

PAVIMENTAZIONI STRADALI IN CALCESTRUZZO

La scelta d'elezione per costruire
un futuro sostenibile





A.I.T.E.C.

Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento
Piazza G. Marconi, 25
00144 Roma
www.aitecweb.com
areatecnica@aitecweb.com

Materiale sviluppato in collaborazione con:
Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade,
dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza"
Prof. Ing. Paola Di Mascio
Ing. Laura Moretti

Contributo
Ing. Fabio Miseri

Stampato in Italia
Aprile 2009

LE PAVIMENTAZIONI RIGIDE SONO LA SOLUZIONE INTELLIGENTE PER REALIZZARE DETERMINATE APPLICAZIONI STRADALI

L'industria del cemento sta già attivamente contribuendo allo sviluppo del sistema Italia per una mobilità più sostenibile, attraverso le applicazioni del cemento utilizzate per la realizzazione delle linee ferroviarie ad alta velocità. L'impegno sociale del settore verso la "Responsabilità di Prodotto" ci impone di focalizzare lo sviluppo sostenibile ottenibile nelle infrastrutture stradali attraverso l'utilizzo delle pavimentazioni in calcestruzzo.

L'impiego del calcestruzzo nelle pavimentazioni stradali rappresenta una soluzione largamente adottata, soprattutto in questi ultimi anni, in molti paesi esteri ma non ancora diffusa in Italia. AITEC si è posta l'obiettivo di trasferire la conoscenza dei numerosi benefici tecnico-economici ed ambientali di questa tecnica costruttiva alla committenza e ai decisori. Si tratta di benefici sui costi e di vantaggi per l'utenza connessi agli interventi manutentivi, considerando l'intero ciclo di vita utile della strada.

Costruire strade in calcestruzzo rappresenta oggi non solo una valida alternativa al sistema tradizionale, ma anche una precisa esigenza determinata dalla costante crescita del traffico veicolare e di quello pesante in particolare. A questo documento AITEC farà seguire anche un aggiornamento della documentazione tecnica attualmente esistente, in grado di divulgare la conoscenza sulle nuove tecnologie costruttive e progettuali oggi utilizzate. Quando giunge il momento di costruire o riabilitare un nuovo tratto stradale sottoposto ad un intenso traffico anche di mezzi commerciali, un tratto stradale in galleria o una rotonda, nessun altro tipo di materiale offre gli stessi vantaggi e benefici del calcestruzzo. Le pavimentazioni in calcestruzzo di ultima generazione sono sicure, economiche e rispettose dell'ambiente. Perché chiedere di meno quando puoi ottenere di più?

Francesco Curcio
Direttore Generale AITEC



SOSTENIBILITÀ

4

AITEC conferma, attraverso la redazione di questa pubblicazione, il proprio impegno nella promozione di una cultura di imprese responsabili, facendo proprio il concetto di sviluppo sostenibile. Uno sviluppo in grado di soddisfare i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere le capacità delle generazioni future di soddisfare i propri. Un processo nel quale lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e il cambiamento istituzionale siano tutti in armonia e accrescano le potenzialità presenti e future per il soddisfacimento delle aspirazioni e dei bisogni umani. Secondo quanto espresso nel primo rapporto della Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo (WCED) risalente al 1987, "Our Common Future" [0], lo sviluppo sostenibile deve rispondere alle necessità del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie.

Lo sviluppo sostenibile è strettamente correlato al mantenimento degli equilibri naturali: il tasso di utilizzazione delle risorse non rinnovabili non deve

superare il tasso di rigenerazione delle stesse, così come l'immissione di sostanze inquinanti nell'ambiente non deve superare la capacità di smaltimento dello stesso.

Prendere una decisione sostenibile non significa considerare solo i fattori economici iniziali e del ciclo di vita di un'opera, ma richiede di valutare anche le conseguenze ambientali e sociali. In sintesi si deve essere in grado di scegliere una buona soluzione tecnica, che permetta di lavorare con risorse limitate per raggiungere gli obiettivi di progetto, bilanciando interessi che competono tra loro e spesso sono in contraddizione.

Il concetto di sostenibilità può essere correlato a tre aspetti che interagiscono con le attività umane: l'ambiente, l'economia e la società. (Fig. 1)

La sostenibilità ambientale è garantita da uno sviluppo che valorizzi e tuteli i processi e le risorse naturali; la sostenibilità economica è perseguibile attraverso uno sviluppo equilibrato degli indicatori economici; la sostenibilità sociale richiede un'equa distribuzione delle condizioni di benessere umano.

Fig. 1 I tre pilastri che permettono di valutare la sostenibilità di un'infrastruttura



Il concetto di sostenibilità può essere applicato anche alla mobilità, come chiaramente espresso dal Gruppo Banca Mondiale, per il quale un sistema di trasporto è sostenibile se [1]:

- è in grado di utilizzare le risorse disponibili in modo efficiente durante tutto il periodo di esercizio, giovando in modo tangibile alla qualità globale della vita e non solo aumentando i volumi di scambio (sostenibilità ambientale);
- tutela le necessità individuali e collettive di mobilità apportando benefici all'intera comunità, sostenendo con continuità uno standard di vita migliore (sostenibilità sociale);
- assicura i servizi di mobilità, sicurezza e confort attraverso una corretta progettazione, esecuzione e manutenzione delle infrastrutture (sostenibilità socio-economica).

Secondo quanto dichiarato dalla International Road Federation (IRF) [2] "Le strade si possono definire sostenibili se, attraverso un'efficiente pianificazione, progettazione, costruzione, gestione, manutenzione e riabilitazione sono in grado di utilizzare efficientemente le risorse durante il loro ciclo di vita, fornendo un miglioramento nei benefici del trasporto per l'intera comunità, rispettando l'ambiente e abilitando una serie di servizi socio-economici per l'intera comunità (in termini di mobilità, sicurezza e confort)."

Le pavimentazioni stradali in calcestruzzo possiedono le caratteristiche essenziali per rispondere alle esigenze di uno sviluppo sostenibile.



LE PAVIMENTAZIONI STRADALI IN CALCESTRUZZO

6

La realizzazione di pavimentazioni in calcestruzzo costituisce una tecnologia ampiamente sperimentata e applicata all'estero, ma non ancora diffusa in Italia. Le pavimentazioni in calcestruzzo rappresentano un ottimo investimento tecnico, vista l'elevata durabilità e la ridotta manutenzione richiesta, aspetti cruciali in un contesto fortemente motorizzato come quello esistente nel nostro Paese.

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 e la mitigazione della congestione stradale. In effetti, l'impiego del calcestruzzo offre una valida alternativa alle soluzioni comunemente adottate in conglomerato bituminoso, **una soluzione per una mobilità più sostenibile, che riduca il proprio impatto sociale, economico e ambientale.**

Un'infrastruttura stradale consente l'esercizio della mobilità, ma grava sul sistema in termini di esternalità: per conformarsi al principio dello sviluppo sostenibile, ai sensi del Dlgs n. 4 del 16/01/2008, l'infrastruttura deve "garantire che il soddisfacimento dei bisogni delle generazioni attuali non comprometta la qualità della vita e le possibilità delle generazioni future".

Le pavimentazioni stradali in calcestruzzo rispondono perfettamente a questa esigenza grazie al **ciclo di vita più lungo** rispetto a quelle in conglomerato bituminoso, riducendo così l'uso di materie prime e l'emissione di agenti inquinanti. Ogni gestore stradale vorrebbe investire in strutture durevoli che richiedano poca manutenzione e offrano alti livelli di servizio e sicurezza, per un periodo di tempo molto lungo: la tecnologia delle pavimentazioni rigide soddisfa tali esigenze.

I fattori che devono essere considerati per un confronto obiettivo dei costi sono ovviamente molto numerosi e devono essere parte di un'analisi che consideri l'intera vita di servizio della pavimentazione, dall'origine dei materiali grezzi al loro riciclaggio e reimpiego.

Studi di tipo "Life-Cycle Cost Analysis" (LCCA) e "Life Cycle Cost" (LCC) – cioè di analisi del ciclo di vita – sono attualmente i metodi più appropriati. Il problema, comunque, è che sono di difficile esecuzione, anche perché devono essere considerati gli aspetti sociali ed economici specifici di ogni nazione o regione.

È stato ampiamente dimostrato che ad esempio le autostrade in calcestruzzo possiedono un eccellente curriculum basato sull'analisi dell'efficacia dei costi del loro ciclo di vita.

Pur essendo una valida alternativa ai conglomerati bituminosi, la presenza delle pavimentazioni rigide in calcestruzzo varia molto da paese a paese.

Ad esempio negli USA quasi il 30% delle autostrade interstatali è realizzato con pavimentazioni rigide [3], in Belgio si arriva a quasi il 40%; in Austria 2/3 delle strade ad elevato scorrimento sono in calcestruzzo, ovvero più del 25% del totale della rete stradale nazionale (4.000 km su 14.000 km) [4].

In Italia sono stati realizzati tra la fine degli anni 80 e i primi anni 90 quasi 540 km di autostrade con pavimentazioni rigide in calcestruzzo ricoperte da un sottile strato di usura in conglomerato bituminoso, la cui tipologia è definita a livello internazionale come PCP (Pavimentazione Composita Polifunzionale).

Un esempio di pavimentazione PCP è quello della Bretella Fiano-San Cesareo aperta al traffico nel 1988 e realizzata per collegare i due tratti autostradali dell'epoca A1 e A2.

La bassa diffusione delle pavimentazioni rigide in calcestruzzo in Italia è correlabile a vari fattori.

I fattori principali sono stati la limitazione dei finanziamenti disponibili per la realizzazione dei singoli progetti e la mancata considerazione dei vantaggi economici ottenibili considerando il costo dell'intero ciclo di vita del progetto.

Hanno pesato anche alcuni errori realizzativi dovuti alla limitata conoscenza tecnica da parte della committenza, alla limitata preparazione tecnica ed organizzativa delle imprese e scelte tecniche e applicative non sempre adeguate allo scopo.

Oggi si impone la necessità di valutare a priori la sostenibilità delle infrastrutture da realizzare attraverso studi di fattibilità al fine di valutare il cosiddetto "Carbon footprint" di un'infrastruttura. L'analisi di "Life Cycle Assessment" (i costi dell'intero ciclo di vita), gli aspetti di sicurezza, quelli ambientali e sociali hanno determinato in questi ultimi anni, nei paesi Europei più sensibili a questi nuovi indirizzi, come ad esempio Austria e Germania, un incremento del numero di realizzazioni di pavimentazioni rigide in calcestruzzo.

Il calcestruzzo è un materiale resistente, rigido e durevole e per questo è la scelta tradizionale per la costruzione di dighe, gallerie, ponti ed altri tipi di strutture; per le stesse ragioni il calcestruzzo rappresenta una scelta eccellente anche per le strade. Le pavimentazioni rigide in calcestruzzo offrono prestazioni interessanti in ambienti di progetto sfavorevoli, in relazione sia ai volumi di traffico circolante, sia alle condizioni climatiche avverse. Costruire una pavimentazione in calcestruzzo, ovvero rigida, vuol dire pensare ad una sovrastruttura le cui proprietà strutturali siano garantite solo dal calcestruzzo, mentre le caratteristiche funzionali o superficiali non necessariamente lo sono.

Esistono perciò tipologie JPCP (Jointed Plain Concrete Pavement, lastre non armate), CRCP (Continuously Reinforced Concrete Pavement, ad armatura continua), JRCP (Jointed Reinforced Concrete Pavement, lastre armate), Dual Layer (a doppio strato) in cui tutto il pacchetto, strutturale e funzionale, è in calcestruzzo e tipologie PCP in cui lo strato di usura è in conglomerato bituminoso ma la risposta strutturale e quindi la durabilità dell'opera dipendono dal sottostante strato in calcestruzzo ad armatura continua.

7



SOSTENIBILITÀ ECONOMICA

8

Durabilità

La vita utile di una pavimentazione in calcestruzzo è di gran lunga maggiore di quella di una pavimentazione in conglomerato bituminoso.

Le guide di progettazione per le pavimentazioni in calcestruzzo comunemente usate nel mondo prevedono periodi di esercizio superiori a 20 anni, non di rado pari a 30, prima che si renda necessario un intervento strutturale. Non a caso le valutazioni di LCCA (Life-Cycle Cost Analysis) del Ministero dei Trasporti del Québec hanno un orizzonte di progetto di 50 anni. 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 nella regione austriaca della Carinzia aperta al traffico nel 1956 [4] e per la Lorraine Avenue in Belgio, costruita nel 1925 e rimasta in servizio fino al 2003, [4] quando è stata riabilitata attraverso l'utilizzo di una pavimentazione in calcestruzzo a lastre con giunti (JPCP) con aggregati esposti in superficie.

Vantaggi economici

Il costo di primo impianto di una pavimentazione in calcestruzzo è superiore a quello di una pavimentazione in conglomerato bituminoso, ma valutando il costo complessivo di una pavimentazione nell'arco dell'intera vita utile, la sovrastruttura rigida diviene economicamente più conveniente.

Uno studio realizzato dal Ministero delle Infrastrutture e Trasporti del Belgio fornisce interessanti spunti di riflessione per gestori e progettisti stradali. 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, 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 soli 10 anni dalla costruzione, mentre dopo 30 anni di esercizio la soluzione rigida consente un risparmio del 27% rispetto a quella flessibile. (Fig. 2) [5]

Il vantaggio a lungo termine delle pavimentazioni in calcestruzzo è dimostrato anche da uno studio sviluppato negli USA dall'American Concrete Pavement Association (ACPA) sulla pavimentazione di un tratto di strada (88 miglia) ad alta percorrenza in Tennessee. Costruita tra il 1961 ed il 1966, la sovrastruttura è in calcestruzzo per il 44% ed in conglomerato bituminoso per il restante 56%. Il "LCC" della pavimentazione mostrato nel grafico qui a fianco (Fig. 3) è espresso in termini di costo equivalente annuale e recepisce un fattore di attualizzazione temporale pari al 3,55%. [6]

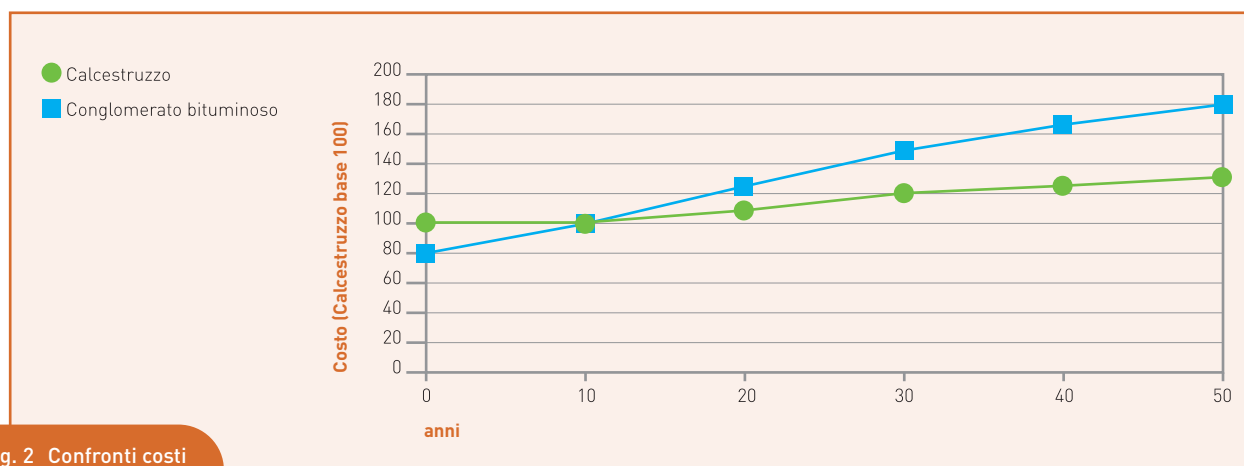
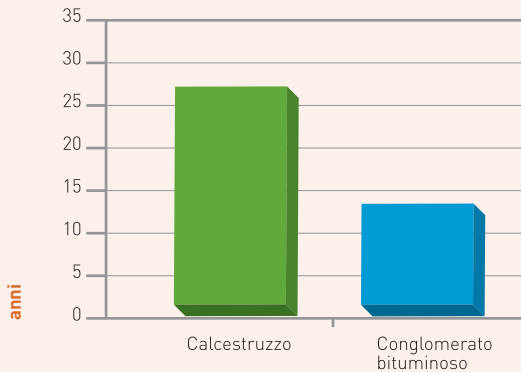


Fig. 2 Confronti costi pavimentazione

Durata delle pavimentazioni in calcestruzzo e in conglomerato bituminoso a confronto (dal primo impianto al primo rifacimento)



LCCA a 30 anni del calcestruzzo e del conglomerato bituminoso a confronto

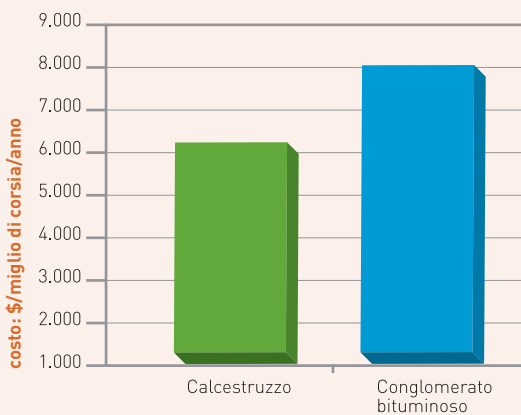


Fig. 3 LCC dello studio realizzato negli USA da ACPA

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 riflessione delle pavimentazioni in calcestruzzo è pari a 0.10, mentre per le pavimentazioni bituminose è pari a 0.07.

Ciò offre indubbi vantaggi 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 riducono i costi per l'installazione, la manutenzione e l'accensione degli impianti di illumina-

nazione. [7] [8] 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. [9]

Stabilità del prezzo

L'aumento del costo del greggio registrato con continuità negli ultimi anni ha reso il calcestruzzo economicamente più competitivo nei confronti del conglomerato bituminoso.

Il calcestruzzo in Italia è prodotto su tutto il territorio, utilizzando aggregati disponibili localmente e materiali prodotti regionalmente, come il cemento, di cui l'Italia è il secondo produttore europeo.

Il grafico di seguito raffigurato (Fig. 4) riporta l'andamento dell'indice del prezzo del cemento Portland, del bitume e del greggio sul mercato italiano dal gennaio 2005 al novembre 2008, con riferimento al valore del gennaio 2005 posto pari a 100 per i tre materiali.

In particolare, l'indice del prezzo del cemento Portland è relativo alla "produzione di prodotti industriali venduti sul mercato interno", l'indice del prezzo del bitume è relativo al prezzo medio del bitume stradale in Italia, mentre l'indice del greggio è calcolato tenendo conto del prezzo CIF (comprensivo della spedizione e dell'assicurazione per il trasporto) all'importazione. [10] [11]

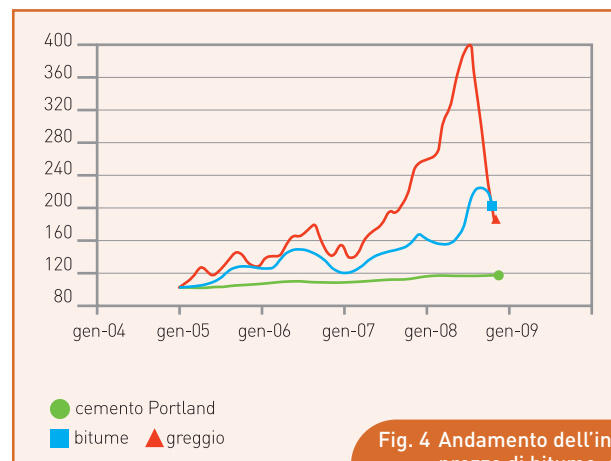


Fig. 4 Andamento dell'indice di prezzo di bitume, di cemento Portland e di greggio in Italia

SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

10

Riduzione del consumo energetico in fase di costruzione

Ad ogni materiale stradale si può associare un valore di energia primaria incorporata, richiesta per il confezionamento del conglomerato.

Uno studio effettuato in Canada da Athena Sustainable Materials Institute (di seguito ASMI) nel settembre del 2006 [12] e una ricerca svolta da Cimbéton nel 2005 [13] propongono una valutazione dell'energia primaria relativa al ciclo di vita di un tratto autostradale a quattro corsie lungo 1 km.

Visto il differente orizzonte temporale di analisi, 50 anni per la ricerca canadese e 30 anni per quella francese, e la diversa composizione della piattaforma stradale esaminata, è possibile confrontare i valori unitari di energia primaria.

Secondo ASMI, l'energia primaria di 1 m³ di calcestruzzo è compresa tra 1,73 e 2,01 GJ, intervallo nel quale si colloca il valore attribuito da Cimbéton, ovvero 1,79 GJ/m³ (i valori riportati si riferiscono ad una miscela con densità pari a 2.300 kg/m³).

Il costo energetico di una pavimentazione flessibile è notevolmente superiore in quanto il bitume possiede esso stesso energia intrinseca, impiegata come materiale da costruzione piuttosto che come fonte di energia. Il conglomerato bituminoso possiede un valore di energia primaria incorporata, somma dell'energia primaria e dell'energia del materiale pari a 7,5 GJ/m³ (il valore si riferisce ad una miscela con densità 2.350 kg/m³).

Il concetto di energia del materiale viene espresso da Cimbéton attraverso l'indicatore ambientale "risorse"

che esprime, con riferimento all'intera vita utile della pavimentazione, il rapporto tra la quantità di combustibile e materie prime consumate e le riserve mondiali corrispondenti.

Dal confronto di sei pacchetti di pavimentazione, una JPCP, due CRCP, una a lastre non armate, una PCP e una flessibile risulta che a parità di condizioni le sovrastrutture bituminose sono in media sette volte più dispendiose di quelle a struttura rigida, in cui sono comprese le PCP.

La convenienza energetica del calcestruzzo diviene ancor più evidente considerando i costi energetici di utilizzo, pari al 97% del totale durante l'intera vita utile di una pavimentazione, e i costi di manutenzione, che per le sovrastrutture rigide sono inferiori a quelli richiesti da soluzioni flessibili.

Riduzione dei consumi e delle emissioni

La resistenza al rotolamento degli pneumatici, spesso sottovalutata, è tuttavia responsabile di un terzo dei consumi di carburante.

Uno studio condotto dal National Research Council del Canada (NRC) e dal Centre for Surface Transportation Technology (CSTT) ha quantificato il risparmio confrontando i consumi medi rilevati su tre diversi tipi di pavimentazioni: rigida, flessibile e composita. I risultati sono riportati nella tabella seguente. [14]

Velocità	Riduzione di consumi (l/100 km) delle pavimentazioni in calcestruzzo rispetto a:	
	Scarico	Carico
100 km/h		
Conglomerato bituminoso	0,4 - 0,7 (0,8 - 1,8%)	0,4 - 0,7 (0,8 - 1,8%)
PCP	0,2 - 1,5 (0,8 - 3,1%)	0,2 - 1,5 (0,8 - 3,1%)
60 km/h		
Conglomerato bituminoso	0,4 - 0,5 (1,7 - 3,9%)	0,2 - 0,4 (1,3 - 3,0%)
PCP	1,1 - 1,9 (2,0 - 6,0%)	0,6 - 1,4 (1,9 - 4,1%)

Tenendo conto di tale riduzione dei consumi e, di conseguenza, delle emissioni dei prodotti di combustione [15], AITEC ha effettuato una simulazione per valutare i potenziali risparmi ottenibili in litri di gasolio ed emissioni di gas serra (CO₂, NO_x, SO₂), per la progettazione di un nuovo tratto autostradale, nel caso di utilizzo del calcestruzzo per la realizzazione della pavimentazione come mostrato nelle figure qui di lato e sotto. [Fig. 5 e 6] [16] [17]

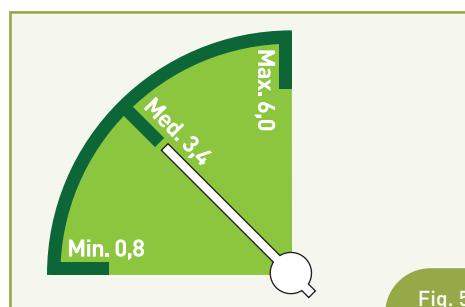


Fig. 5 Intervallo di risparmio

STIMA CON UTILIZZO PAVIMENTAZIONE RIGIDA						
Traffico pesante stimato			Risparmio totale emissioni (kg/anno)			
Svincolo	Svincolo	TGM Pesante		Minimo	Medio	Massimo
1	2	4.393	CO ₂ equivalente	1.765.637	7.503.958	13.242.279
2	3	2.445	NO _x equivalente	16.965	72.101	127.237
3	4	3.468	SO ₂ equivalente	64	272	480
4	5	7.859	Totale	1.782.666	7.576.331	13.369.996
5	6	18.554	Risparmio totale carburante (L/anno)			
6	7	17.137		Minimo	Medio	Massimo
7	8	18.230	Gasolio	640.188	2.720.797	4.801.406
8	9	13.594				
9	10	4.533				
10	11	3.658				
11	12	1.491				
12	13	560				

Fig. 6 Risultati della simulazione effettuata da AITEC per valutare l'impatto della possibile riduzione dei consumi di gasolio e delle relative emissioni di gas serra

Cimbéton evidenzia attraverso l'indicatore di acidificazione il ridotto impatto ambientale del calcestruzzo rispetto al conglomerato bituminoso in fase di betonaggio: per miscele di calcestruzzo con densità 2.300 kg/m³ e miscele di conglomerato bituminoso con densità 2.350 kg/m³, risulta quanto riportato nella tabella seguente. [13]

	Indicatore di acidificazione (kg equivalente di SO ₂ per m ³ di materiale)
Calcestruzzo	0,844
Conglomerato bituminoso	1,464

Nel valutare l'inquinamento ambientale, bisogna tenere conto anche dei composti organici volatili (VOC), molecole organiche costituite principalmente da atomi

di carbonio e idrogeno, ma anche ossigeno, cloro, zolfo, fluoro o fosforo. In fase di costruzione, manutenzione e riciclaggio, l'inquinamento dei materiali bituminosi supera di gran lunga quello dei materiali cementizi, come riportato nella tabella seguente. [13]

	Indicatore di acidificazione (m ³ equivalente di aria inquinata da ammoniacca per m ³ di materiale)
Calcestruzzo	8,096
Conglomerato bituminoso	57,810

Considerando i sei pacchetti di pavimentazione citati nel paragrafo precedente, in media le pavimentazioni flessibili sono sette volte più inquinanti di quelle rigide.

Riciclaggio

Il riciclaggio del calcestruzzo demolito da una pavimentazione prevede che il materiale fresato venga trattato, anche in sito, attraverso apposita frantumazione e vagliatura al fine di ottenere varie classi granulometriche da impiegare nella realizzazione della nuova infrastruttura.

Gli aggregati in calcestruzzo riciclato costituiscono una delle materie di maggiore interesse in campo stradale, avendo caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche spesso superiori a quelle degli aggregati naturali riciclati e potendo essere impiegati nel confezionamento di nuovo calcestruzzo. Anziché impiegare nuovi materiali, con conseguenti costi di trasporto e spesso difficoltà di reperimento, il metodo prevede il riciclo della pavimentazione dismessa. In questo modo i materiali di solito destinati al conferimento a discarica sono reimpiegati nel rifacimento dello stesso tratto stradale lungo il quale avviene l'intervento.

Il riciclo riduce l'impatto ambientale causato dai metodi tradizionali di costruzione e manutenzione delle pavimentazioni: non vengono estratti e lavorati i materiali granulari, si riduce il trasporto di materiale nel e dal cantiere e/o verso la discarica, con vantaggi per l'ambiente e per il traffico stradale. [18]

La tecnica è stata adottata con successo all'estero, ad esempio in un cantiere a nord di Hannover nel 2001 e più recentemente nei lavori di rifacimento della pista 4 e di alcune vie di circolazione dell'aeroporto Orly di Parigi. [19]

Il riciclaggio delle pavimentazioni dismesse è obbligatorio in Austria, dove fino ad un massimo del 30% di aggregato grosso riciclato è ammesso nei nuovi strati di pavimentazione non superficiali. [4]

La tecnica risulta idonea alla realizzazione di pavimentazioni "dual layer" o "two lift", nelle quali il consumo di aggregati di elevate caratteristiche è limitato al solo strato superficiale, con ovi benefici di tipo economico e ambientale.

In Belgio le pavimentazioni in calcestruzzo a doppio strato permettono di utilizzare fino al 60% di calcestruzzo riciclato come aggregato per il confezionamento di calcestruzzo fresco da impiegare per la costruzione dello strato inferiore. [20] Il reimpiego del materiale è sempre subordinato a verifiche di idoneità chimica, fisica e meccanica: ad esempio, in Germania il calcestruzzo dismesso per problemi di

durabilità legati alla presenza di reazione alcali-silice non può essere impiegato nella miscela delle lastre, ma solo come materiale inerte per la fondazione. [4]

Riduzione dei volumi di materiale impiegato

Nelle strade con elevato traffico di mezzi pesanti, la resistenza meccanica del calcestruzzo rende possibile la costruzione di pacchetti di pavimentazione più sottili rispetto a quanto non si avrebbe con una soluzione in conglomerato bituminoso.

L'elevata rigidità della superficie in calcestruzzo, sia essa una lastra o una striscia di lunghezza indefinita, permette una migliore distribuzione dei carichi applicati in superficie, per cui a parità di sollecitazione le tensioni si distribuiscono sul sottofondo su superfici più ampie e con intensità minori rispetto a quanto non si avrebbe con pacchetti bituminosi di spessore anche maggiore, come evidenziato nella seguente figura. (Fig. 7)

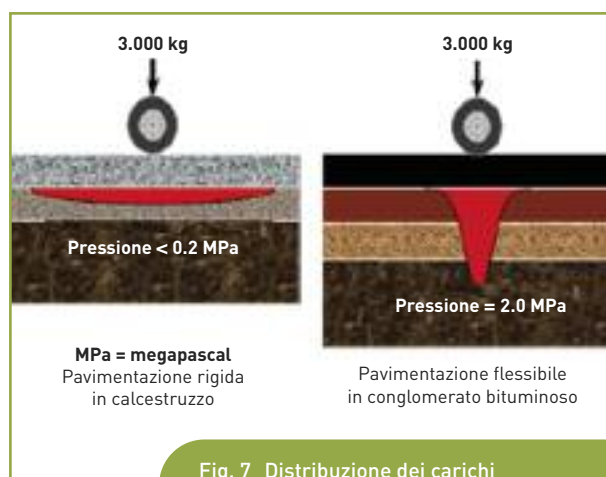


Fig. 7 Distribuzione dei carichi in pavimentazioni rigide e flessibili

La riduzione dei volumi di pavimentazione comporta minori spese e consumi energetici in fase di costruzione e riciclaggio della sovrastruttura.

In particolari casi, quali sottopassi o gallerie, la costruzione di una pavimentazione rigida può risultare decisiva per garantire i franchi minimi prescritti. L'ambiente di progetto tipico di una galleria stradale, privo di forti escursioni termiche

e non esposto agli agenti atmosferici, permette inoltre una riduzione degli spessori della pavimentazione del 20-25% rispetto a quelli necessari per una sovrastruttura rigida da realizzare all'aperto. [8]

Utilizzazione di scarti industriali

Gli scarti industriali sono un'interessante risorsa per il mondo del cemento e del calcestruzzo: essi possono essere impiegati sia nella produzione del cemento che nel confezionamento del calcestruzzo. Le pavimentazioni in calcestruzzo possono essere una concreta alternativa al conferimento in discarica di materiali il cui smaltimento comporta elevati costi sociali e ambientali.

Le materie prime comunemente impiegate nella produzione del cemento possono essere sostituite da materie prime "secondarie", con risultati soddisfacenti come riportato in numerose pubblicazioni internazionali.

Il cemento utilizzato nelle miscele di calcestruzzo può essere sostituito in parte da scarti delle lavorazioni industriali: i tre prodotti più comunemente utilizzati sono le ceneri volanti della combustione del carbone nelle centrali termoelettriche, la loppa prodotta dall'altoforno delle acciaierie e i fumi di silice delle lavorazioni di leghe ferro-silicio e di silice.

La normativa italiana che regola i quantitativi massimi utilizzabili nelle miscele di calcestruzzo di questi prodotti è la UNI 11104.

L'utilizzo di quantitativi appropriati di questi prodotti permette di migliorare la durabilità, la permeabilità e la resistenza delle pavimentazioni rigide in calcestruzzo. Le ceneri volanti e la loppa da altoforno migliorano poi la lavorabilità delle miscele di calcestruzzo e mitigano i possibili problemi della reattività degli aggregati agli alcali.

Riduzione del riscaldamento urbano

Le bolle di calore urbane sono aree nelle quali la temperatura supera di 1-5 °C il valore registrato nelle zone circostanti: ciò è il risultato di molteplici fattori di antropizzazione, non ultimo la presenza di estese superfici scure, che assorbono la luce solare e trattengono il calore. Una pavimentazione in calcestruzzo costituisce una superficie riflettente che minimizza tale condizione: rispetto al conglomerato bituminoso

ha una maggiore riflettanza solare (0,2-0,45 contro 0,05-0,1) e un'uguale emittanza, come riportato nella tabella seguente.

Le caratteristiche riflettenti del materiale variano in funzione dei componenti utilizzati: con il cemento con loppa e il cemento Portland bianco il fenomeno è ancor più accentuato. L'uso di cemento con loppa nelle proporzioni di 35 e 70% aumenta la riflettanza rispettivamente del 14 e 20% rispetto al Portland. [21] [22]

Materiale in superficie	Riflettanza solare	Emittanza
Conglomerato bituminoso nuovo	0,05 ÷ 0,10	0,9
Conglomerato bituminoso vecchio eroso dagli agenti	0,10 ÷ 0,15	0,9
Calcestruzzo di cemento Portland ordinario nuovo	0,35 ÷ 0,40	0,9
Calcestruzzo di cemento Portland ordinario vecchio	0,20 ÷ 0,30	0,9
Calcestruzzo di cemento Portland bianco nuovo	0,70 ÷ 0,80	0,9
Calcestruzzo di cemento Portland bianco vecchio	0,40 ÷ 0,60	0,9

La figura di seguito riportata (Fig. 8) mostra un'immagine ad infrarossi dell'aeroporto Hartsfield di Atlanta in Georgia (USA) scattata nel 1997 dalla NASA. La diversa distribuzione delle temperature, associata al materiale presente in superficie, evidenzia differenze di temperature dell'ordine di 10 °F (circa 5 °C) tra superfici cementizie e bituminose, dimostrando il minore impatto termico delle prime. [23]

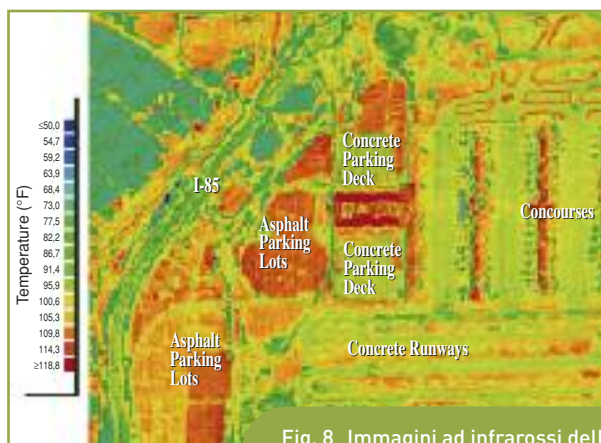


Fig. 8 Immagini ad infrarossi dell'aeroporto Hartsfield di Atlanta 1997

SOSTENIBILITÀ SOCIALE

14

Ridotta manutenzione

Gli interventi manutentivi sulle pavimentazioni stradali sono una pratica spesso sottovalutata che garantisce la durabilità di una sovrastruttura e il mantenimento di adeguati livelli di servizio durante la vita utile dell'opera. Il disagio arrecato all'utenza dall'interruzione o dalla limitazione del servizio di viabilità deve essere ridotto al minimo, perciò è necessario predisporre un piano di manutenzione che preveda l'esecuzione di interventi in condizioni ottimali e l'adozione di tecniche valide e veloci.

Le pavimentazioni rigide durano più a lungo e richiedono meno manutenzione durante il loro ciclo di vita rispetto a quelle flessibili.

Ogni fase del processo manutentivo deve essere ottimizzata: dalla demolizione alla ricostruzione è necessario adottare tecniche di intervento 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 e gli inquinamenti ambientali **determinati dalle code inevitabilmente causate dagli stessi cantieri.** [24]

Prestazioni acustiche costanti nel tempo

Il rumore complessivamente emesso dal traffico è il risultato della combinazione del rumore di funzionamento del motore, del rumore generato per effetto della resistenza aerodinamica e del contatto pneumatico-pavimentazione. Per effetto dell'air pumping e delle vibrazioni dello pneumatico, il rumore di rotolamento degli pneumatici diviene la fonte prevalente per velocità superiori a 30 km/h nel caso di automobili e superiori a 60-70 km/h nel caso di veicoli pesanti.

La valutazione del rumore emesso da un veicolo deve tener conto del metodo di misura adottato: a tal proposito è interessante considerare i risultati esposti al 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airfields. Il grafico di seguito riportato (Fig. 9) rappresenta in ascissa varie tipologie di pavimentazione, a superficie cementizia o bituminosa, e in ordinata il valore di emissione registrato secondo tre metodologie.

I criteri adottati sono: il metodo internazionale CPX Method (ISO/CD 11819-2) nelle varianti CPXI2 e CPXI4, il metodo austriaco (RVS 11066 IV) e il metodo Statistical-Pass-By (ISO 11819-1).

È evidente come per una stessa pavimentazione il valore misurato differisca sensibilmente al variare del metodo e come al variare delle sovrastrutture l'andamento del livello acustico misurato con diverse metodologie non sia concorde.

La performance acustica di una sovrastruttura deve essere perciò valutata criticamente, considerando la relatività dei dati di cui si dispone. [25]

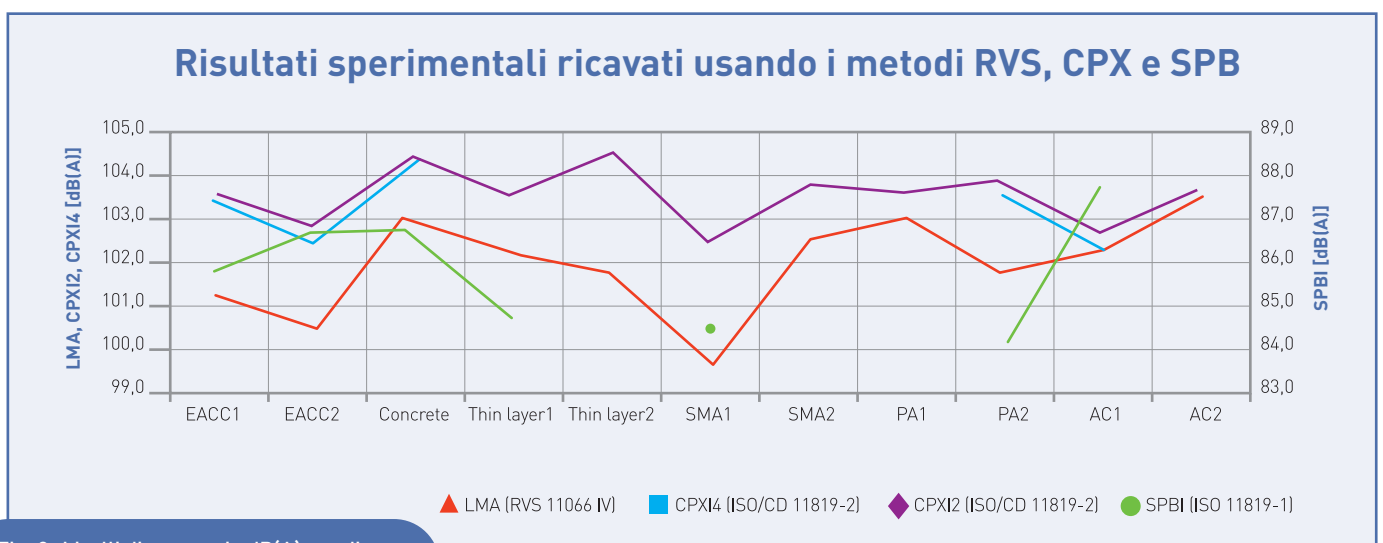


Fig. 9 Livelli di rumore in dB(A) per diverse pavimentazioni e metodi di misura

Acronimo	Inglese	Italiano
EACC	Exposed Aggregate Cement Concrete	Calcestruzzo con aggregati esposti
Concrete	Concrete	Calcestruzzo
Thin layer	Thin asphalt layer	Strato sottile di conglomerato bituminoso
SMA	Stone Mastic Asphalt	Stone Mastic Asphalt
PA	Porous Asphalt	Conglomerato bituminoso poroso
AC	Asphalt Concrete	Conglomerato bituminoso

L'interazione pneumatico-pavimentazione può essere migliorata al fine di ridurre gli effetti del rumore: le tecniche innovative studiate per le pavimentazioni interessano la tessitura superficiale attraverso soluzioni porose o rugose. [26] Test condotti nel 1996 e nel 1999 in Belgio a Herne hanno evidenziato livelli di emissione variabili nel tempo per le differenti superfici realizzate. [4]

Il tratto sperimentale è costituito da sei sezioni di prova: due hanno una pavimentazione bituminosa e quattro una pavimentazione di tipo dual layer.

Le sovrastrutture dual layer sono composte da una lastra in calcestruzzo ad armatura continua (CRCP) spessa 18 cm ricoperta con strati di usura cementizi o bituminosi, di diversa porosità e dimensione massima dell'aggregato, spessi ciascuno 4 cm. [27] Misurazioni effettuate nell'ottobre 2007 dimostrano come, a 12 anni dalla realizzazione, la pavimentazione in calcestruzzo con doppio strato e aggregati

esposti in superficie (EAS) sia quella che ha subito il minor degrado nei confronti dell'efficacia di attenuazione dell'inquinamento acustico e presenta la migliore performance. (Fig. 10) [28]

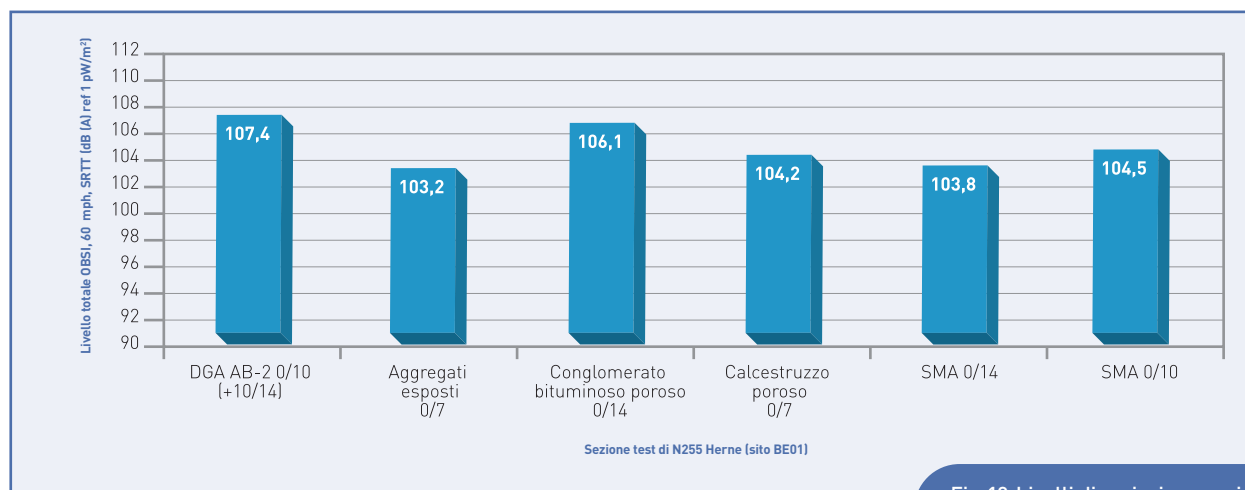


Fig. 10 Livelli di emissione registrati nel 2007 sul tratto sperimentale di Herne

16

I risultati di Herne dimostrano la durabilità delle pavimentazioni in calcestruzzo con aggregati esposti in superficie, le cui caratteristiche strutturali e superficiali mantengono eccellenti livelli di qualità nel tempo. Nella valutazione comparativa dell'impatto ambientale acustico bisogna perciò tener conto della velocità di degrado delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, maggiore rispetto a quelle in calcestruzzo.

La fessurazione a blocchi e ancor di più quella a ragnatela portano alla formazione di "giunti" e ad un sensibile incremento delle emissioni sonore.

La tessitura EAS non è una tecnica adottata solo in Belgio. Dal 1990 in Austria il calcestruzzo con

aggregato esposto è impiegato per la mitigazione dell'impatto acustico. Il dual layer con strato di usura in calcestruzzo con aggregato di classe 0/7, di solito spesso 4 cm, si dimostra efficace nell'abbattimento delle emissioni.

A frequenze superiori a 1.000 Hz, il rumore emesso è inferiore di 6-10 dB(A) rispetto a quello che si registra con le tradizionali pavimentazioni in calcestruzzo. [4] Studi svolti nel 2003 hanno invece mostrato la correlazione che sussiste tra il livello di emissione e le dimensioni massime dell'aggregato esposto in superficie come illustrato nelle figure di seguito riportate. [Fig. 11-12] [29]

Valutazione del rumore SPB per differenti dimensioni degli aggregati superficiali

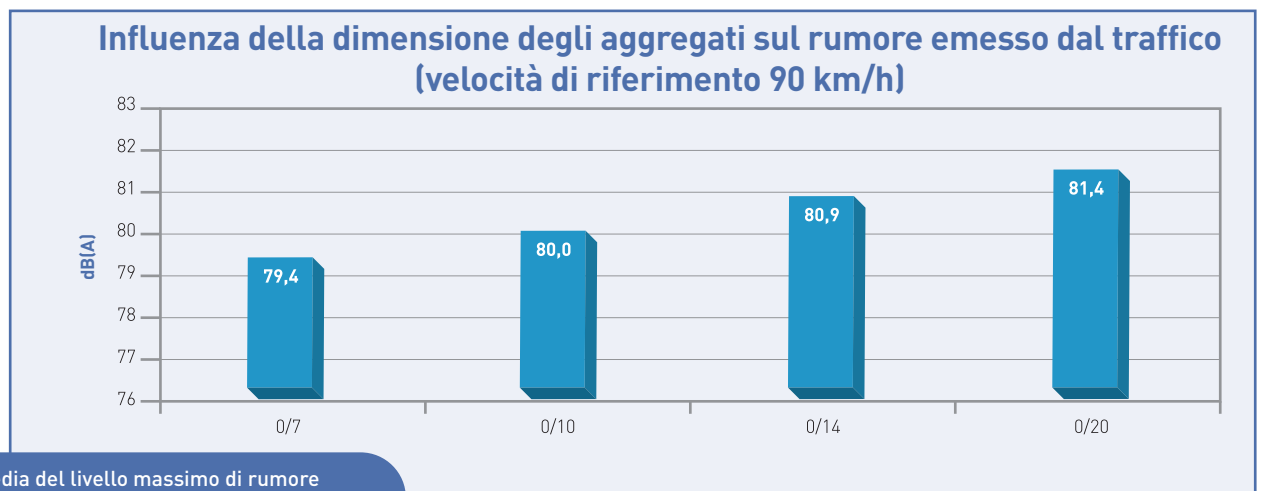


Fig. 11 Media del livello massimo di rumore registrato al passaggio del veicolo in dB(A)

Al variare della velocità il livello di rumore risulta sempre crescente con il diametro massimo dell'aggregato esposto. [30]

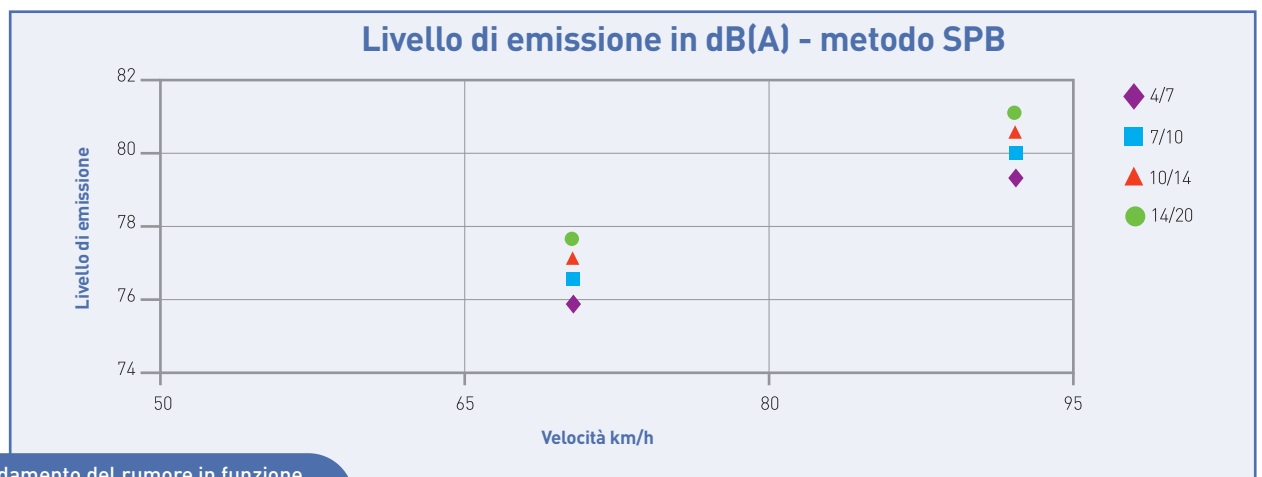


Fig. 12 Andamento del rumore in funzione della velocità del veicolo e della dimensione massima dell'aggregato

Aderenza - Regolarità - Visibilità

Le superfici in calcestruzzo una volta poste in opera vengono trattate meccanicamente o chimicamente quando sono ancora fresche per migliorarne le caratteristiche di aderenza. Le tecniche più diffuse consistono nella spazzolatura e 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.

Il contributo di aderenza fornito dalla striatura superficiale non si mantiene costante nel tempo: decade per effetto dell'usura, perciò a lungo termine contribuisce la classe di aggregato con dimensioni comprese tra 10 e 20 mm, spesso di frantumazione artificiale. [8] La superficie delle moderne pavimentazioni rigide in calcestruzzo, se trattate con la tecnica dell'esposizione degli aggregati in superficie mediante spazzolatura (Exposed Aggregate Surface), ha la capacità di mantenere valori elevati del coefficiente di aderenza trasversale (CAT) nel tempo, come si evince dal grafico seguente. [Fig. 13]

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. [31]

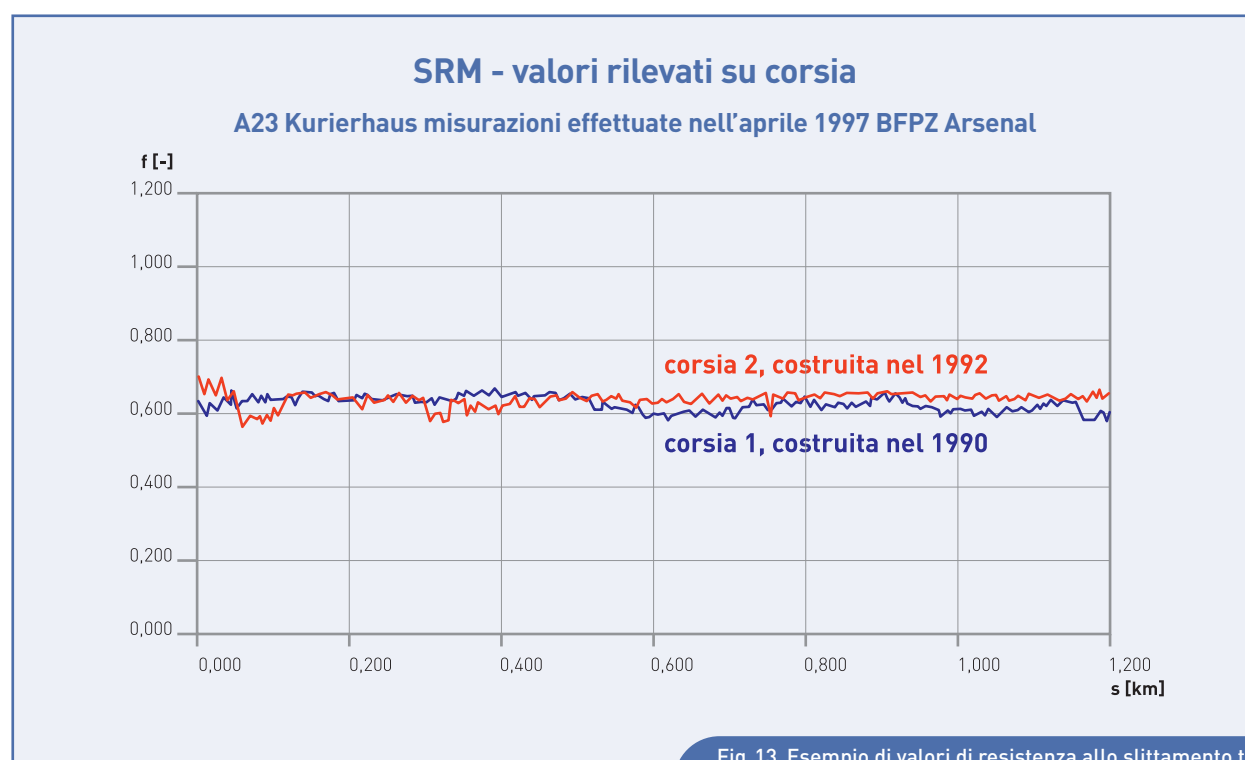


Fig. 13 Esempio di valori di resistenza allo slittamento trasversale per una pavimentazione con aggregati esposti in superficie (EAS), misurati 5 e 7 anni dopo la costruzione

Le pavimentazioni a doppio strato di calcestruzzo con aggregati esposti hanno notevolmente migliorato molti parametri delle superfici delle pavimentazioni rigide, come mostrato in queste tabelle che

riassumono le prove realizzate a Estaimpuis nel 2001 su sezioni di pavimentazioni con aggregati esposti in superficie (EAS).

Caratteristiche degli strati in calcestruzzo

Sezione N°	Strato inferiore		Strato superiore	
	Spessore strato (cm)	Aggregato (mm)	Spessore strato (cm)	Aggregato (mm)
1	15	0/32	5	0/7
2	14	0/32	6	0/10
3	12	0/32	8	0/14
4	12	0/32	8	0/20

Resistenza allo slittamento

(Media dei coefficienti di aderenza trasversale misurati tramite SCRIM)

	Top layer 0/7	Top layer 0/10	Top layer 0/14	Top layer 0/20
CAT	0,66	0,7	0,69	0,62

Regolarità

(Coefficiente medio di regolarità, lunghezza d'onda 2,5 m, misurato ogni 10 m con APL, requisito 0,35)

	Top layer 0/7	Top layer 0/10	Top layer 0/14	Top layer 0/20
EC(2,5m)	15,15	16,20	14,70	17,05

Regolarità

(Coefficiente medio di regolarità, lunghezza d'onda 10 m, misurato ogni 20 m con APL, requisito 0,70)

	Top layer 0/7	Top layer 0/10	Top layer 0/14	Top layer 0/20
EC(10m)	33,30	31,40	28,95	41,05

Un ulteriore vantaggio delle pavimentazioni in calcestruzzo con aggregato esposto è rappresentato dalla semplicità di manutenzione per il ripristino delle caratteristiche superficiali iniziali. Infatti, poiché la capacità portante è ancora integra, è sufficiente la stesa di uno strato sottile aderente in conglomerato bituminoso quando il CAT scende sotto il limite di sicurezza. Tale tecnica è stata sperimentata con successo sia in Europa che negli Stati Uniti. [19] [32]

La regolarità superficiale di una pavimentazione viene di solito quantificata attraverso l'indicatore di stato IRI, International Roughness Index, che è una rappresentazione matematica del profilo longitudinale di una pavimentazione.

Sulle strade del Kansas è stato condotto uno studio di lungo periodo per valutare l'andamento dell'IRI in funzione della tipologia di pavimentazione.

Lo studio presentato dalla Cement Association of Canada mostra come le pavimentazioni in conglomerato bituminoso, pur avendo un IRI inferiore all'inizio della vita utile, dopo 9 anni di esercizio presentano un degrado superiore.

L'incremento registrato è del 69,9% per le pavimentazioni in conglomerato bituminoso e solo del 3,7% per quelle in calcestruzzo, nonostante il traffico espresso in ESAL (Equivalent Single Axle Load) sia stato per le sovrastrutture 3,5 volte maggiore rispetto a quello delle flessibili.

Normalizzando rispetto al traffico circolante risulta, per le pavimentazioni in conglomerato bituminoso, un tasso di crescita medio delle irregolarità superficiali 53 volte maggiore rispetto a quello delle pavimentazioni in calcestruzzo, come illustrato qui a fianco. (Fig. 14) [33]

I risultati raggiunti concordano con quanto elaborato da un precedente studio quinquennale, realizzato dal dipartimento dei trasporti e dei lavori pubblici della Nuova Scozia su sezioni adiacenti flessibili e rigide costruite nel 1994 lungo l'autostrada 104. La pavimentazione in calcestruzzo ha dimostrato avere nel tempo caratteristiche migliori per quanto riguarda la regolarità di marcia.

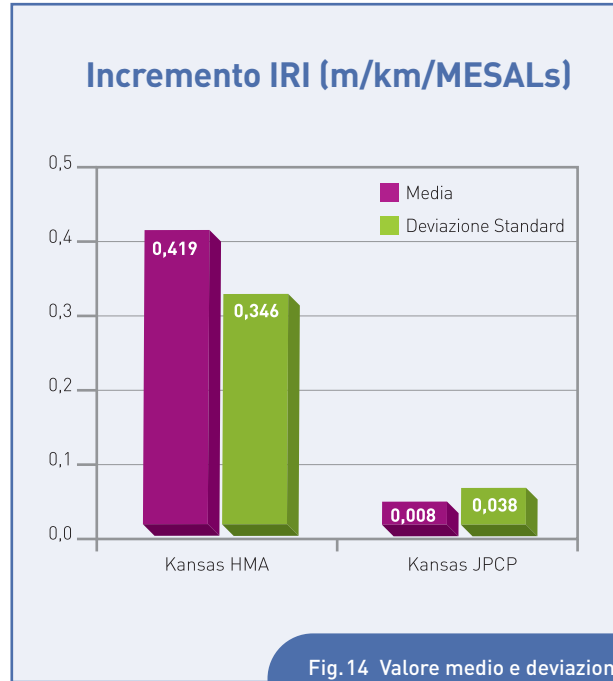


Fig. 14 Valore medio e deviazione standard di incremento dell'IRI

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 quella del conglomerato bituminoso, come illustrato nel grafico sottostante. (Fig. 15) [34]

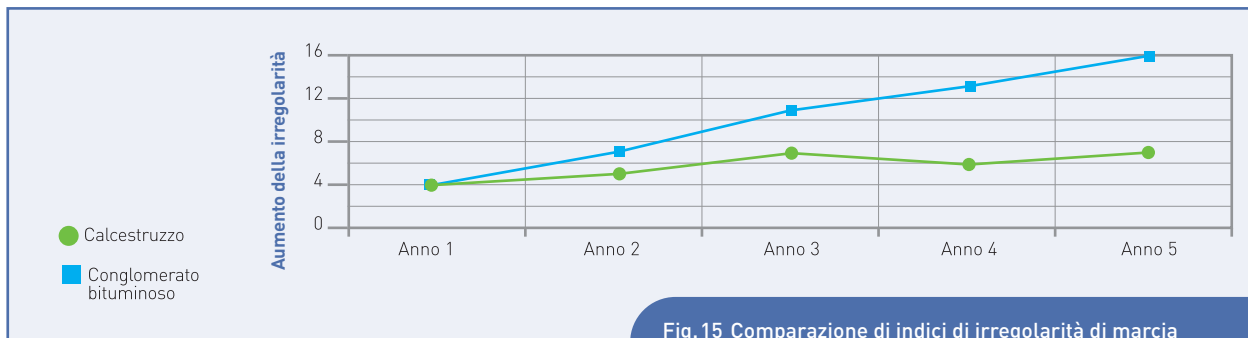


Fig. 15 Comparazione di indici di irregolarità di marcia (valori meno elevati indicano una maggiore regolarità di marcia)

CALCESTRUZZO

CONGLOMERATO BITUMINOSO

Il colore più chiaro delle pavimentazioni in calcestruzzo aumenta il coefficiente di riflessione che migliora la visibilità, la sicurezza dei pedoni e riduce la potenza richiesta per l'illuminazione delle gallerie.

Sicurezza in galleria

In Europa nell'ultimo decennio si sono sviluppati incendi di grosse dimensioni in gallerie stradali, con conseguenze pesanti in termini di perdita di vite umane e di danni materiali. [35]

Al fine di migliorare il livello di sicurezza per la circolazione, sono stati predisposti vari dispositivi di protezione, trascurando il fattore prevenzione garantito da materiali da costruzione incombustibili e atossici.

In caso di incendio il calcestruzzo mostra un comportamento migliore rispetto al conglomerato bituminoso, come sperimentato e approfondito da alcune ricerche.

Il conglomerato bituminoso esposto a temperature di 500 °C, in pochi minuti emette sostanze gassose tossiche, soffocanti e cancerogene. Incendiandosi dà luogo ad una reazione fortemente esotermica e perde le proprie caratteristiche meccaniche.

A differenza del conglomerato bituminoso, il calcestruzzo è un materiale inerte rispetto alla

combustione, come ampiamente sperimentato nel campo dell'ingegneria strutturale.

Il calcestruzzo esposto al fuoco non alimenta la combustione, non emette gas o fumi tossici, non ostacola l'evacuazione degli occupanti e le attività di soccorso. Con riferimento a quest'ultimo aspetto bisogna sottolineare le condizioni di esercizio e sicurezza garantite in caso di incendio in galleria, ove la pavimentazione in calcestruzzo mantiene le proprie caratteristiche funzionali e strutturali anche in caso di esposizione ad elevate temperature. [36] [37]

Il contributo di sicurezza passiva offerto da una pavimentazione in calcestruzzo è fondamentale, visti i risultati dello studio "Risultati psicologici sperimentali per la guida nei tunnel - Contributi alla sicurezza stradale", dal quale risulta che la maggior parte dei conducenti non dispone delle informazioni e della formazione necessarie per affrontare una situazione di emergenza in galleria. [38]





BIBLIOGRAFIA

22

- [0] Our Common Future – WCED 1987
- [1] Transport durable dans les mégapoles Sustainable transport in mega-cities – Routes-Roads n. 340 IV quadrimestre 2008 – Y. Muromachi, T. Vincent
- [2] International Road Federation: Policy Statement on Sustainable Roads (2009)
- [3] Dal sito della U.S. Department of Transportation Federal Highways Administration, ufficio di Highway Policy Information, Highway Statistics 2005: <http://www.fhwa.dot.gov/policy/ohlm/hs05/xls/hm12.xls>
- [4] FHWA Long-Life Concrete Pavements in Europe and Canada-agosto 2007
- [5] Bituminous and continuously reinforced concrete pavements for motorways – An economic comparison, Walloon Ministry of Infrastructure and Transport, 2006
- [6] Comparative performance and Cost of In-Service Highway Pavements, I-40, Tennessee, ERES Consultants <http://www.concreteroads.org/SR991P.pdf>
- [7] Impiego delle pavimentazioni in calcestruzzo nelle gallerie stradali - L. Domenichini, F. La Torre, F. J. Caputo – Strade e Autostrade (I), n. 6, novembre-dicembre 2006
- [8] Tunnel de Sinard : les atouts majeurs de la chaussée béton – Routes, n. 98, dicembre 2006
- [9] A comparison of six environmental impact of Portland cement concrete and asphalt cement concrete pavement – J. W. Gajda, M. G. Van Geem – PCA R&D serial N° 2068, Portland Cement Association, 1997
- [10] Siteb: <http://www.siteb.it/prezzibitume/STORICO%20prezzi.pdf>
- [11] Istat
- [12] Athena Sustainable Materials Institute: "A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: embodied primary energy and global warming potential", Ottawa, settembre 2006
- [13] Analyse du cycle de vie de structures routières – T89, Collection Technique CIMbéton (2005)
- [14] Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – G. Taylor, J. Patten - Phase III, Centre for Surface Transportation Technology-National Research Council of Canada, 2006
- [15] Concrete & Climate Change: How Does Concrete Stack Up Against Other Building Materials? – L. Lemay – Estate 2008 Concrete InFocus
- [16] Emissions from Volvo's trucks 2008 http://www.volvo.com/NR/rdonlyres/8F7802B0-1F27-49AD-9864-C84BCFFA5CCC/0/Emis_eng_20640_05008.pdf
- [17] Progetto preliminare collegamento autostradale Dalmine-Como-Varese-Valico del Gaggiolo e delle opere ad esso connesse: Relazione di calcolo della pavimentazione
- [18] Le retraitement en place à froid des chaussées au ciment ou aux liants hydrauliques routiers – Routes, n. 96, giugno 2006
- [19] Dossier: Le béton dans tous états – Revue Générale des Routes, n. 853, novembre 2006,
- [20] Rens, L., Keymeulen, H., Van Wijnendaele, I.: "A double-layered CRCP: experiences on the E34 near Antwerp (Belgium)" 9th International Conference on Concrete Pavements, San Francisco, California, August 17-21, 2008
- [21] Levinson, R., and Akbari, H., "Effects of Composition and Exposure on the Solar Reflectance of Portland Cement Concrete" Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-48334, 2001, Berkeley, CA
- [22] Albedo: a measure of pavement reflectance – American Concrete Pavement Association R&T Update giugno 2002
- [23] Green Highways: north American concrete paving industry's perspective – L. Wathne, T. Smith
- [24] Impact des activités de construction et d'entretien des routes sur les usagers de la route et les riverains – Impact of road construction and maintenance activities on road users and the adjacent land use – C. T. AIPCR C 4.3 Pavimentazioni stradali 2007R05
- [25] Statistical Properties of Road Traffic Noise Emission Measurements – M. Conter - 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airfields in 2008 Portorož Slovenia
- [26] Interazione veicolo-strada: guida alla valutazione e pianificazione degli interventi di risanamento acustico - C. T. AIPCR C 4.2 Interazione strada-veicolo 2006
- [27] Test section of noiseless cement concrete pavements-Information day 1997 – Ministry of the Flemish Community
- [28] Comparative measurements of tire/pavement noise in Europe and in United States: NITE II - Rasmussen, R.O., Whirlledge, R.P., Ferragut, T.R., Wiegand, P.D., Inter-noise 2008
- [29] Characteristics of today's concrete surfaces – L. Rens, J. Steigenberger
- [30] A glance at the Belgian Experience in Concrete Pavements – AA. VV. FEBELCEM
- [31] Long-term performance of low-noise concrete pavements – M. Haider, J. Steigenberger, H. Piber
- [32] "Rubblizing with bituminous concrete overlay - 10 years' experience in Illinois" - Illinois Department of Transportation, 2002
- [33] Pavement roughness progression case study - The Transtec Group luglio 2006
- [34] Asphalt concrete pavements and Portland cement concrete pavements, highway 104, Cumberland County, year 5 of 5 years study - Nova Scotia Transportation and Public Works ottobre 1999
- [35] Le pavimentazioni stradali in calcestruzzo aumentano la sicurezza in galleria –Cembureau, Bibm, ERMCO aprile 2004
- [36] Effects of pavement on fires in road tunnels – W. De Lathawer, Routes Roads 2007, n. 334
- [37] Comprehensive fire protection with concrete (part 1) - BIBM – BFT International, n. 10/2007
- [38] Galleria di gallerie – Strade & Autostrade, n. 55, gennaio-febbraio 2006, pp. 60-63



