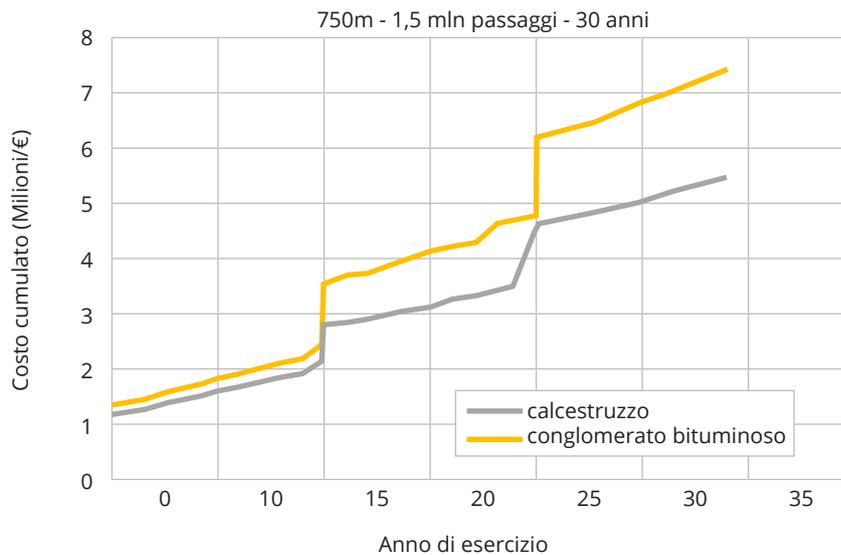


Figura 13: Costi cumulati di costruzione e manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 750 m, traffico T1, vita utile 30 anni

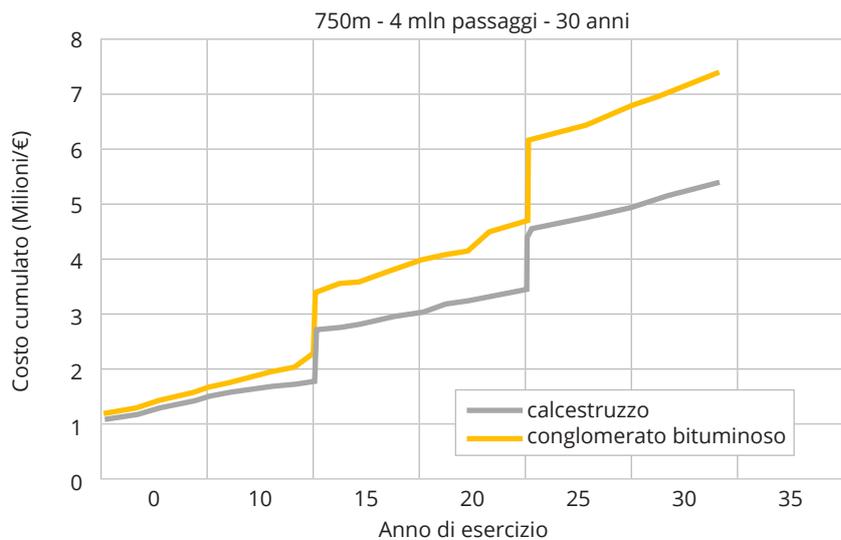


Figura 14: Costi cumulati di costruzione e manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 750 m, traffico T2, vita utile 30 anni

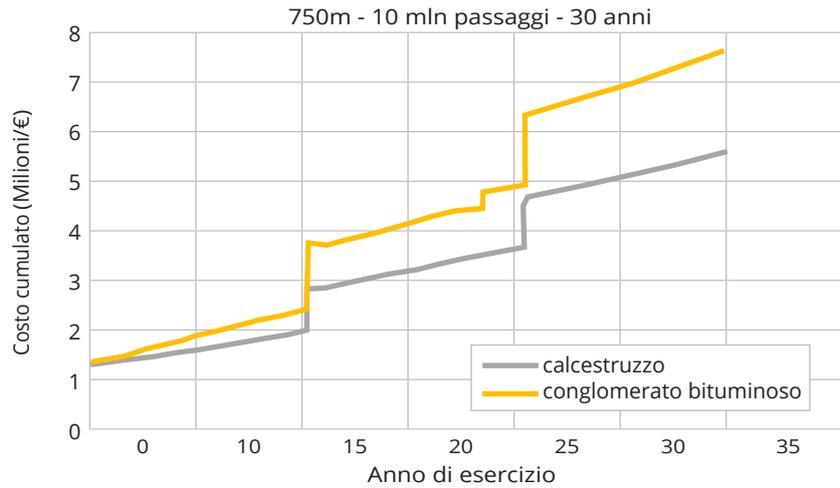


Figura 15: Costi cumulati di costruzione e manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 750 m, traffico T3, vita utile 30 anni

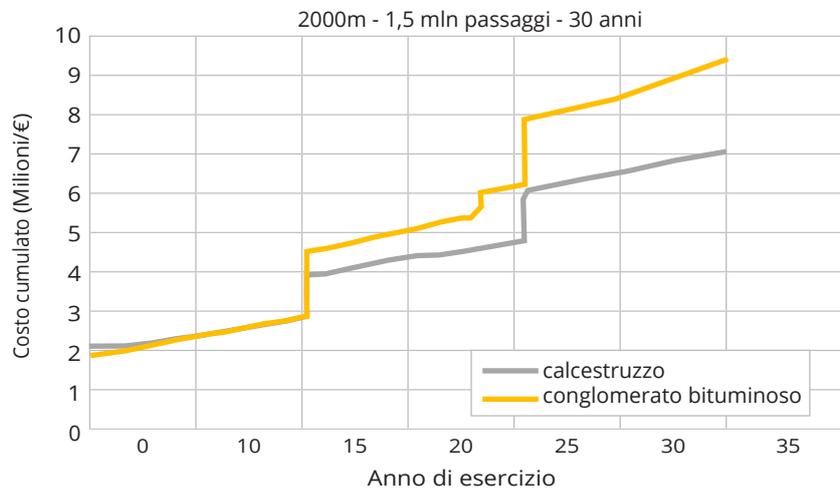


Figura 16: Costi cumulati di costruzione e manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 2000 m, traffico T1, vita utile 30 anni

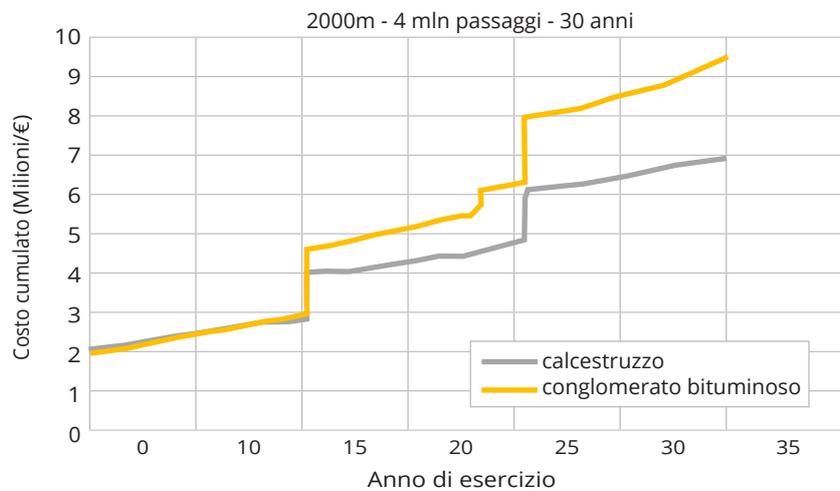


Figura 17: Costi cumulati di costruzione e manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 2000 m, traffico T2, vita utile 30 anni

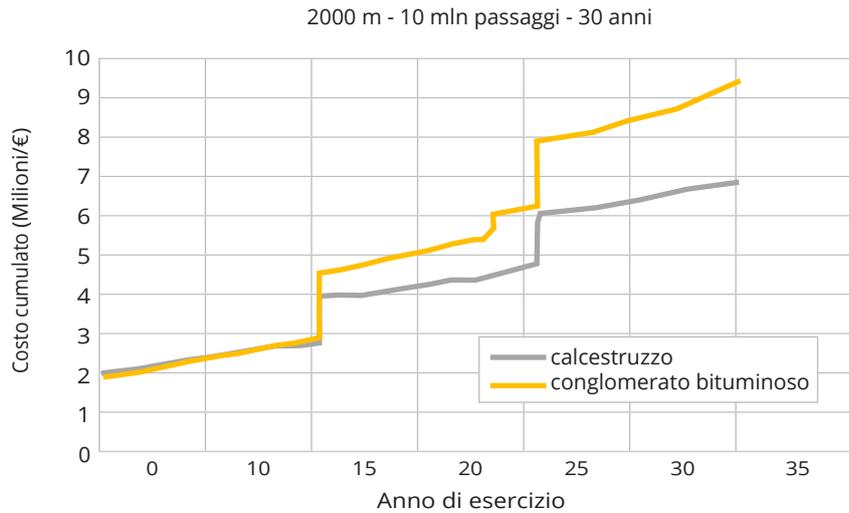


Figura 18: Costi cumulati di costruzione e manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 2000 m, traffico T3, vita utile 30 anni

La stessa evidenza si ha in caso di una vita utile di 20 anni (Figura 20). Si hanno analoghi risultati anche per le altre lunghezze di galleria.

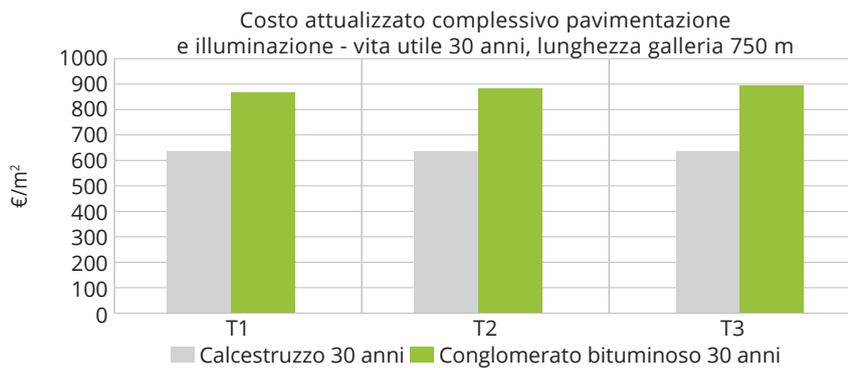


Figura 19: Costo attualizzato di costruzione, manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 750 m per una vita utile di 30 anni

Il dettaglio dei costi di primo impianto della pavimentazione per gallerie interessate da livelli di traffico T1, di installazione dell'impianto di illuminazione e del costo complessivo attualizzato (per una vita utile di 30 anni) sono riportati in Tabella 35.

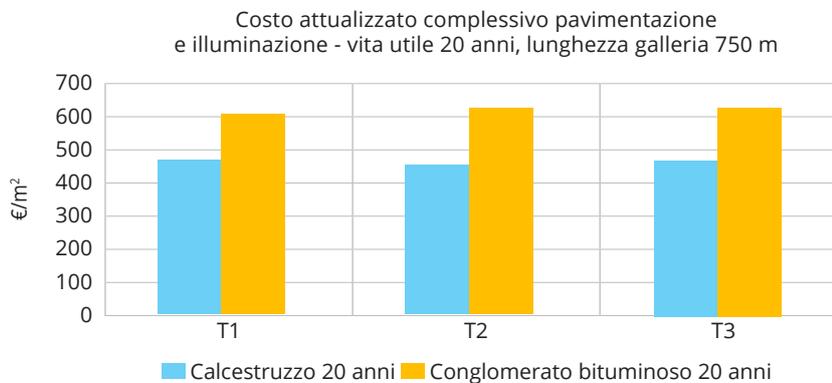


Figura 20: Costo attualizzato di costruzione, manutenzione pavimentazione e impianto di illuminazione – galleria lunga 750 m per una vita utile di 20 anni

tipo pavimentazione	calcestruzzo			conglomerato bituminoso		
	Costi (€)			Costi (€)		
lunghezza galleria (m)	costruzione pavimentazione	costruzione illuminazione	totale attualizzato	costruzione pavimentazione	costruzione illuminazione	totale attualizzato
750	424 128	731 850	4 388 307	212 944	1 023 880	5 899 725
1000	565 470	758 260	4 661 182	283 950	1 057 880	6 286 088
1250	706 837	784 670	4 934 363	354 937	1 093 880	6 597 719
1500	848 205	811 080	5 207 545	425 925	1 129 880	6 909 350
2000	1 128 602	862 510	5 725 149	562 940	1 201 880	7 436 815

Tabella 35: Costi di primo impianto e costo complessivo attualizzato per gallerie interessate da traffico T1 e vita utile 30 anni

6 CONCLUSIONI

È stato eseguito uno studio dei costi di primo impianto, di manutenzione delle pavimentazioni e di illuminazione a LED in gallerie stradali tipiche di strade extraurbane secondarie. Sono stati esaminati tre livelli di traffico per due valori di vita utile (20 e 30 anni) e per cinque lunghezze di galleria, variabili da 750m a 2000m. Per ognuna delle combinazioni di progetto esaminate è stata condotta una valutazione economica delle due soluzioni di pavimentazione, in calcestruzzo a lastre non armate con barre di compartecipazioni ai giunti e in conglomerato bituminoso, allo scopo di evidenziare e limitare i campi di opportunità di investimento.

Nelle gallerie di lunghezza inferiore a 1000m, il costo di primo impianto della galleria, pari al costo di costruzione della pavimentazione e dell'impianto dell'illuminazione a LED, risulta inferiore per le pavimentazioni in calcestruzzo. Infatti grazie alle caratteristiche di minore assorbimento della luce di queste ultime, l'impianto di illuminazione esaminato risulta di costo sensibilmente inferiore rispetto a quello montato nelle gallerie con pavimentazione in conglomerato bituminoso. Aumentando la lunghezza della galleria, la convenienza economica della pavimentazione in calcestruzzo diminuisce per quanto riguarda il costo di primo impianto. Anche per le gallerie più lunghe, però il costo complessivo attualizzato a metro quadro delle pavimentazioni in calcestruzzo risulta inferiore a quello delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso qualunque sia il periodo di analisi (Figure 21 e 22), seppure con una differenza che va diminuendo all'aumentare della lunghezza della galleria.

Negli esempi studiati è stato infine osservato che l'entità del traffico non ha molta influenza sul costo attualizzato complessivo della pavimentazione e dell'illuminazione, soprattutto per quanto riguarda la pavimentazione in calcestruzzo. Ciò è dovuto alla ridotta manutenzione durante la vita utile della sovrastruttura.

A conclusione di questa analisi è stato infine riportato in Tabella 36, l'anno di break-even point, l'anno cioè in cui la pavimentazione in calcestruzzo risulta avere un costo complessivo (costruzione, manutenzione e illuminazione) inferiore a quello della pavimentazione in conglomerato bituminoso. Nelle gallerie di lunghezza inferiore a 1000m una sovrastruttura in calcestruzzo risulta essere più economica già dall'anno della costruzione, per quelle superiori il vantaggio si ottiene pochi anni dopo (Tabella 37).

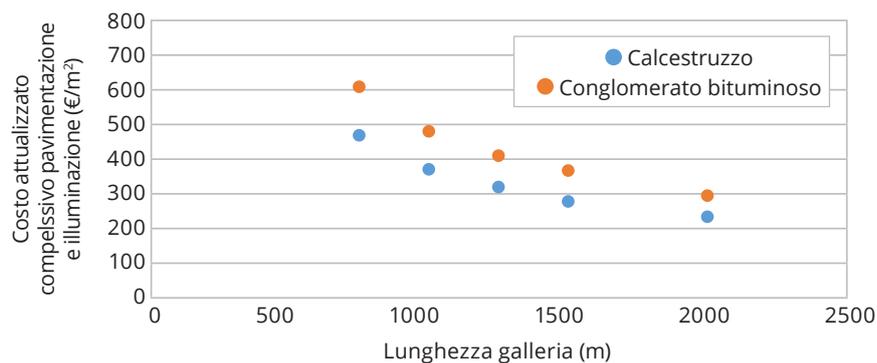


Figura 21: Costo attualizzato complessivo pavimentazione e illuminazione - vita utile 20 anni

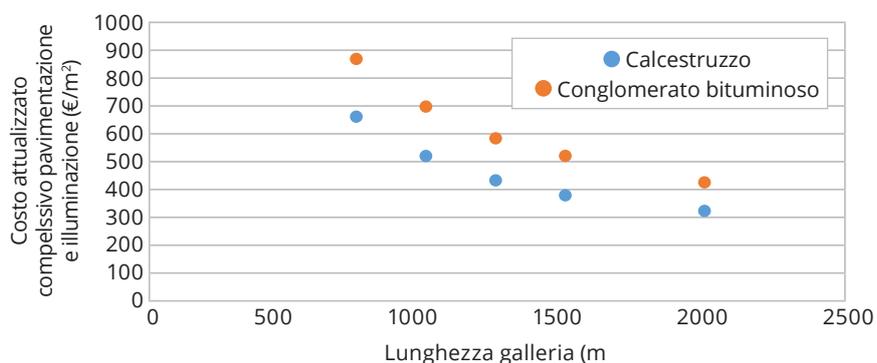


Figura 22 Costo attualizzato complessivo pavimentazione e illuminazione - vita utile 30 anni

Lunghezza galleria (m)	750	1000	1250	1500	2000
Break-even point (anni)	0	0	2	3.5	6.5

Tabella 36: Anno in cui il costo attualizzato della pavimentazione in calcestruzzo, comprensivo dei costi di costruzione e manutenzione della pavimentazione e dell'impianto di illuminazione, diventa inferiore a quello della pavimentazione in conglomerato bituminoso (break-even point)

Considerando inoltre i costi attualizzati in tutta la vita della pavimentazione, si ottiene un risparmio totale variabile fra il 20% e il 26% in funzione della lunghezza della galleria e della vita utile (Tabella 36).

L(m)	750	1000	1250	1500	2000
Vita utile					
20 anni	24%	24%	23%	22%	20%
30 anni	26%	26%	25%	25%	23%

Tabella 36: Differenza di costo fra conglomerato bituminoso e calcestruzzo

7 BIBLIOGRAFIA

- Abate, L. L'incendio nelle gallerie stradali. Problemi e rimedi. Seminario "La sicurezza antincendio nelle gallerie della rete stradale e autostradale italiana e le nuove tecnologie" 2013.
- ANAS Elenco prezzi Impianti tecnologici, 2015.
- ANAS Elenco prezzi Manutenzione ordinaria, 2015.
- ANAS Elenco prezzi Nuove Costruzioni e Manutenzione Straordinaria, 2015.
- B.U. 178/95 Catalogo italiano delle pavimentazioni stradali.
- Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme - Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure SAMARIS. 2006.
- De Lathawer, W. Effects of pavement on fires in road tunnels –Routes Roads 334/2007.
- Di Mascio P., Miseri F., Moretti L., "Pavimentazioni in calcestruzzo : la scelta d'elezione per costruire un futuro sostenibile" , Pubblicazione: AITEC, Aprile 2009. (ISBN 9788890234217) http://www.federbeton.it/Portals/3/Documenti/Pubblici/Pubblicazioni/Pavimentazioni_Stradali_in_Calcestruzzo.pdf
- Di Mascio P., Miseri F., Moretti L., "Approfondimenti sulle pavimentazioni in calcestruzzo : un modello per confrontare i costi di primo impianto e manutenzione" , Pubblicazione: FEDERBETON, Giugno 2010, Editore: PUBBLICAMENTO S.r.l. (ISBN 9788890234224) http://www.federbeton.it/Portals/3/Documenti/Pubblici/Pubblicazioni/Approfondimenti_sulle_pavimentazioni_in_calcestruzzo.pdf
- Domenichini, L., La Torre, F. e Caputo, F. J. Impiego delle pavimentazioni in calcestruzzo nelle gallerie stradali - – Strade e Autostrade (I), n. 60, 2006.
- Fédération nationale des sapeurs-pompiers de France "Tunnels routiers, le risque incendie". Le Sapeur Pompier, 2003.
- J. W. Gajda, M. G. Van Geem, A comparision of six environmental impact of Portland cement concrete and asphalt cement concrete pavement -- PCA R&D serial N° 2068, Portland Cement Association, 1997
- Gewiss, Prolite 7.0, 2012.
- Moretti, L., Cantisani, G., Di Mascio, P. Management of road tunnels: Construction, maintenance and lighting costs - Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 51, January 2016, Pages 84-89

- PIARC Committee on Road Tunnels (C5) Fire And Smoke Control in Road Tunnels, 2005.
- Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural – Anejo 6 Recomendaciones para la protección adicional contra el fuego de elementos estructurales.
- Research “Samaris (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure: Review on Reaction to Fire of Pavement Materials)”, 5th RDFP European Union, April 2004.
- Routes, n. 98, Tunnel de Sinard : les atouts majeurs de la chaussée béton –dicembre 2006
- RVS 09.01.23 - Innenausbau Tunnel, Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse - Schiene – Verkehr. 01.04.2009 e successive modifiche.
- SIMTEC Interventi mirati al risparmio energetico per il complesso della reggia di Venaria Reale: chiusura dell’anello di media tensione e revisione impianti - chiusura anello di media tensione; interventi adeguamento cabina generale; impianti elettrici e speciali; capitolato speciale; norme tecniche, 2014.
- Universität für Bodenkultur Wien. Rapporto scientifico – Galleria del Virgolo Nr. 875-05-004: Simulazione di incendio nella galleria del Virgolo; Bolzano / Alto Adige, 2005.
- UNI 11095:2011 Illuminazione delle gallerie stradali.
- UNI 10439:2001 Illuminotecnica – Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato.
- UNI 11248:2012 Illuminazione stradale - Selezione delle categorie illuminotecniche.
- UNI EN 13201-2:2004 Illuminazione stradale - Parte 2: Requisiti prestazionali.
- UNI 11104: 2004 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l’applicazione della EN 206-1.
- Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji. 2006.
- Walloon Ministry of Infrastructure and Transport, Bituminous and continuously reinforced concrete pavements for motorways – An economic comparison. 2006
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten - ZTV-ING), Part 5, Tunnel construction) (ZTV-ING Teil 5, 2007).

ISBN 978-88-941954-0-8



9 788894 195408