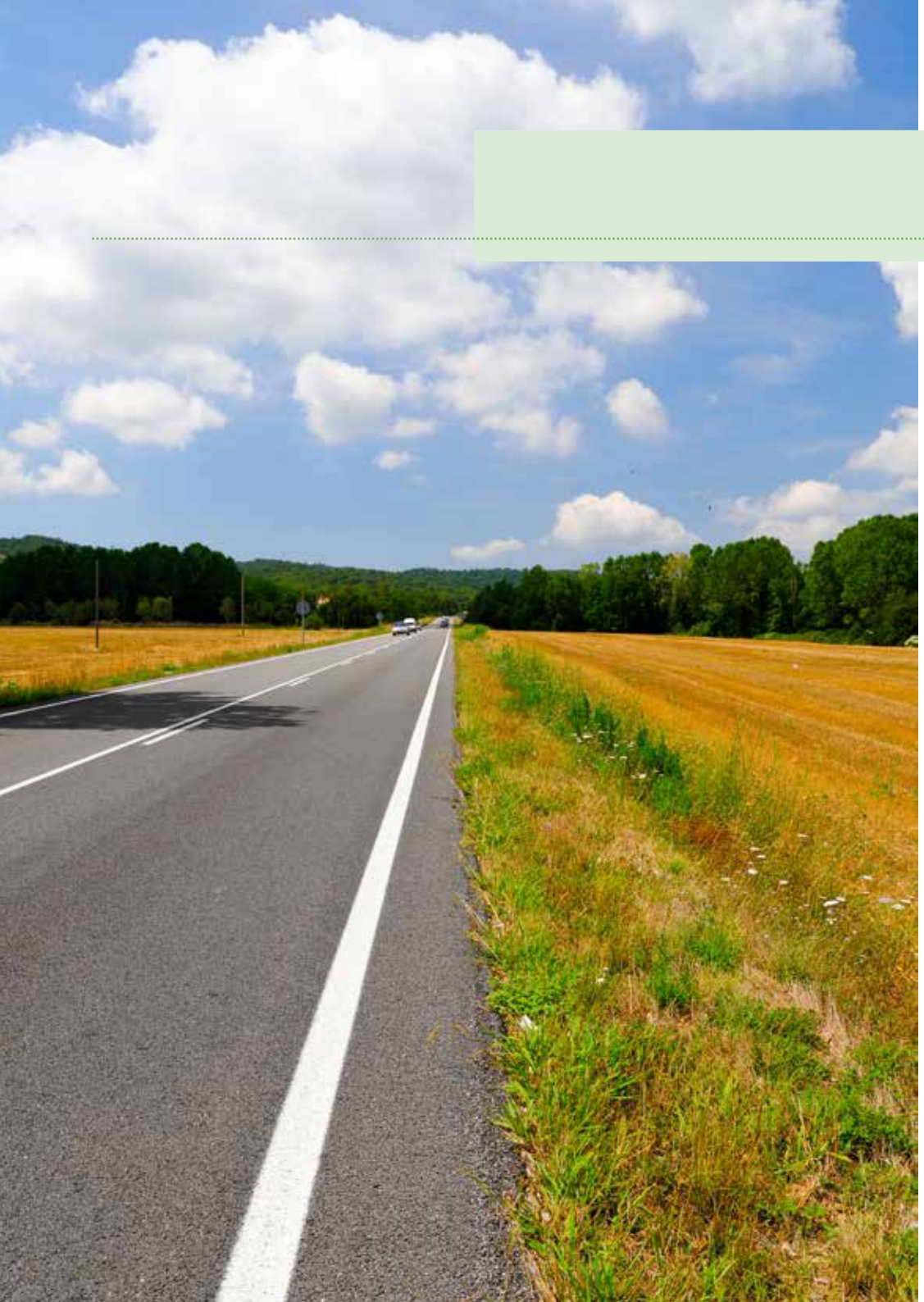
La Variante Canali di Reggio Emilia: una strada green

Bilancio economico e ambientale a sei anni dalla costruzione

16

ecopneus

il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi



Sommario

Premessa 9

Capitolo 1 - Variante di Canali: soluzioni per una maggiore sostenibilità ambientale 10
Capitolo 2 - I monitoraggi sulle pavimentazioni della Variante di Canali: studio delle performances strutturali e funzionali 10
Capitolo 3 - Analisi degli elementi di sostenibilità ambientale della Variante Canali di Reggio Emilia 11
Capitolo 4 - Le prestazioni acustiche delle pavimentazoni gap graded della Variante di Canali a confronto con pavimentazioni coeve non gommate 11

1. Variante di Canali: soluzioni per una maggiore sostenibilità ambientale 14

1.1 - Criteri generali seguiti nella progettazione della Variante di Canali 17
1.2 - Inserimento della Variante di Canali nel contesto ambientale 19
1.3 - Soluzioni sostenibili per la pavimentazione della Variante di Canali 23
1.4 - Conclusioni 24

2. I monitoraggi sulle pavimentazioni della Variante di Canali: studio delle performances strutturali e funzionali 26

Introduzione alla relazione del Dott. Ing. Picariello 28

2.1 - Campagna di indagini ... 30
2.2 - Caratterizzazione fisico meccanica ... 30
2.3 - Composizione delle miscele ... 32
2.4 - Caratterizzazione meccanica ... 34
2.5 - Caratteristiche funzionali ... 42
2.6 - Caratteristiche strutturali ... 46
2.7 - Indagine con FWD ... 48
2.8 - Vita utile residua ... 51
2.9 - Conclusioni ... 52

3. Analisi degli elementi di sostenibilità ambientale della Variante Canali di Reggio Emilia ... 54

Introduzione alla relazione del Dott. Ing. Murachelli ... 56
3.1 - Lo stato di fatto della tecnologia Asphalt Rubber ... 58
3.2 - Definizione di Asphalt Rubber secondo la Norma ASTM D6114 ... 59
3.3 - Background ... 59
3.4 - Riduzione dello spessore ... 60
3.5 - Proprietà del conglomerato bituminoso ... 60
3.6 - Efficienza economica ... 60
3.7 - Applicazioni dell'Asphalt Rubber ... 60
3.8 - Qualità dell'aria ... 60
3.9 - Vantaggi della soluzione adottata ... 61
3.10 - Dimensionamento e verifica dei pacchetti stradali proposti ... 62
3.11 - I vantaggi ambientali della pavimentazione in Asphalt Rubber ... 65
3.12 - Bilancio energetico del cantiere ... 68
3.13 - Stabilizzazione terre da rilevato ... 70
3.14 - Realizzazione nuova pavimentazione ... 71
3.15 - Risparmio energetico ottenuto grazie alla soluzione adottata ... 73
3.16 - Risparmio energetico durante la vita utile dell'opera ... 76
3.17 - Conclusioni ... 82

4. Le prestazioni acustiche delle pavimentazioni gap graded della Variante di Canali a confronto con pavimentazioni coeve non gommate ... 84

Introduzione alla relazione del Dott. Ing. Galaverna ... 86
a cura di Ecopneus ... 86

Glossario ... 99

ecopneus

il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi

Ecopneus

Ecopneus è la società senza scopo di lucro tra i principali responsabili della gestione dei PFU (Pneumatici Fuori Uso) in Italia, costituita dai sei principali produttori di pneumatici operanti nel nostro Paese (Bridgestone, Continental, Goodyear Dunlop, Marangoni, Michelin e Pirelli) cui nel tempo si sono aggiunte molte altre aziende di produzione e importazione di pneumatici.

In base a quanto previsto dall'art. 228 del D. Lgs. 152/2006 e dal D.M. 82/2011, che regolamentano la gestione dei PFU, è responsabile della gestione delle operazioni di rintracciamento, raccolta, trasporto e recupero di una quota di PFU proporzionale alle quote di mercato detenute dalle aziende socie, circa il 70% delle circa 350.000 tonnellate di pneumatici che arrivano a fine vita ogni anno in Italia.

Ecopneus garantisce quindi il corretto recupero di circa 250.000 tonnellate di PFU ogni anno, pari a circa 30 milioni di singoli pneumatici: messi uno fianco all'altro formerebbero una striscia lunga oltre 13.000 km, due volte la distanza Milano-New York.

Parallelamente alle quotidiane attività operative, forte è anche l'impegno profuso per il consolidamento e lo sviluppo di nuovi mercati delle applicazioni della gomma riciclata, in linea con quanto richiesto dalla Comunità Europea e dal Legislatore italiano, per la creazione anche in Italia di una circular economy per la gomma riciclata.

Ecopneus a questo scopo ha investito fino ad oggi oltre 14 milioni di euro in progetti a sostegno del riciclo dei PFU, strutturando un approccio articolato su più dimensioni:

- divulgativo, con un portale dedicato e con campagne pubblicitarie dedicate alle applicazioni della gomma riciclata;
- partecipativo, per il coinvolgimento di specifici stakeholder e della Pubblica Amministrazione;
- tecnico-scientifico, per la verifica della sicurezza e delle prestazioni della gomma riciclata nelle varie applicazioni;
- istituzionale, con il coinvolgimento degli stakeholder istituzionali, imprenditoriali e dell'associazionismo nella soluzione di criticità normative, economiche e culturali.

Premessa

A cura di ***Ecopneus***

Il presente volume rappresenta uno studio organico delle prestazioni della pavimentazione stradale della Variante di Canali di Reggio Emilia, realizzata nel 2009 con asfalti modificati con aggiunta di gomma SBR da riciclo dei Pneumatici Fuori Uso.

In fase di progettazione si è scelto un sistema di miscele "gap-graded" in Asphalt Rubber (per ulteriori dettagli, vedi il Glossario) a spessore ridotto (3 cm usura + 4 cm binder) abbinato ad un SAMI (in Asphalt Rubber) e 7 cm di base realizzata con 100% di fresato riciclato a freddo con emulsione bituminosa e cemento.

Una soluzione che unisce ottime prestazioni e sostenibilità ambientale. Grazie ad una tecnologia che permette di sfruttare le caratteristiche superiori del polverino di gomma riciclato da PFU ed estendere la durata di vita delle pavimentazioni stradali, sono state evitate 40 tonnellate di CO_2, riducendo i consumi energetici e permettendo un risparmio stimato fino a 70.000 kwh rispetto alla realizzazione di una strada tradizionale. Un risparmio energetico complessivo pari ad un mese di energia elettrica per 300 famiglie di Reggio Emilia.

A sei anni dalla realizzazione sono state svolte delle campagne di monitoraggio, misura e analisi, volte a confermare i risultati attesi in fase progettuale per i principali aspetti indagati, che sono illustrate all'interno del presente dossier. Il volume si compone dunque di quattro relazioni distinte realizzate dai soggetti coinvolti nelle fasi di progettazione e realizzazione, nonché nelle campagne di misurazione.

Capitolo 1 - Variante di Canali: soluzioni per una maggiore sostenibilità ambientale

Il primo capitolo, a cura dell'**Ing. Valerio Bussei**, Dirigente del Servizio Infrastrutture, Mobilità Sostenibile, Patrimonio ed Edilizia della Provincia di Reggio Emilia, illustra le soluzioni scelte dall'Amministrazione appaltante in fase progettuale, la valenza funzionale dell'intervento e le specifiche tecniche adottate in fase di realizzazione.

Capitolo 2 - I monitoraggi sulle pavimentazioni della Variante di Canali: studio delle performances strutturali e funzionali

Nel secondo capitolo l'**Ing. Fabio Picariello** di Pavenco Pavement Engineering Consulting srl approfondisce le prestazioni strutturali e funzionali della pavimentazione in asfalto "modificato", determinate attraverso prove di laboratorio su campioni della pavimentazione.

Capitolo 3 - Analisi degli elementi di sostenibilità ambientale della Variante Canali di Reggio Emilia

L'**ing. Adriano Murachelli**, Presidente dell'Associazione Ingegneri per l'Ambiente e il Territorio-AIAT, affronta nel terzo capitolo gli aspetti di sostenibilità ambientale legati alla realizzazione della Variante di Canali, analizzando i benefici ambientali ed economici diretti e indiretti dati dall'utilizzo di un bitume modificato con polverino di gomma da PFU.

Capitolo 4 - Le prestazioni acustiche delle pavimentazioni gap graded della Variante di Canali a confronto con pavimentazioni coeve non gommate

Nel quarto capitolo l'**Ing. Paolo Galaverna**, Presidente e fondatore di Genesis Acoustic Workshop, illustra i risultati della campagna di indagine sulle prestazioni acustiche della pavimentazione della Variante Canali a confronto con una pavimentazione analoga realizzata con bitumi convenzionali non "gommati".

Dott. Ing. Valerio Bussei - Dirigente del Servizio Infrastrutture, Mobilità Sostenibile, Patrimonio ed Edilizia della Provincia di Reggio Emilia; ha seguito i lavori della Variante Canali fin dalla sua progettazione nel 2006. Laureato in Ingegneria Civile è inoltre Tecnico Competente in Acustica Ambientale e Coordinatore della Sicurezza in fase di progettazione e realizzazione di opere edili e infrastrutturali.

Dott. Ing. Fabio Picariello - Laureato in Ingegneria Civile con indirizzo idraulico, Fabio Picariello è Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Trasporti presso l'Università degli Studi di Bologna. E' inoltre Amministratore Unico della società Pavenco Pavement Engineering Consulting società di ingegneria che offre servizi di consulenza specialistica nell'ambito delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali: dalla progettazione e il calcolo razionale del pacchetto stradale, ai test di laboratorio sui materiali stradali fino al rilievo dello stato di esercizio delle strade con strumenti non distruttivi e ad alto rendimento.

Dott. Ing. Adriano Murachelli - Laureato in Ingegneria per l'ambiente e il territorio presso il Politecnico di Milano, è consulente in ingegneria idraulica e ambientale, con particolare riferimento all'idraulica fluviale, al drenaggio urbano e alle opere idrauliche connesse a importanti infrastrutture viarie. Ha svolto lavori per numerosi enti pubblici e soggetti privati sia in Italia che all'estero. È docente in seminari e corsi relativi all'idraulica fluviale e alla gestione delle risorse idriche. È presidente di AIAT e membro del Comitato scientifico con riferimento alla tutela delle acque e alla difesa del suolo.

Dott. Ing. Paolo Galaverna - Laureato in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Parma. Ingegnere Elettronico, tecnico competente in acustica ambientale è presidente e fondatore di Genesis Acoustic Workshop, studio di consulenza italiano specializzato in acustica architettonica, acustica ambientale, elettroacustica, controllo del rumore e delle vibrazioni, monitoraggi.

1. Variante di Canali: soluzioni per una maggiore sostenibilità ambientale

*A cura del **Dott. Ing. Valerio Bussei***
Dirigente del Servizio Infrastrutture, Mobilità Sostenibile, Patrimonio ed Edilizia della Provincia di Reggio Emilia

Strade più sicure, collegamenti più rapidi, meno incidenti e meno centri abitati assediati da inquinamento, traffico e pericoli. Sono gli impegni a favore della sicurezza stradale, che, da sempre contraddistinguono il lavoro della Provincia di Reggio Emilia.
In particolare, a partire dall'anno 2000, il territorio della Provincia di Reggio Emilia è stato coinvolto da un processo di ammodernamento e implementazione del sistema infrastrutturale senza precedenti, grazie anche all'effetto volano creato dai lavori relativi alla nuova linea ferroviaria ad Alta Velocità, e ai conseguenti interventi di adeguamento della viabilità interferita.
Gli investimenti sono stati effettuati prioritariamente sugli assi strategici, su cui chiaramente insistono i maggiori volumi di traffico su gomma, lungo le direttrici principali orientate in senso Nord-Sud ed Est-Ovest, con l'obiettivo di trasformare la vecchia organizzazione viaria

radiocentrica in un sistema infrastrutturale a maglie ortogonali, più funzionale al sistema insediativo policentrico che caratterizza il nostro territorio, in conformità a quanto previsto dal P.T.C.P. (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale) e nel P.R.I.T. (Piano Regionale Integrato dei Trasporti). Il risultato più evidente di questo lavoro è una rete viaria rinnovata per 136 chilometri di varianti ai centri abitati e di rettifiche di tracciati, con un investimento complessivo di circa 420 milioni di euro, che ha consentito di migliorare nel suo complesso la rete provinciale costituita da circa 1.000 km di strade, eliminando punti critici e pericolosi. Tutto questo ha contribuito a far sì che dai 3.515 incidenti con 102 morti del 2000, si sia scesi nel 2014 a 1.911 incidenti con 41 vittime: una diminuzione del 60%. In futuro si dovrà continuare a lavorare, per ridurre ulteriormente incidenti e vittime.Il potenziamento infrastrutturale del territorio reggiano, culminato con l'apertura nel 2008 del casello autostradale Terre di Canossa-Campegine e nel 2013 della stazione Mediopadana dell'Alta velocità, è oggi sotto gli occhi di tutti.
Attraverso un articolato sistema di tangenziali moderne e funzionali, si sono liberati dall'inquinamento e dal traffico, e dunque dai pericoli, 50 centri abitati, disseminati lungo le tratte verso Reggio Emilia e i principali comuni (Correggio e Guastalla, Montecchio e la Val d'Enza, Castelnovo Monti e la montagna, Scandiano e la zona ceramiche), realizzando o collaborato a realizzare insieme a Regione, Comuni e Anas:

- Sull'Asse di Val d'Enza le Varianti di Montecchio, Campegine, Boretto, San Polo, la galleria di Cecciola e i primi due stralci del collegamento Vetto - Ramiseto.
- Sull'Asse Centrale, a nord di Reggio Emilia, la Variante di Sesso il sistema delle Varianti tra Bagnolo-Novellara; a sud di Reggio Emilia la Variante di Canali, di Puianello a Quattro Castella, di Ponterosso a Castelnovo Monti, la galleria Bocco-Canala e 5 interventi di ampliamento e messa in sicurezza della Statale 63 tra Cà del Merlo e La Croce.
- Sull'Asse Orientale, Le Varianti di Rio Saliceto, San Martino in Rio e Fabbrico, quella di Gavassa a Reggio Emilia e il primo lotto dell'Asse Correggio - Rio Saliceto - Rolo.
- Sulla Cispadana, Le Varianti di Boretto, Brescello e Gualtieri, Luzzara e la bretella di collegamento al Porto di Pieve Saliceto.
- Sulla Pedemontana La Variante di Quattro Castella e quella da Scandiano a Casalgrande.

Particolare attenzione è stata posta nella progettazione di tali tratti stradali, al fine di considerare adeguatamente le tematiche inerenti sia l'inserimento paesaggistico nel territorio che l'adozione di modalità costruttive e processi operativi sostenibili nei confronti dell'ambiente.
La realizzazione di un'infrastruttura stradale peraltro costituisce sempre una frattura del territorio che viene per sempre modificato, costituendone, di fatto, un nuovo elemento antropico che si va ad aggiungere a quelli stratificati nel tempo per azione dell'uomo.
Le nuove infrastrutture devono quindi essere considerate come nuovo segno del paesaggio e quindi è opportuno e necessario prevedere mitigazioni dell'impatto paesaggistico in modo da rendere l'intervento compatibile o assorbibile dal contesto territoriale. In questo senso si è mossa anche la Regione Emilia Romagna con la predisposizione delle linee guida per la progettazione integrata delle strade che costituiscono un manuale di riferimento e di indirizzo finalizzato a coordinare la realizzazione degli interventi infrastrutturali nell'ambito regionale.
Analoga attenzione è stata posta al continuo aggiornamento e alla sperimentazione di nuove tecnologie finalizzate a coniugare i costi di realizzazione, con modalità costruttive e processi operativi sostenibili nei confronti dell'ambiente, in sintonia anche con quanto previsto dalla attuale normativa che prevede che almeno il 30% dell'opera pubblica sia realizzata attraverso materiali riciclati.

1.1 - Criteri generali seguiti nella progettazione della Variante di Canali

Il progetto della Variante di Canali nasce nel 2006 in questo contesto ed assolve, nel settore territoriale periurbano interessato, una triplice valenza funzionale:

- tangenziale al centro abitato di Canali in variante alla Strada Provinciale 25;
- completamento dell'anello delle tangenziali intorno all'abitato di Reggio Emilia, nel quadrante sud – est;
- Variante di un tratto della Strada Statale 63 ormai inglobata nel centro urbano.

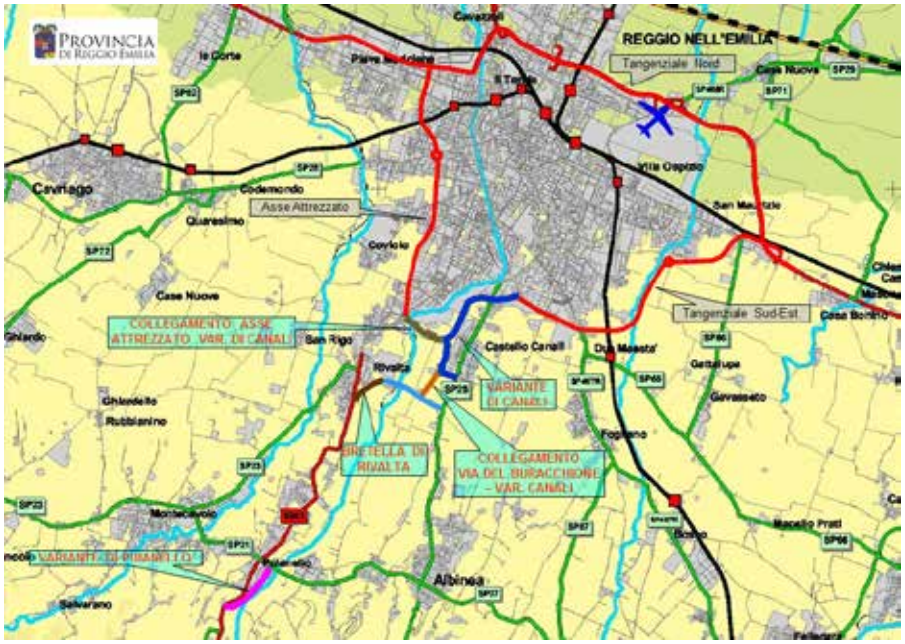


Immagine 1 - *Inquadramento nel sistema viario del settore territoriale di riferimento*

L'obiettivo è migliorare la funzionalità della rete stradale, per i flussi veicolari provenienti dalla fascia montana, collinare e dalla cintura di Reggio Emilia, migliorando la connessione diretta al sistema delle tangenziali del centro abitato di Reggio Emilia, alla rete autostradale e alla nuova stazione dell'alta velocità.
L'opera contribuisce alla realizzazione del nuovo assetto stradale programmato dalla Provincia, caratterizzato da una gerarchia netta tra strade ad alto scorrimento, strade locali e di quartiere. Attraverso questo lavoro si consente la riorganizzazione della viabilità di accesso ai centri abitati, con la realizzazione di messe in sicurezza e riqualificazione dei tratti di strada ormai inglobati nel tessuto urbano.

Già dalla prima fase progettuale l'intento della Provincia era quello di realizzare un opera non solo correttamente dimensionata ed in grado di soddisfare le esigenze funzionali di adeguata gestione del traffico veicolare, ma che fosse inserita nel contesto ambientale nel modo più armonico possibile, sia in fase di costruzione che in fase di esercizio.
La moderna realizzazione delle infrastrutture stradali deve infatti farsi carico in modo integrato di tutte le variabili che possono condizionare l'opera già a livello progettuale, tra cui un elemento di grande rilevanza assume il consenso della popolazione residente.
Se il processo progettuale dell'opera infrastrutturale assume come dato di fondo prioritario le tematiche inerenti la sostenibilita' ambientale, già a partire dallo studio di fattibilità, in modo da condizionare la definizione dell'andamento plano - altimetrico del tracciato, le scelte dei materiali per gli strati portanti della sezione stradale, l'individuazione delle soluzioni tecnologiche per i manufatti, gli elementi a corredo e per i sotto-servizi (cavalcavia, impianti di illuminazione segnaletica verticale e orizzontale, sistemi di raccolta delle acque meteoriche, guard-rail, barriere fonoassorbenti, ecc.), si ottiene un valore aggiunto in termini di risultati sia relativamente all'incremento della qualità dell'opera, che per facilitare la condivisione da parte dei cittadini e dei portatori d'interesse sempre più attenti al dato ambientale, con significativi riflessi anche sulle condizioni dei lavoratori in fase di cantiere.

1.2 - Inserimento della Variante di Canali nel contesto ambientale

L'opera realizzata dalla Provincia di Reggio Emilia, con un investimento di circa 12 milioni di euro, ha comportato la costruzione di un tratto stradale in sede nuova avente un'estensione complessiva di circa 3 chilometri, che prende origine dall'attuale tangenziale Sud - Est del comune di Reggio Emilia e aggira a ovest l'abitato di Canali, per poi ricongiungersi alla Strada Provinciale (S.P. 25) che porta in comune di Albinea, in corrispondenza di via San Marco.
Il nuovo asse stradale, aperto al traffico nel maggio 2009, decongestiona dal traffico il centro abitato di Canali, consentendo di ridurre in modo sostanziale l'inquinamento acustico e atmosferico, e garantisce una maggiore sicurezza e fluidità della circolazione nella zona.

Innovare, in particolare in termini di conservazione dell'ambiente e di un uso sostenibile delle risorse che offre, genera risparmi sia ambientali che economici

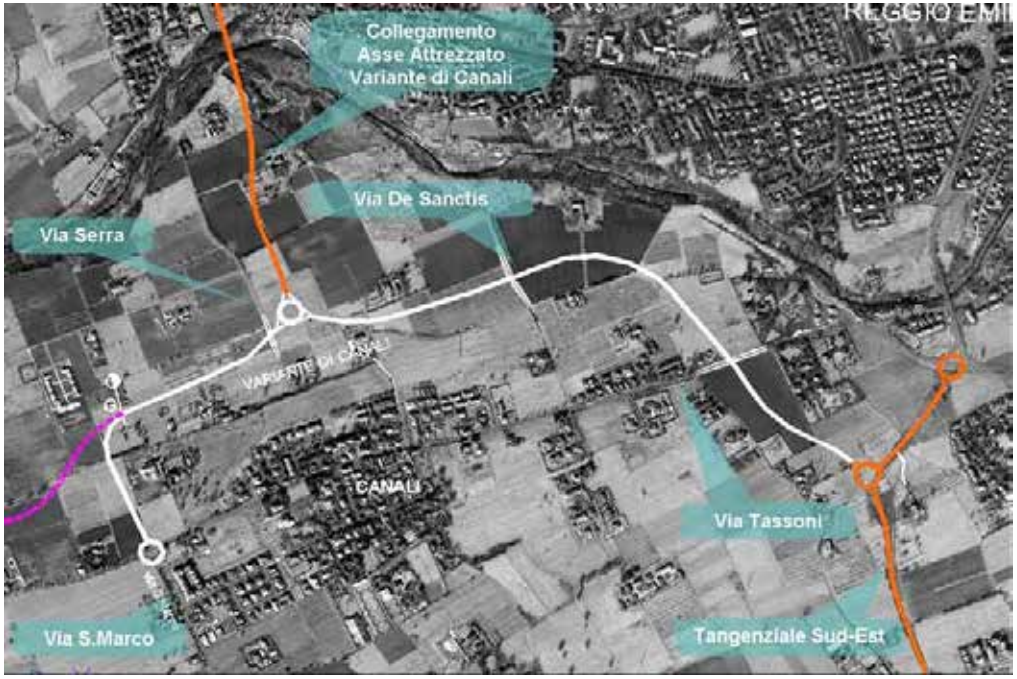


Immagine 2 - *Inquadramento planimetrico della Variante di Canali*

Vista la specificità ambientale delle aree da attraversare (se da un lato l'opera si inserisce in un'area periurbana fortemente antropizzata dall'altro si deve confrontare con il pregio del vicino parco del torrente Crostolo), l'attenzione ambientale ha portato all'elaborazione di un'opera con particolare riguardo all'inserimento paesaggistico.
Il tracciato è realizzato in modo da minimizzare i rilevati e ridurre l'impatto visivo seguendo il più possibile l'andamento orografico del territorio, in particolare una buona parte del profilo altimetrico longitudinale corre ad una profondità media di circa 2,00 metri dal piano di campagna, in modo da rendere la nuova viabilità quasi completamente interrata anche con il ricorso alla realizzazione di dune in terra naturale, recuperando il materiale naturale proveniente dagli scavi.
La sezione trasversale di tipo C1, risulta composta da due corsie di ml. 3,75 e due banchine bitumate di ml. 1,50, per complessivi ml. 10,50 (vedi immagine 3). A seguito dell'interramento, la piattaforma stradale è stata integrata con banchine di ml. 1,25 e cunette stradali alla francese adeguatamente dimensionate per raccogliere e convogliare le acque meteoriche nelle apposite vasche di trattamento.

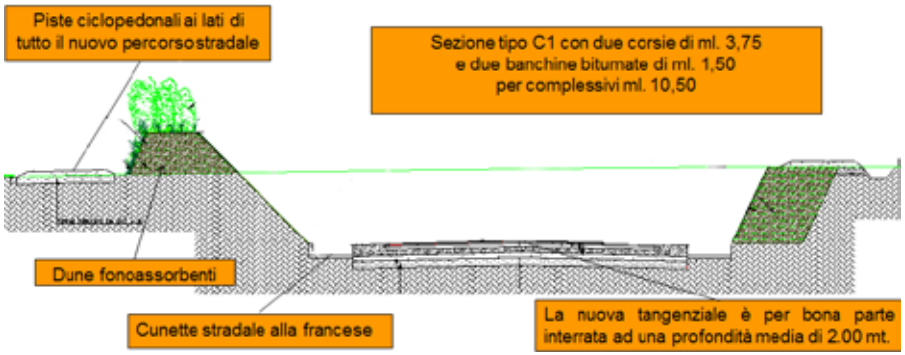


Immagine 3 - *Sezione Tipo*

I tre cavalcavia che attraversano il nuovo asse in corrispondenza di Via Serra, Via De Sanctis, Via Tassoni, necessari per consentire i collegamenti trasversali fra i quartieri sia esistenti che di nuovo insediamento, sono costruiti con l'obiettivo di ottimizzarne l'inserimento nell'ambito del contesto. Per questo si è scelta la tipologia ad arco a via inferiore (con l'impalcato appeso attraverso tiranti) al fine di realizzare opere di scavalcamento il più snelle possibili, contenendo lo spessore dell'impalcato in modo da ridurre conseguentemente anche l'altezza dei rilevati di accesso.

Immagine 4 - *Vista del cavalcavia su via Serra*

Come ulteriore azione mitigatrice, nelle aree adiacenti all'infrastruttura si sono previste ampie zone di verde. Lungo tutto il percorso stradale, si è realizzata una pista ciclo-pedonale che rappresenta un'ottima opportunità di collegamento tra il territorio urbano ed il "parco-campagna" del Torrente Crostolo.

Il manto stradale a sette anni dalla entrata in esercizio, non presenta alcun tipo di ripristino e le condizioni della pavimentazione lasciano presagire che tale previsione sarà ampiamente superata in futuro.

Immagine 5 - *Stato attuale dei luoghi*

1.3 - Soluzioni sostenibili per la pavimentazione della Variante di Canali

Nel quadro della complessiva attenzione agli elementi di sostenibilità ambientale dell'opera, anche la pavimentazione stradale, che per superficie e visibilità rappresenta la principale componente strutturale, è stata messa a punto al fine di garantire il minimo impatto ambientale e la massimizzazione dei benifici ottenibili mediante questa nuova opera. In particolare, la soluzione individuata per la pavimentazione prevede il ricorso ad una tecnologia che consente, tramite l'impiego di particolari conglomerati bituminosi, di ottenere significative migliorie sia dal punto di vista prestazionale che dal punto di vista dell'impatto ambientale dell'intero ciclo produttivo. Tale tecnologia, nota come Asphalt Rubber, è infatti caratterizzata da precise caratteristiche che consentono di coniugare la particolare vocazione ambientale del materiale, che incorpora una significativa percentuale di polverino di gomma da Pneumatici Fuori Uso (PFU), alle notevoli prestazioni e durabilità registrate nelle pavimentazioni in cui è impiegato.Le particolari caratteristiche dei conglomerati bituminosi impiegati, realizzati con tecnologia Asphalt Rubber, hanno inoltre consentito una significativa riduzione dello spessore di applicazione degli stessi: dagli originali 25 cm di spessore del pacchetto previsto nel progetto preliminare, ai 14 cm complessivi effettivamente adottati a livello esecutivo. Le potenzialità ottenibili dall'impiego di tale tecnologia hanno consentito la sostituzione della base a caldo, di tipo tradizionale, con una base interamente riciclata a freddo con l'impiego di fresato stradale, emulsione bituminosa da riciclaggio e cemento, consentendone la confezione e la successiva applicazione totalmente a freddo (temperatura di confezionamento del legante < 70°C, posa a temperatura ambiente).

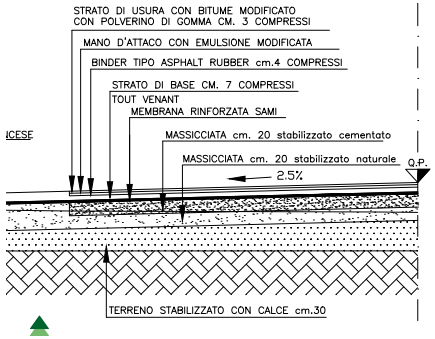


Immagine 6 - *Sezione della pavimentazione stradale*

1. *Strato di usura, tipo Asphalt Rubber curva granulometrica Gap Graded, con inerti di natura basaltica diametro massimo 12,50 mm, con bitume modificato con polverino di gomma riciclata da Pneumatici Fuori Uso, tenore compreso tra il 7,5% e il 8,5% del peso della miscela;*
2. *Binder in conglomerato bituminoso tipo Asphalt Rubber con inerti di natura calcarea con bitume modificato con polverino di gomma riciclata, tenore compreso tra il 7,5% e il 8,5% in ragione del peso della miscela;*
3. *Conglomerato bituminoso per strato di base (tout venant) di fresato stradale con aggiunta di emulsione bituminosa da riciclo in misura del 4%, e cemento in misura del 2%;*
4. *Membrana rinforzata SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer). Realizzata mediante lo spandimento di bitume Asphalt Rubber (temperatura > 180 °C) in ragione di 2,2 ± 0,2 kg/m^2, stesa di graniglia basaltica, pezzatura 8-12 mm, data in quantità di 14 ± 2 Kg/m^2. rullatura con rullo gommato e successivo asporto con motospazzatrice della graniglia non bene ancorata alla membrana;*
5. *Misto stabilizzato cementato;*
6. *Misto stabilizzato naturale;*
7. *Trattamento a calce del terreno di fondazione in loco con percentuali di calce compresa tra il 2% e il 3 %.*

Ai vantaggi ottenuti con la riduzione del prelievo di materiale di cava, va quindi sommato il minore impiego di bitume e la produzione e stesa a temperature ridotte, con un significativo risparmio energetico e migliori condizioni di lavoro per gli operatori.
Altro beneficio significativo, ma spesso non sufficientemente considerato e progettualmente previsto, è che il minore impiego di materie prime, comporta una significativa riduzione del traffico pesante sulla viabilità di adduzione al cantiere, contribuendo contestualmente a ridurre le emissioni di CO_2 anche in fase di costruzione.
Da ultimo si evidenzia che l'adozione di tali tecnologie ha comportato anche una sensibile riduzione dei tempi di costruzione dell'opera, con ovvia soddisfazione di residenti e utenti della viabilità di quartiere.

Nella Provincia, altri interventi analoghi sono stati realizzati a Castelnuovo Ne Monti, Quattro Castella, Correggio e Reggio Emilia. Nella totalità dei casi, ad anni dalla loro realizzazione non si sono resi necessari interventi manutentivi e le pavimentazioni si trovano tutt'ora in condizioni di esercizio simili a quelle di una strada nuova

1.4 - Conclusioni

Le particolari qualità dei conglomerati di tipo Asphalt Rubber hanno consentito di determinare, nella fase di dimensionamento della pavimentazione, una previsione di vita utile del manto di usura di almeno otto anni prima della necessità di interventi manutentivi.
Previsione sinora rispettata, poiché **il manto stradale a sette anni dalla entrata in esercizio, non presenta alcun tipo di ripristino e le condizioni della pavimentazione lasciano presagire che tale previsione sarà ampiamente superata in futuro.**
L'impiego di tecniche e materiali innovativi, il largo ricorso a lavorazioni in sito, la riduzione quantitativa dei materiali impiegati e delle temperature delle lavorazioni, fanno della variante di Canali ad oggi l'unica strada interamente green realizzata nel nostro paese.
Essa infatti recepisce integralmente i CAM (criteri ambientali minimi) per la progettazione e la realizzazione di opere pubbliche, pur essendo stata concepita e realizzata quando questi non erano stati ancora diramati dal Ministero dell'Ambiente.
Ci sembra inoltre particolarmente significativo il constatare che, come spesso avviene, l'innovazione genera innovazione e buone pratiche.
A seguito della realizzazione della variante di Canali, pavimentazioni di tipo Asphalt Rubber sono state realizzate sulla viabilità provinciale e dei comuni del territorio, con finalità manutentive, o per meglio dire di riqualificazione di pavimentazioni spesso sotto dimensionate o delle quali si volevano comunque migliorare le qualità di portanza, sicurezza della circolazione veicolare, abbattimento della rumorosità e durabilità delle opere.

I suddetti interventi sono stati realizzati nei seguenti comuni della Provincia:
- **Castelnuovo Ne Monti**
- **Quattro Castella**
- **Correggio**
- **Reggio Emilia**

Nella totalità dei casi sopra citati, ad anni dalla loro realizzazione non si sono resi necessari interventi manutentivi e le pavimentazioni si trovano tutt'ora in condizioni di esercizio simili a quelle di una strada nuova; ulteriore dimostrazione questa, che innovare - in particolare in termini di conservazione dell'ambiente e di un uso sostenibile delle risorse che offre - genera risparmi sia ambientali che economici.
Il maggiore prezzo unitario iniziale di alcuni dei materiali impiegati (i prezzi del conglomerato di tipo A.R., sono attualmente simili a quelli di un conglomerato SBS e sono destinati a diminuire nel tempo con la diffusione di mercato), è ampiamente compensato nel breve e medio periodo dai minori costi che una progettazione e realizzazione valida comporta in termini manutentivi e di fruizione delle opere.
I minori costi delle opere di costruzione e di manutenzione di una pavimentazione di tipo Asphalt Rubber, rispetto ad una strada convenzionale, sono valutabili in circa il 40% in meno nell'intero ciclo di vita, riducendo fortemente anche i costi sociali (incidentalità, inquinamento acustico) spesso non sufficientemente considerati, ma che presentano un impatto economico, di non facile valutazione, ma sicuramente importante.
Va sottolineato che nella formazione di un conglomerato Asphalt Rubber di 3 cm si riutilizza un pneumatico fuori uso ogni 6/7 mq di superficie con grandi benefici per l'ambiente (ad es. se ne evita l'utilizzo come combustibile nell'industria) e con costi ridotti per la movimentazione (Km 0).
L'utilizzo di tecnologie innovative, quali stabilizzazioni e riciclaggi a freddo in situ (per la costruzione di fondazioni e basi bitumate), di pavimentazioni in conglomerato bituminoso di tipo Asphalt Rubber (silenziose sicure e durevoli e con costi di gestione ridotti), nell'intero ciclo di vita, consente di programmare con certezza di tempi e di costi, la manutenzione delle opere, creando i presupposti per una corretta gestione del patrimonio stradale, per la quale il nostro paese è attualmente nelle ultime posizioni in Europa.
Basti pensare che l'Italia è il paese europeo che fresa più pavimentazioni in assoluto (ciò fa ritenere che si faccia troppo spesso ricorso a tecniche manutentive indifferenziate e spesso inadeguate) ed è al contempo quello che riutilizza questa importante risorsa in misura minore: 15-20% contro il 70/85% di Francia, Germania e Regno Unito e il 98% dell'Olanda.
Altrettanto si può dire del riutilizzo del polverino di gomma da PFU che è un prodotto dalle elevatissime qualità elastomeriche e può contribuire significativamente al miglioramento della qualità generale delle pavimentazioni, abbattendone i costi economici di gestione ed ambientali, il tutto in una prospettiva di rilancio delle politiche di intervento pubblico, che può rappresentare un sicuro volano di ripresa delle economie locali, razionalizzando gli interventi e qualificando al contempo la pubblica amministrazione.
La variante di Canali e la Provincia di Reggio Emilia ne rappresentano un eccellente esempio.

2. I monitoraggi sulle pavimentazioni della Variante di Canali: studio delle performances strutturali e funzionali

*A cura del **Dott. Ing. Fabio Picariello***
Pavenco Pavement Engineering Consulting srl

Introduzione alla relazione del Dott. Ing. Picariello

a cura di Ecopneus

La scelta dell'amministrazione della Provincia di Reggio Emilia di modificare il progetto originale, nasce da alcune considerazioni di carattere strettamente ambientale, intese non solo a limitare l'impatto delle opere sull'ambiente circostante in fase esecutiva, ma anche a garantirne la gestibilità nell'arco dell'intero ciclo di vita dell'opera, con lo scopo di ridurre il più possibile il ricorso ad interventi manutentivi a parità di costo iniziale.
Un aspetto da sottolineare è che quando nel 2006 venne redatto il progetto originale, in Italia non erano ancora diffuse tecnologie in grado di soddisfare completamente questi criteri. Solo successivamente, con l'inizio della distribuzione anche sul territorio nazionale dei leganti modificati con polverino di gomma da PFU (Asphalt Rubber), si è presentata l'opportunità concreta di raggiungere pienamente gli obiettivi posti al momento del concepimento dell'opera.
La tecnologia Asphalt Rubber ha consentito, infatti, la costruzione di pavimentazioni di spessore sensibilmente inferiore a parità di prestazioni meccaniche (15 cm complessivi invece dei 25 previsti in origine) con un prelievo da cava di materiali vergini di gran lunga inferiore. ***La minore necessità di materiali ha comportato anche una significativa riduzione dei trasporti necessari all'ammanimento dei materiali di cantiere: un aspetto da non sottovalutare e che ha portato inoltre un notevole beneficio per lo stato della viabilità circostante ed il benessere della popolazione residente.***
In sede di variante si è tenuta in considerazione anche la probabile eccessiva rigidezza della pavimentazione prevista in origine, che avrebbe potuto portare alla comparsa di fenomeni di fessurazione già nei primi anni di esercizio. Si è quindi scelto di ovviare mediante l'applicazione di una membrana SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), costituita in opera con l'applicazione a mezzo spanditrice termica di 2,2 kg di bitume di tipo Asphalt Rubber e la posa di graniglia di copertura di pezzatura 8/12 mm, direttamente sul misto cementato con lo scopo di limitare la riflessione di eventuali fessurazioni verso gli strati bitumati sovrapposti.
Tale scelta, unitamente alle particolari caratteristiche dei conglomerati di tipo Asphalt Rubber ha inoltre permesso la sostituzione della prevista base a caldo di 12 cm di spessore, con una base riciclata a freddo (temperatura di confezionamento e posa in opera inferiore a 70°C) con fresato stradale emulsione da riciclo e cemento, per uno spessore complessivo di soli 7 cm consentendo un ulteriore risparmio di materie prime vergini.
La tecnologia Asphalt Rubber ha consentito inoltre una significativa riduzione del rumore da rotolamento rispetto al manto di usura previsto che, nonostante l'elevata qualità prestazionale, risultava comunque una fra le soluzioni maggiormente rumorose. Dal momento dell'apertura al traffico, avvenuta a maggio 2009, la variante di Canali è stata sottoposta ad un traffico medio di circa 7.700 veicoli al giorno, consistenti per l'80% in veicoli leggeri e per il restante 20% in veicoli commerciali equamente ripartiti fra leggeri e pesanti.
Nei sei anni trascorsi dal maggio 2009 al maggio 2015, la pavimentazione ha quindi subito un numero di passaggi di oltre 2.500.000 veicoli annui, per un totale di oltre 15.000.000 di passaggi di cui non meno di 1.500.000 veicoli pesanti, caratterizzati da carichi per asse di 8 ton (80 Kn).
Già alla semplice constatazione visiva, l'opera conferma di avere ben sopportato i volumi di traffico di progetto. La pavimentazione infatti non mostra segni di fessurazione e deformazione della sagoma stradale, indici di cedimento strutturale o invecchiamento precoce degli strati bitumati, né di decadimento delle caratteristiche funzionali in termini di coesione e rugosità superficiali e la totale assenza di fenomeni di ormaiamento; condizioni base per garantire la sicurezza della circolazione, soprattutto in presenza di fenomeni atmosferici avversi. Per avere conferma del mantenimento di queste prestazioni nel tempo si è quindi deciso di intraprendere una nuova campagna di misurazioni volte a: verificare lo stato della pavimentazione attraverso una serie di indagini strutturali; verificare lo stato della pavimentazione dal punto di vista delle emissioni acustiche dovute al traffico; tracciare un bilancio ambientale a consuntivo dei primi 6 anni di esercizio della struttura, in modo da documentarne le prestazioni riferite già ad una significativa porzione della vita utile prevista.
Le rilevazioni strutturali sulla pavimentazione sono state affidate alla società PAVENCO - Pavement Engeneering Consulting Srl di Ferrara che ha avviato un'indagine studio in due fasi articolate nel prelievo di carote dalla pavimentazione stradale (14 carote per senso di marcia, prelevate ad aprile 2015) e nell'esecuzione di prove di laboratorio per la caratterizzazione fisica e meccanica della sovrastruttura stradale.
Le prove effettuate sui campioni hanno riguardato la verifica della curva granulometrica, della percentuale dei vuoti e della percentuale di bitume; sono state inoltre verificate le prestazioni dei conglomerati bituminosi a trazione indiretta, con modulo di rigidezza dinamico e di resistenza alla deformazione permanente.
Le prove eseguite hanno confermato il rispetto delle ipotesi di progetto e la cura nella confezione dei conglomerati in impianto da parte dell'azienda produttrice, la CCPL di Reggio Emilia.
Successivamente sono state effettuate prove non distruttive di tessitura superficiale e di rilievo delle caratteristiche strutturali, rispettivamente con macchinari SCRIM E FWD (Falling Weight Deflectometer) i cui risultati hanno confermato ulteriormente la validità delle ipotesi progettuali, così come la corretta esecuzione nella posa dei conglomerati bituminosi ad opera della impresa UNIECO di Reggio Emilia.
Da ultimo si è potuto constatare il mantenimento delle prestazioni acustiche, con emissione sonore inferiori alle pavimentazioni coeve prese a confronto, nonostante la quasi totale asportazione del legante di superficie a causa dell'azione del traffico.
A distanza di 6 anni dall'entrata in esercizio della pavimentazione, le indagini effettuate hanno confermato la validità della scelta intrapresa sia in termini di prestazioni che di impatto ambientale ed economico.
La variante Canali non ha subito ad oggi alcun tipo di intervento manutentivo, conservando caratteristiche strutturali e funzionali superiori rispetto ad ogni altro tipo di pavimentazione con caratteristiche confrontabili.

2.1 - Campagna di indagini

La sovrastruttura della Variante di Canali è stata indagata dal punto di vista meccanico, strutturale e delle caratteristiche funzionali.
Lo studio per la valutazione delle performance della Variante di Canali è stato diviso in due fasi: la prima fase caratterizzata dall'esecuzione di prove distruttive e di indagini non distruttive, la seconda fase di elaborazione e analisi dei risultati e valutazione della vita utile residua della pavimentazione.
Le indagini distruttive sono consistite nel prelievo di carote per la caratterizzazione fisica e meccanica del materiale posto in opera; le indagini non distruttive sono state eseguite tramite rilievo della tessitura superficiale con macchinario SCRIM e rilievo delle caratteristiche strutturali della pavimentazione con *Falling Weight Deflectometer*, FWD.

2.2 - Caratterizzazione fisico meccanica

Per la caratterizzazione fisico-meccanica sono state prelevate 14 carote in ambo i sensi di marcia: 7 carote in direzione Reggio Emilia, 7 carote in direzione Canali (Immagine 7).
La composizione delle miscele è stata studiata tramite le prove per la determinazione della percentuale di bitume, della curva granulometrica e della percentuale dei vuoti residui.
La caratterizzazione meccanica è stata eseguita tramite le seguenti prove di laboratorio:

- Resistenza alla trazione indiretta (UNI EN 12697-23)
- Modulo di rigidezza dinamico (UNI EN 12697-26 Annesso C)
- Resistenza alla deformazione permanente (UNI EN 12697-25)

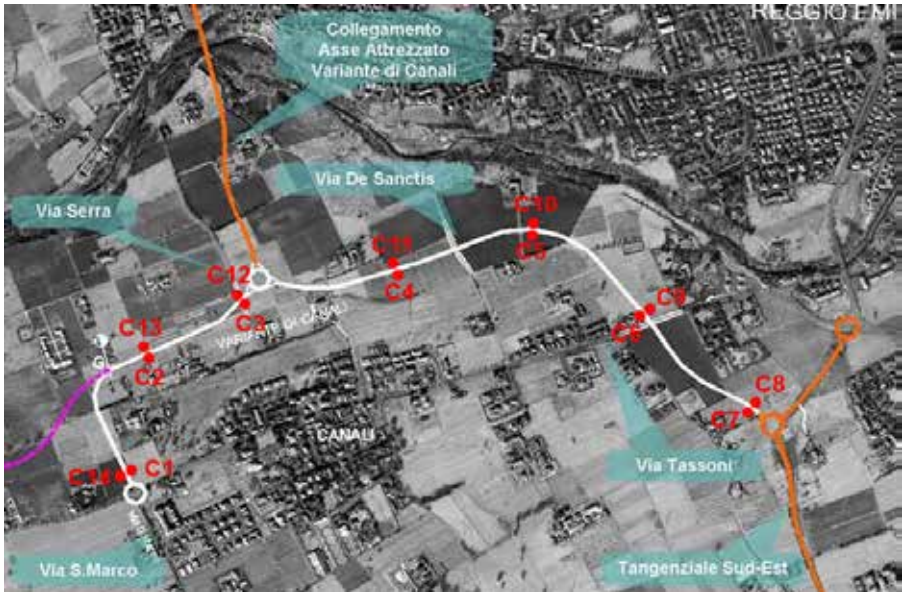


Immagine 7 - *Ubicazione delle carote prelevate*

2.3 - Composizione delle miscele

La determinazione della percentuale di bitume ha fornito i seguenti risultati:

	% di bitume Bc		
Campione	**Usura**	**Binder**	**Base a freddo**
C2	8.4	8.3	5.1
C4	8.1	8.2	4.9
C6	7.7	8.0	5.4
C8	8.3	8.5	5.7
C10	8.0	7.9	6.1
C12	8.9	8.5	5.8
C14	9.2	7.8	5.7
Mix design	8,2	7,6	-

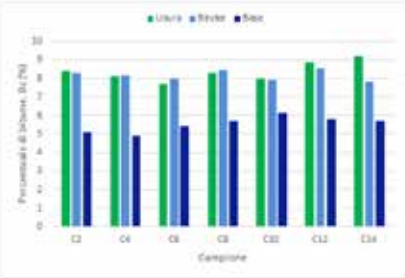


Immagine 8 - *Risultati delle prove di estrazione del bitume*

Lo strato di usura è caratterizzato da una valore di Bc medio di 8,4%, il binder da un valore medio di 8,2% e la base a freddo di 5,5%.
La determinazione delle curve granulometriche degli strati di usura e binder con Asphalt Rubber hanno evidenziato una maggiore quantità di fini rispetto alla curva di mix design (tracciato nero in immagine 9). Ciò è dovuto alla frazione inorganica del polverino (silice, ossidi metallici e carbon black incombusto) che rimane incombusto durante l'ignizione e va ad aggiungersi al filler naturale in fase di setacciatura.
La curva granulometrica della base riciclata a freddo presenta una maggiore variabilità, dovuta alla presenza del fresato all'interno della miscela, il quale, per la sua stessa natura, è caratterizzato da una maggiore eterogeneità geometrica.

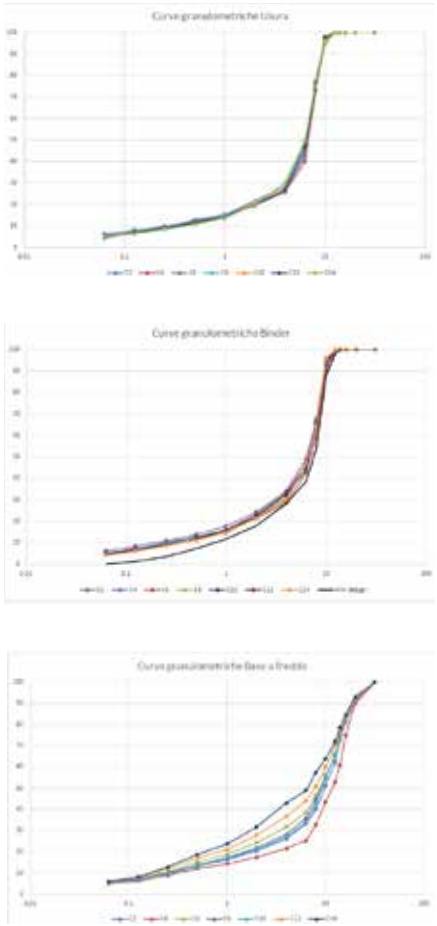
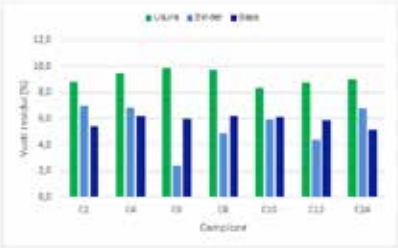


Immagine 9 - *Risultati delle prove di analisi granulometrica*

L'analisi dei vuoti residui all'interno delle carote prelevate ha fornito i seguenti risultati:

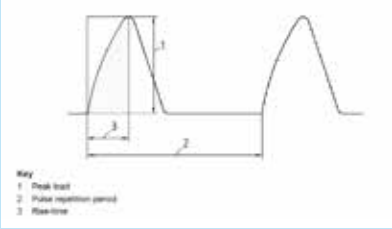
	% vuoti residui		
Campione	**Usura**	**Binder**	**Base a freddo**
C2	8.8	7.0	5.4
C4	9.5	6.9	6.2
C6	9.8	2.4	6.0
C8	9.7	4.9	6.2
C10	8.3	5.9	6.2
C12	8.8	4.4	5.9
C14	9.0	6.8	5.1



2.4 - Caratterizzazione meccanica

Modulo di rigidezza

La rigidezza del conglomerato bituminoso è la capacità di diffondere le tensioni al proprio interno. Il modulo di rigidezza dei materiali viscoelastici può essere paragonato, per materiali con caratteristiche puramente elastiche, al Modulo di Young. La procedura può essere impiegata per classificare le miscele bituminose sulla base della rigidezza, come guida per la prestazione relativa nella pavimentazione, per ottenere dati per stimare il comportamento deformativo su strada e per giudicare i dati di prova in accordo alle specifiche per le miscele.
Le carote prelevate sono state sottoposte alla prova di **Modulo di rigidezza** in configurazione di Trazione Indiretta, come da Annesso C della norma UNI EN 12697-26. In questa configurazione il provino cilindrico viene sottoposto ad un carico ciclico costituito da un impulso a forma di semi senoverso con un tempo di crescita del carico *(rise time)* di 124±4 ms e tempo di ripetizione dell'impulso di 3±0.1 s (Immagine 11).



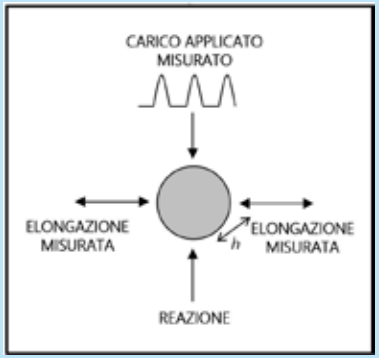
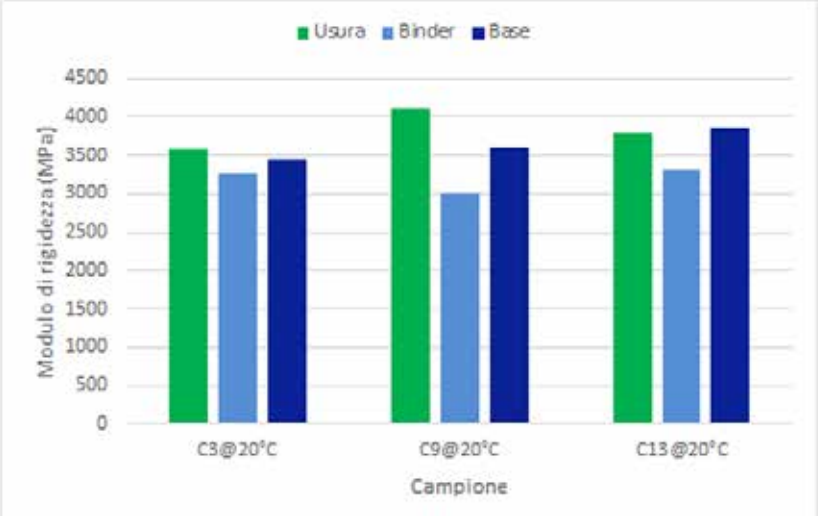


Immagine 10 - *Forma dell'impulso di carico in configurazione di trazione indiretta*

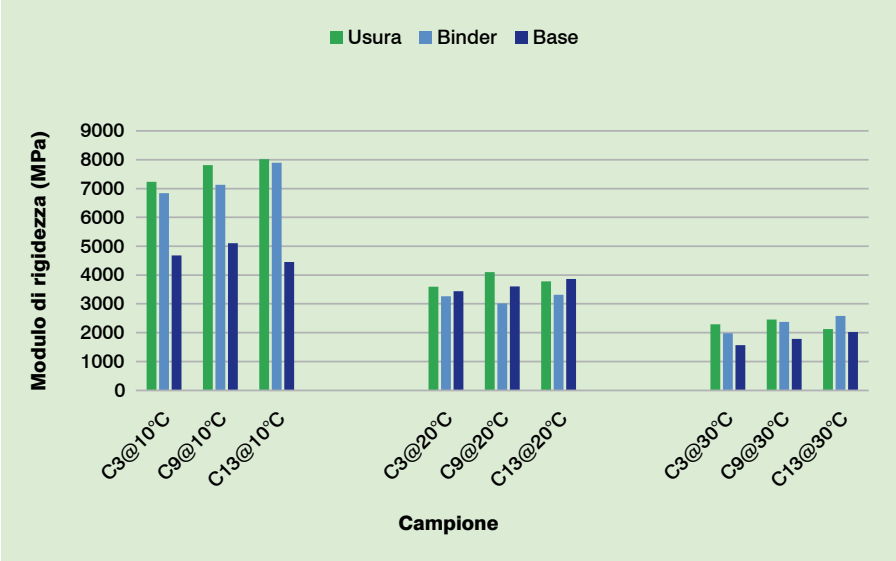
Il modulo di rigidezza misurato è di seguito riportato.

Modulo di rigidezza (MPa) @20 °C			
Campione	**Usura**	**Binder**	**Base a freddo**
C3	3589	3258	3439
C9	4103	3012	3601
C13	3781	3316	3860



I test per la determinazione dei moduli di rigidezza sono stati eseguiti, oltre che alla temperatura standard di 20 °C, anche alle temperature di 10 e 30 °C, per avere ulteriori informazioni sul comportamento reologico dei materiali.

Come si può vedere immagine di pagina successiva, i materiali confezionati a caldo, cioè usura e binder, sono maggiormente suscettibili alla temperatura, mentre la base riciclata a freddo esibisce moduli di rigidezza che variano meno in funzione della temperatura.



Si è voluto anche mettere a confronto la risposta meccanica in termini di rigidezza dell'usura Asphalt Rubber Gap Graded con uno Splitt Mastix Asphalt tradizionale testato in una precedente sperimentazione, in quale ha una composizione simile sia dal punto di vista della distribuzione granulometrica sia della percentuale di bitume aggiunto.
Come si vede dal grafico in Immagine 12, all'aumentare della temperatura, il modulo di rigidezza dello SMA diminuisce di una percentuale maggiore rispetto a quanto non avvenga per l'usura Asphalt Rubber. Infatti tra i valori di modulo determinati a 10 e 20 °C, nello SMA si ha una perdita del 58% rispetto al valore determinato alla temperatura più bassa, mentre nell'usura Asphalt Rubber tale perdita è del 50%; analogamente avviene nel passaggio tra i 20 e i 30 °C.
Ciò significa che l'aggiunta di polverino di gomma ha la tendenza a diminuire la perdita di viscosità all'interno delle miscele bitumino-se apportando quindi una diminuzione della suscettibilità alla temperatura delle miscele in cui è impiegato.

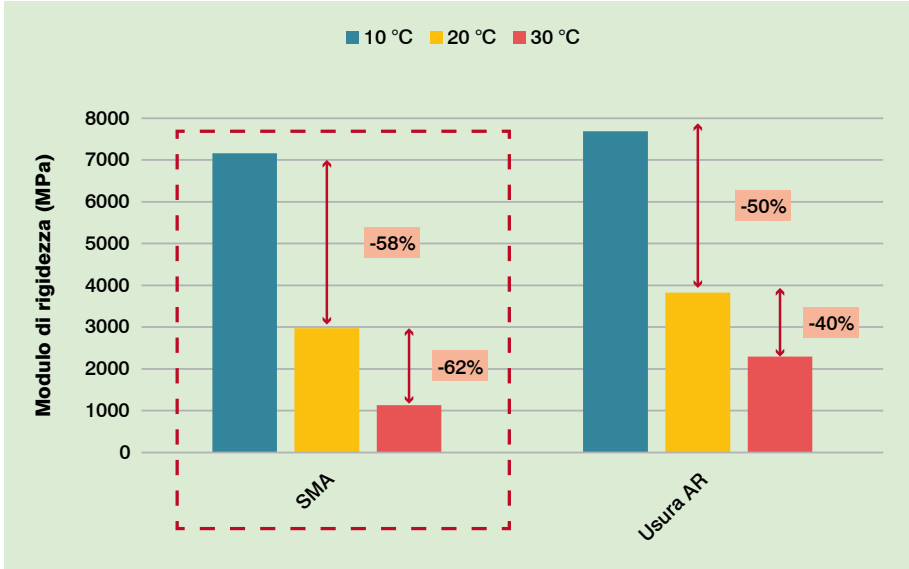


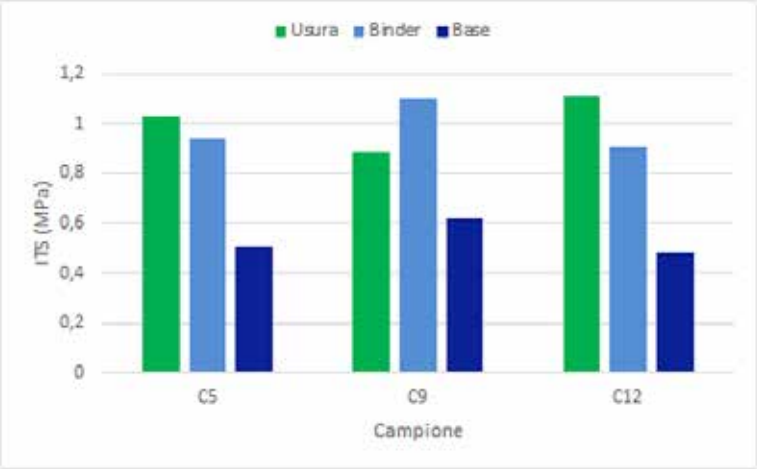
Immagine 11 - *Diminuzione della suscettibilità alla temperatura con l'impiego di polverino di gomma*

La minore necessità di materiali ha comportato anche una significativa riduzione dei trasporti necessari all'ammanimento dei materiali di cantiere: un notevole beneficio per lo stato della viabilità circostante ed il benessere della popolazione residente

2.4.1 - Resistenza alla trazione indiretta

Le carote prelevate sono state testate tramite la prova di **Resistenza a trazione indiretta (ITS)** in conformità alla norma UNI EN 12697-23.
I risultati ottenuti dalle prove di resistenza alla trazione indiretta eseguite sulle carote sono riportati qui sotto:

ITS, Indirect Tensile Strength (MPa)			
Campione	**Usura**	**Binder**	**Base a freddo**
C3	1.03	0.94	0.51
C9	0.89	1.1	0.62
C13	1.11	0.91	0.48



I valori di ITS dell'usura e del binder Aphalt Rubber sono paragonabili tra loro e confrontabili con quelli ottenibili da conglomerati bituminosi tradizionali.

2.4.2 - Resistenza alla deformazione permanente

La **resistenza alla deformazione permanente** del materiale in esame è stata determinata tramite la prova di Creep dinamico secondo la norma UNI EN 12697-25.

Creep dinamico

La prova di **Creep dinamico** consiste nell'applicazione ciclica di un carico statico di forma rettangolare in configurazione di compressione uniassiale, con frequenza di 0,5 Hz, ad un provino di conglomerato bituminoso alla temperatura tipica di 40 °C.

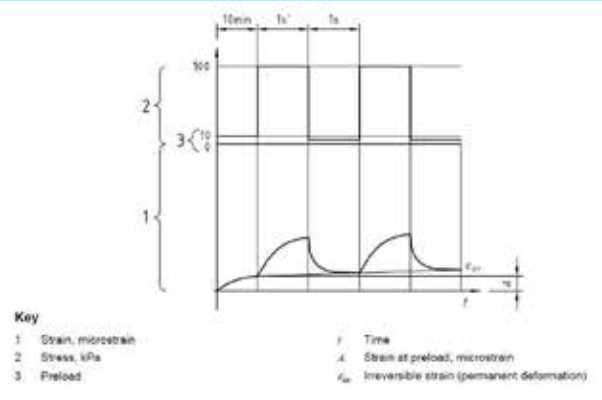


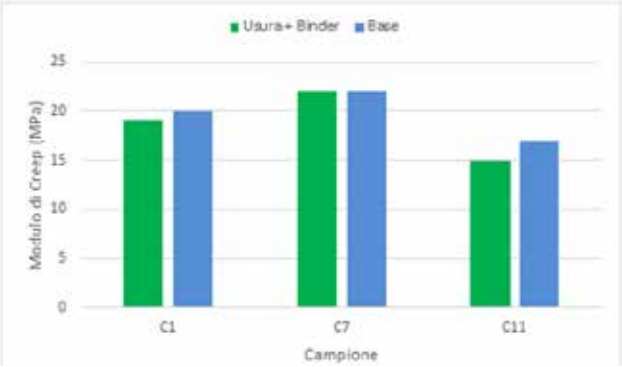
Immagine 12 - *Forma del carico applicato nella prova di creep dinamico*

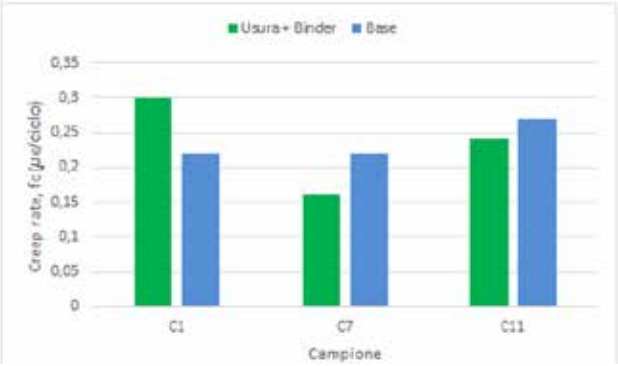
Durante il test vengono rilevate le variazioni di altezza del provino per ogni ciclo, da cui si ricavano le deformazioni permanenti (espresse in % sullo spessore iniziale), rappresentate nel loro andamento tramite la **curva di creep** (Immagine 18).

Immagine 13 - *Configurazione di prova di creep dinamico*

Le prove eseguite hanno fornito i seguenti risultati:

	Modulo di Creep (MPa)	Creep rate, fc ($\mu\varepsilon$/ciclo)	Modulo di Creep (MPa)	Creep rate, fc ($\mu\varepsilon$/ciclo)
Campione	**Usura + Binder**		**Base a freddo**	
C1	19	0.30	20	0.22
C7	22	0.16	21	0.22
C11	15	0.24	17	0.27





I parametri determinati con la prova di Creep dinamico sono i seguenti:.

$$\varepsilon_n = 100 \frac{h_o - h_n}{h_0}$$

Immagine 14 - *Deformazione cumulativa assiale*

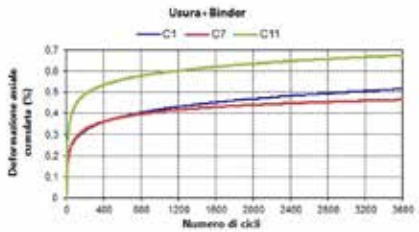
$$fc = \frac{\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}}{n_1 - n_2}$$

Immagine 15 - *Creep rate*

$$E_n = 1000 \frac{\sigma}{\varepsilon_n}$$

Immagine 16 - *Modulo di creep*

Le curve di creep, riportate in basso, rappresentano l'accumulo della deformazione permanente subita dalle carote. Il valore di deformazione assiale cumulata a fine prova è ε_n mentre la pendenza assunta dalla curva nel tratto lineare prende il nome di Creep rate, f_c.



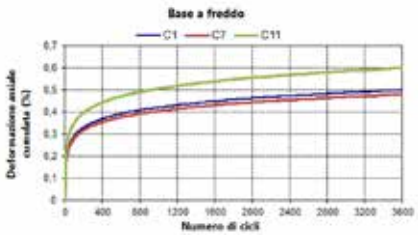


Immagine 17 - *Curve di creep delle carote testate*

Analogamente a quanto a quanto ottenuto dalla prova di resistenza alla trazione indiretta, i risultati sono paragonabili a quelli di conglomerati bituminosi tradizionali.

2.5 - Caratteristiche funzionali

Le caratteristiche di aderenza e di macrotessitura della pavimentazione sono state determinate tramite l'esecuzione di un rilievo ad alto rendimento con macchinario **SCRIM (Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine)**. Dall'indagine con macchinario SCRIM sono stati determinati tre parametri caratterizzanti l'aderenza e la macrotessitura della superficie stradale: **CAT** (Coefficiente di Aderenza Trasversale), **HS** (Altezza in sabbia) e **MPD** (Mean Profile Depth).

Coefficiente di aderenza trasversale

Il **Coefficiente di Aderenza Trasversale** dà indicazioni sull'effetto di interazione pneumatico-strada durante il rotolamento, necessario per garantire comfort di guida e sicurezza per l'utente. Tale parametro è influenzato dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione (levigatura, asperità degli inerti), dalle caratteristiche degli pneumatici (pressione di gonfiaggio, rigidezza del materiale) e dalle condizioni ambientali (asciutto, bagnato). La **macrotessitura (MPD e HS)** dà indicazioni riguardo l'asperità del manto stradale e influenza le proprietà di scorrimento dell'acqua meteorica, l'assorbimento del rumore di rotolamento, l' uniformità della superficie e le stesse caratteristiche di aderenza. Il Coefficiente di Aderenza Trasversale CAT si misura tramite macchinario SCRIM, percorrendo la tratta da indagare ad una velocità costante di circa 60 km/h.

Immagine 18 - *Tessitura superficiale della Variante di Canali*

Sul macchinario è montata una ruota sterzata e orientata di 20° rispetto alla direzione di avanzamento a diretto contatto con la superficie in modo da generare una sollecitazione laterale ortogonale al piano di misura. La ruota è caricata da una massa sospesa di 200 kg e la superficie viene bagnata con un flusso di acqua contenuto all'interno della cisterna da una portata prefissata.

Immagine 19 - *Dispositivo a ruota sterzata per la determina zione del CAT*

Il rapporto tra la sollecitazione generata lateralmente e la sollecitazione verticale tra la ruota e la pavimentazione fornisce la resistenza allo slittamento.
Il valore di CAT viene calcolato come media dei valori registrati su un tratto di lunghezza a scelta tra 2.5, 5 e 10 m.
La tessitura è definita come la *deviazione della superficie stradale da una superficie piana di riferimento con dimensioni definite*, determinata come la profondità media delle asperità superficiali create dalla distribuzione dei granuli costituenti lo strato superficiale della strada.
La macrotessitura determina la rugosità dovuta all'insieme delle asperità superficiali intergranulari della pavimentazione.

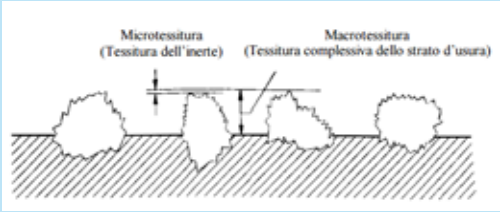


Immagine 20 - *Microtessitura e macrotessitura*

La microtessitura è dovuta alla scabrezza dei singoli elementi lapidei di cui è costituita la parte superficiale del manto stradale. La **macrotessitura** si determina tramite un sistema di due laser di Classe 1 posizionati su ambo i lati del macchinario e in linea con la ruota di misura dell'aderenza. Il valore di **MPD** viene calcolato misurando il valore di picco e quello medio del profilo su due sezioni consecutive lunghe 50 mm.
Il valore di **altezza in sabbia HS** viene derivato dal valore di MPD tramite la seguente formula: **HS = 0.2+0.8MPD**

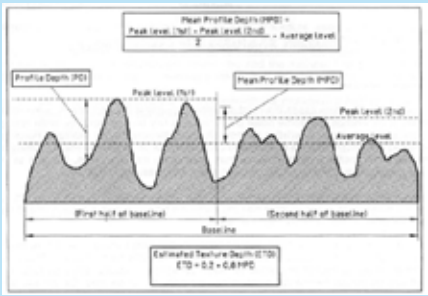
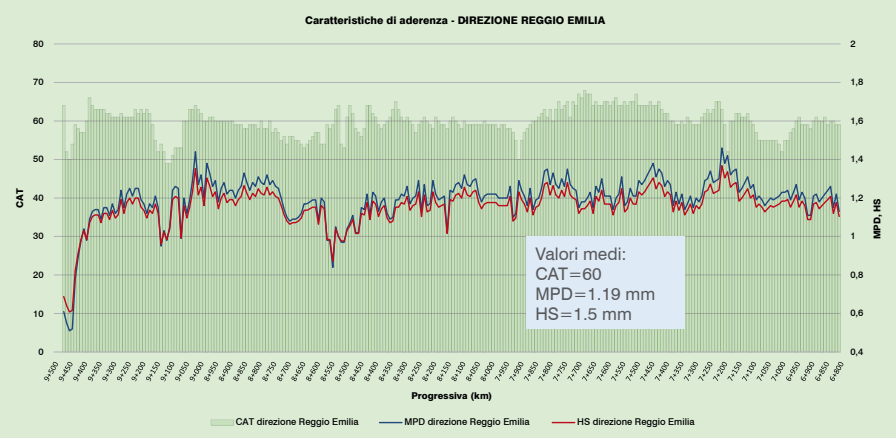
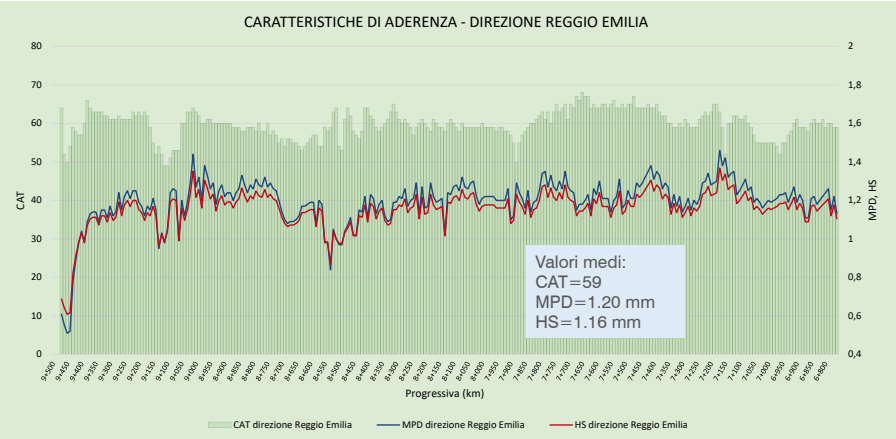


Immagine 21 - *Rappresentazione schematica di HS e MPD*

I valori caratterizzanti l'aderenza e la macrotessitura della pavimentazione sono rappresentati di seguito:





L'indagine delle caratteristiche funzionali della pavimentazione eseguita con SCRIM ha evidenziato le seguenti proprietà:

- CAT paragonabile ai valori richiesti dagli attuali Capitolati d'Appalto;
- MPD superiore ai valori richiesti dagli attuali Capitolati d'Appalto per usura drenante;
- HS superiore ai valori richiesti dagli attuali Capitolati d'Appalto per usura drenante.

I valori di HS, secondo le classificazioni della norma CNR 94/83, identificano una rugosità superficiale **GROSSA** (valori tra 0,8 e 1,2).

I valori di macrorugosità e aderenza vengono generalmente determinati in un periodo di tempo compreso tra il 15° ed il 180° giorno dall'apertura al traffico.

2.6 - Caratteristiche strutturali

2.6.1 - Falling Weight Deflectometer

Le caratteristiche di aderenza della pavimentazione sono state determinate tramite l'esecuzione di un rilievo ad alto rendimento con macchinario **FWD (Falling Weight Deflectometer)**.

Falling weight deflectometer

Il **Falling Weight Deflectometer** è uno strumento in grado di applicare alla superficie stradale un carico dinamico il quale produce una deformazione dell'intera sovrastruttura, diffusa in direzione radiale rispetto al punto di applicazione del carico (Immagine 22). Il carico è generato dalla caduta di una massa da un'altezza fissata, ed è trasmesso alla pavimentazione da una piastra circolare, a contatto con la superficie stradale, sulla quale il grave impatta. Il contatto tra la massa e la piastra avviene attraverso cilindri di gomma, la cui funzione è quella di smorzare il rimbalzo della massa, conseguente alla sua caduta.

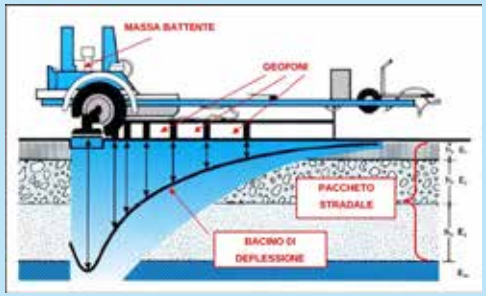


Immagine 22 - *Bacino di deflessione causato dalla massa battente dell'FWD*

Gli spostamenti verticali dei punti della superficie stradale vengono misurati, in direzione radiale rispetto al centro di carico, da sensori accelerometrici, i geofoni. L'insieme degli spostamenti verticali, corrispondenti a ciascun sensore, forma il bacino di deflessione relativo ad un punto di battuta.

Durante la prova si misurano i seguenti parametri:

- Carico di picco generato dalla massa battente, in kN;
- Valore dello spostamento verticale di un punto sulla superficie stradale, in µm.

Dalla conoscenza dei bacini di deflessione misurati è possibile valutare le caratteristiche meccaniche della pavimentazione. Con i dati acquisiti durante il rilievo, l'elaborazione si suddivide in due fasi: analisi deflettometrica e back-analysis.
L'analisi deflettometrica consiste nello studio delle curve di deflessione, che rappresentano la distribuzione spaziale degli spostamenti verticali misurati in direzione radiale rispetto al punto di battuta.
Per ciascun tratto di indagine, le curve di deflessione vengono confrontate, con lo scopo di individuare eventuali scostamenti puntuali rispetto alla risposta media del tratto. Dalle curve può essere valutato qualitativamente, dunque senza la definizione di una grandezza meccanica, il comportamento della sovrastruttura nel punto di battuta.
La back-calculation consiste nella determinazione dei **moduli elastici** degli strati della sovrastruttura tramite un processo iterativo.
I dati in ingresso sono:

- Bacino di deflessione misurato
- Entità del carico
- Spessore degli strati e materiali costituenti.

La sovrastruttura stradale è rappresentata, nel calcolo, da strati di materiale elastico lineare, omogeneo, isotropo, e semi-illimitati lateralmente, poggianti su un sottofondo illimitato in profondità. Alla pavimentazione, così schematizzata, è applicato il carico imposto in sito durante i test, e sulla base della teoria di Boussinesq, si calcolano le relative deflessioni.
Le proprietà meccaniche elastico-lineari di ciascuno strato, sono rappresentate quantitativamente dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson, e devono essere definite per ogni strato, nel calcolo.

Immagine 23 - *Schema di modellazione per il calcolo delle caratteristiche strutturali della pavimentazione*

2.7 - Indagine con FWD

L'indagine FWD sulla Variante di Canali è stata eseguita nei due sensi di marcia, in direzione Reggio Emilia e in direzione Canali, con un passo di battuta di circa 20 m. I moduli calcolati sono quindi quelli rappresentati nei seguenti grafici.

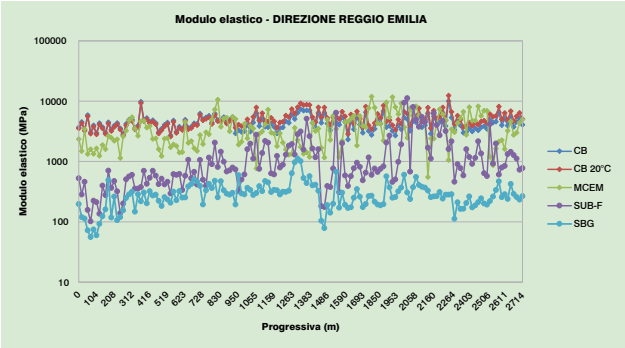


Immagine 24 - *Moduli elastici degli strati della pavimentazione in direzione Reggio Emilia*

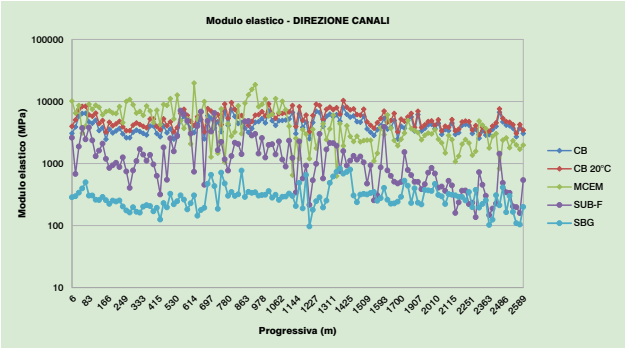


Immagine 25 - *Moduli elastici degli strati della pavimentazione in direzione Canali*

I valori di Modulo Elastico dei conglomerati bituminosi a 20 °C, calcolati sull'intera lunghezza della Variante, sono stati suddivisi in tratte omogenee tramite un'analisi statistica, con il metodo delle differenze cumulate.
L'analisi ha evidenziato la presenza di 4 sezioni omogenee in ambo le direzioni, di seguito rappresentate.

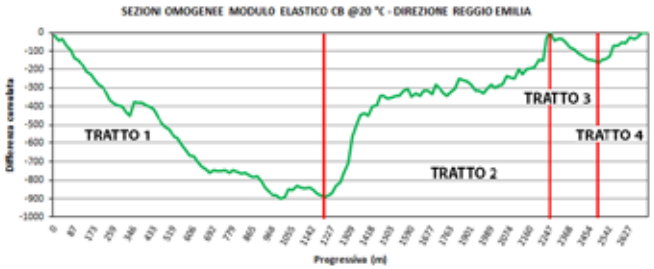


Immagine 26 - *Sezioni omogenee del modulo elastico del conglomerato bituminoso in direzione Reggio Emilia*

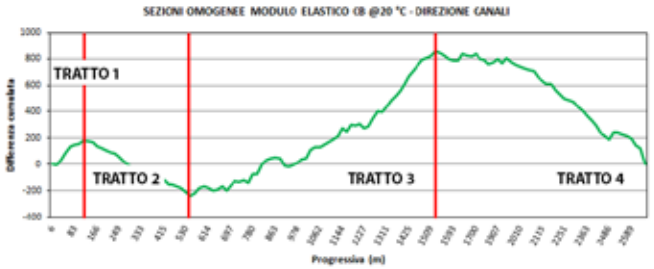


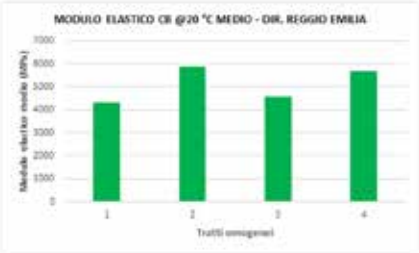
Immagine 27 - *Sezioni omogenee del modulo elastico del conglomerato bituminoso in direzione Canali*

Relativamente ai tratti individuati, i valori medi del modulo elastico, corrispondono a quanto riportato nelle tabelle e nei grafici sottostanti.

Tratto	Progressiva (m)	Modulo Elastico CB @20 °C medio
1	0-1193	4311
2	1193-2264	5855
3	2264-2489	4587
4	2489-2714	5662

Tratto	Progressiva (m)	Modulo Elastico CB @20 °C medio
1	0-133	6465
2	133-547	4215
3	547-1541	6454
4	1541-2701	4525

Tabella 1 - *Valori medi del modulo elastico del CB in direzione Reggio Emilia*



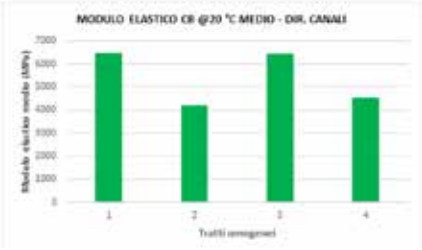


Immagine 28 - *Valori medi del modulo elastico del CB in dir. Canali e dir. Reggio Emilia*

2.8 - Vita utile residua

Il calcolo della vita utile residua consiste nella stima del danno cumulato all'interno della pavimentazione e del numero di cicli di carico a rottura residui, a partire dai valori di tensioni e deformazioni, dalla distribuzione dei carichi esterni e dalle curve di fatica dei materiali.
Per il calcolo del traffico, si è fatto riferimento ai flussi orari rilevati sull'infrastruttura durante l'ora di punta mattutina dalle 7:30 alle 8:30 di una giornata feriale.
Dall'andamento stimato dei flussi orari nel corso della giornata è stato desunto il traffico giornaliero medio TGM. Lo spettro di traffico è stato dedotto dalle categorie veicolari presenti nel catalogo CNR delle pavimentazioni stradali. Non essendo disponibili dati precisi, sono state fatte delle ipotesi relativamente a: percentuale di mezzi pesanti, coefficiente di ripartizione sulle corsie, tasso di crescita annuo e vita utile di progetto.
Il valore del traffico di progetto è stato convertito in **Assi Standard Equivalenti, ESALs**, ed è stato calcolato il numero di passaggi di un asse da 8 ton (80 kN) il cui danno sulla pavimentazione è equivalente al danno provocato dal traffico di progetto.
Con TGM di 7.656 veicoli al giorno, percentuale di veicoli commerciali leggeri e pesanti entrambe del 10%, vita utile di progetto di 20 anni e tasso di crescita del traffico dell'1% all'anno, il numero di passaggi ESAL durante la vita utile è risultato essere di 5.084.648.
La risposta meccanica della pavimentazione è stata calcolata in termini di:

- **Deformazioni orizzontali alla base dei conglomerati**, parametro significativo della durabilità degli strati superficiali in opera;
- **Tensioni verticali alla sommità del sottofondo**, indice della capacità portante sul lungo periodo della sovrastruttura;
- **Vita utile residua**, calcolata dallo stato tensionale e deformativo indotto nella sovrastruttura.

La vita utile residua della sovrastruttura della Variante di Canali risulta quindi essere come graficato in Figura 38.

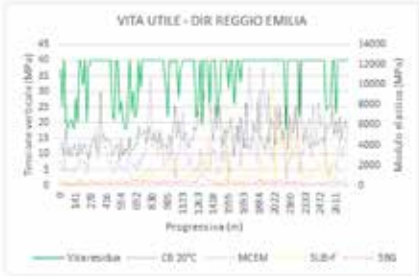


Immagine 29 - *Vita residua della sovrastruttura della Variante di Canali*

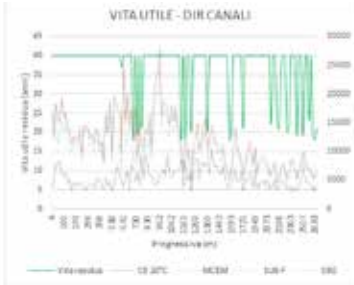


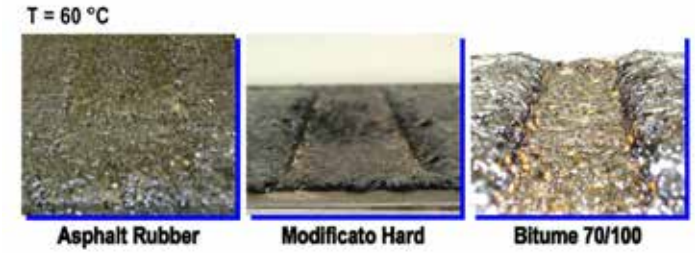
Immagine 30 - *Vita residua della sovrastruttura della Variante di Canali*

Il valore minimo della vita utile calcolato, che caratterizza quindi la vita utile residua dell'infrastruttura, è di 18 anni.

2.9 - Conclusioni

I principali vantaggi derivanti dall'impiego di Asphalt Rubber sono:

- **Elevata resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti**, con conseguente riduzione del tasso di **ormaiamento**;



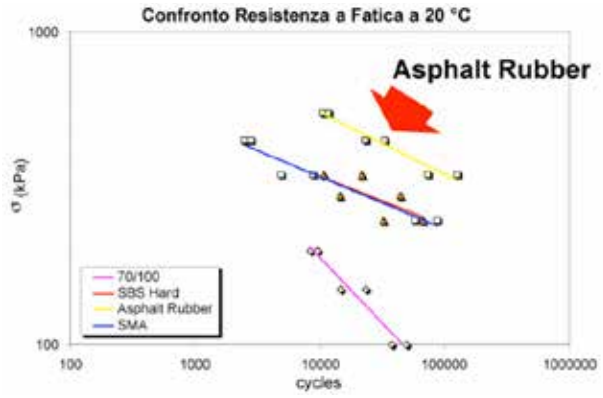
- **Elevati valori di CAT:** aderenza disponibile all'interfaccia pneumatico-pavimentazione, anche in presenza di condizioni meteorologiche sfavorevoli;
- **Alti valori di MDP:** riduzione dell'effetto spraying/aquaplanning e riduzione del rumore al rotolamento;
- Elevata resistenza a **fatica**: le proprietà elastiche della gomma sono trasferite al legante.

Tra i vantaggi indiretti derivanti dall'impiego di polverino di gomma all'interno delle miscele bituminose si possono citare i seguenti:

- Elevata resistenza all'invecchiamento termo-ossidativo per effetto della fissazione dei malteni nel processo di digestione
- Maggiore resistenza al congelamento;
- Aumento della vita utile della pavimentazione.

1 - *Vedi articolo "Asphalt Rubber: bitume modificato con polverino di gomma di pneumatici riciclata" di Ines Antunes – Felice Giuliani – Jorge B. Sousa – George Way*

La variante Canali non ha subito ad oggi alcun tipo di intervento manutentivo, conservando caratteristiche strutturali e funzionali superiori rispetto ad ogni altro tipo di pavimentazione con caratteristiche confrontabili



Lo studio condotto sulla Variante di Canali ha fornito ottimi risultati dal punto di vista dell'estensione della vita utile, la quale risulta essere, nei punti più critici, di ulteriori 18 anni oltre ai 6 già trascorsi dall'entrata in esercizio. Inoltre, la presenza del SAMI-R non è stata considerata nel calcolo strutturale, ma ricerche hanno mostrato che tale membrana fornisce l'equivalente di uno strato di conglomerato tradizionale di 150 mm nella capacità di evitare la propagazione delle fessure e ridurre le tensioni all'interfaccia degli strati, portando ad un'estensione della vita utile della pavimentazione. Dal punto di vista delle **caratteristiche funzionali**, cioè di aderenza e macrorugosità della superficie, la variante di Canali esibisce, **dopo 6 anni dall'apertura al traffico**, caratteristiche funzionali **paragonabili a quelle richieste ad una strada nuova.**

2 - *Vedi documento "Strategie di riabilitazione con Asphalt Rubber - SAM e SAMI in Asphalt Rubber"*

La vita utile della Variante di Canali risulta essere di ulteriori 18 anni oltre ai 6 già trascorsi

3. Analisi degli elementi di sostenibilità ambientale della Variante Canali di Reggio Emilia

*A cura del **Dott. Ing. Adriano Murachelli***
Presidente Associazione Ingegneri per l'Ambiente e il Territorio

Introduzione alla relazione del Dott. Ing. Murachelli

a cura di Ecopneus

Di seguito viene dettagliata la soluzione progettuale prevista per l'intervento in oggetto, quantificando il grado di miglioramento delle prestazioni attese rispetto a quelle di un tradizionale pacchetto stradale. Quindi, una volta definite tipologia e quantità delle lavorazioni, si procede all'analisi degli elementi che conferiscono alla pavimentazione realizzata particolari caratteristiche di sostenibilità ambientale, legate prevalentemente alla riduzione di materie prime e delle lavorazioni necessarie per l'esecuzione dell'intervento, oltre che alla maggiore durabilità della pavimentazione così ottenibile. La Variante Canali è forse la prima infrastruttura stradale in Italia progettata e realizzata secondo criteri ingegneristici attenti contemporaneamente sia al corretto dimensionamento strutturale che all'impatto ambientale ed economico di tutto il ciclo di vita dell'opera.

Rispetto le pavimentazioni convenzionali è infatti una pavimentazione più durevole, a bassa emissione sonora, più sicura, ha uno spessore ridotto a parità di prestazioni meccaniche ed ha un impatto sull'ambiente segnatamente inferiore sia in fase di costruzione che in fase di esercizio. Grazie alla variante progettuale adottata con l'utilizzo di pavimentazioni di tipo Asphalt Rubber è stato possibile raggiungere importanti obiettivi e gettare basi concrete per coglierne molti altri. In primis la scelta di un bitume modificato con il 20% di polverino di gomma da PFU per realizzare la membrana elastica sul misto cementato, gli strati di collegamento e di usura, ha consentito l'impiego di gomma da riciclo derivante dal trattamento di oltre 11.000 pneumatici a fine vita.

In virtù del minore spessore complessivo, per la costruzione della pavimentazione è stato prelevato il 40% in meno di inerti da cava (pari a -7.820 t) rispetto a quanto previsto nel progetto originale ed è stato impiegato il 25% in meno di bitume. Inoltre, grazie alla possibilità di adottare una base riciclata di fresato di asfalto stradale con emulsione bituminosa e cemento, sono state 220 le tonnellate di bitume non utilizzate di cui 68 t a freddo.

Un concreto contributo anche alla carbon footprint complessiva dell'intervento, dato che il minore utilizzo di conglomerati bituminosi a caldo, che necessitano di appositi macchinari che mantengano le temperature costanti nelle fasi di produzione e trasporto, ha comportato un taglio del 40% delle emissioni di CO_2 in atmosfera. Un netto miglioramento delle emissioni a cui ha contribuito anche la minore necessità di trasporti con mezzi pesanti.

Anche sul fronte dell'esposizione dei lavoratori ai fumi prodotti in fase di stesa i risultati sono positivi: benché la qualità dell'aria in cantiere sia comparabile tra l'utilizzo di conglomerati bituminosi convenzionali e di tipo Asphalt Rubber, la riduzione dei volumi di materiale necessari ha ridotto i tempi complessivi di realizzazione e dunque di esposizione dei lavoratori.

Il minore impiego di materiali in fase realizzativa ha comportato inoltre un abbassamento dei costi rispetto la realizzazione di una pavimentazione con bitumi convenzionali, nonostante il prezzo unitario dei bitumi modificati con polverino di gomma da PFU sia maggiore. Anche considerando i costi relativi all'intero ciclo di vita della pavimentazione il bilancio risulta positivo, in virtù delle peculiari caratteristiche di questi bitumi che consentono di mantenere inalterate nel tempo performance e caratteristiche strutturali.

Grazie ai minori quantitativi di materiali utilizzati e al minore fabbisogno energetico che è stato necessario con l'utilizzo di una base di fresato a "freddo", i conti economici dell'impresa appaltatrice sono inoltre tornati in positivo, mentre con una soluzione di tipo convenzionale sarebbero stati probabilmente in rosso.

La Variante Canali ha compiuto sette anni dall'inaugurazione ed ha sopportato il passaggio di quasi venti milioni di veicoli, di cui il 10% pesanti, senza mostrare ad oggi segni di deformazione della carreggiata stradale e senza aver avuto bisogno di interventi manutentivi; tutto lascia prevedere che si manterrà in ottime condizioni ancora per anni.

Il raggiungimento di dieci anni di esercizio senza significativi interventi sarebbe, e molto probabilmente sarà, la dimostrazione della validità e lungimiranza delle scelte progettuali adottate e rese possibili dalla tecnologia del reimpiego del polverino di gomma da PFU nei conglomerati bituminosi per le pavimentazioni stradali. Anche il confronto con lo stato delle pavimentazioni coeve adiacenti all'opera ne è la dimostrazione. Un risultato rimarchevole in termini sia economici che ambientali ad ulteriore dimostrazione che esiste un'alternativa ambientalmente sostenibile ed economicamente proficua, la cui adozione su vasta scala non potrà che contribuire in modo decisivo alla migliore gestione del patrimonio stradale da parte della Pubblica amministrazione.

La durata dei manti di usura di tipo convenzionale in Italia non supera mediamente i 4 anni prima della necessità di rifacimento: ciò ha finito per rendere la gestione del patrimonio stradale impossibile da sostenere, contribuendo inoltre in modo sostanziale alla stagnazione economica del settore. *Lo stato di generale dissesto nel quale versano le strade italiane, in molti casi al limite della transitabilità, nasce proprio dallo spreco di risorse dovuto a rifacimenti continui (e spesso inadeguati perché tendenti per lo più a garantire semplicemente la transitabilità nell'immediato e non la riabilitazione delle caratteristiche meccaniche delle pavimentazioni), unitamente alla crisi economica ed al conseguente dimezzamento dei quantitativi di conglomerato impiegati annualmente a scopo manutentivo.*

Le ricadute benefiche nell'adozione delle pavimentazioni modificate con polverino di gomma da PFU, per le singole economie locali e conseguentemente per l'intera economia nazionale sarebbero notevoli e potrebbero contribuire in modo significativo anche alla ripresa dei livelli occupazionali del settore.

3.1 - Lo stato di fatto della tecnologia Asphalt Rubber

Il conglomerato Asphalt Rubber è confezionato con bitume modificato con polverino di gomma riciclata e da più di 30 anni viene utilizzato con ottimi risultati sia negli Stati Uniti (Arizona, California, Texas e Florida), sia in Sud Africa, Canada e Cina, oltre che in paesi europei quali Spagna, Portogallo, Austria e, da circa dieci anni, Italia.
L'Asphalt Rubber è ampiamente utilizzato nell'applicazione di strati di conglomerato a caldo per incrementare la vita utile di pavimentazioni in strade locali, statali ed a scorrimento veloce, per la realizzazione di pavimentazioni autostradali e in città.
L'uso dell'Asphalt Rubber non solo costituisce una concreta applicazione per il riciclo degli Pneumatici Fuori Uso, ma risulta di estremo interesse come soluzione tecnica.

Risulta, infatti, particolarmente adatto a ridurre tutti i fenomeni di fessurazione di riflesso, fessurazione a fatica e fessurazione termica, con l'ottenimento di superfici praticamente prive di fenomeni di ormaiamento (*rutting*), con un buona aderenza (*skid resistance*), ridotta necessità di manutenzione, una buona regolarità e ridotti livelli di emissioni sonore.
L'utilizzo di conglomerati Asphalt Rubber ha, inoltre, consentito di registrare significative attenuazioni del rumore da rotolamento del traffico veicolare, con una riduzione fino a 9 dB rispetto ad una pavimentazione rigida e fino a 5 dB rispetto al migliore conglomerato, anche in ambiti urbani.
Di seguito si introduce una panoramica delle principali caratteristiche legate al bitume modificato con il polverino di gomma riciclata da Pneumatici Fuori Uso definito Asphalt Rubber.

La durata dei manti di usura di tipo convenzionale in Italia non supera mediamente i 4 anni prima della necessità di rifacimento: ciò ha finito per rendere la gestione del patrimonio stradale impossibile da sostenere, contribuendo inoltre in modo sostanziale alla stagnazione economica del settore

3.2 - Definizione di Asphalt Rubber secondo la Norma ASTM D6114

L'Asphalt Rubber è un bitume modificato con una percentuale minima di polverino di gomma riciclata da PFU pari al 15% sul peso totale del legante, incorporata tramite processo wet, che abbia reagito durante un periodo di tempo sufficientemente lungo da permettere il rigonfiamento della gomma.

3.3 - Background

L'Asphalt Rubber (a cui ci si riferisce anche come "processo wet" o "processo MacDonald") è stato utilizzato negli Stati Uniti a partire dagli anni '60, sviluppandosi dapprima in Arizona, ed arrivando al giorno d'oggi ad essere correntemente utilizzato da parte di diverse agenzie per la produzione di Hot Modified Rubber Asphalt (HMRA), in applicazioni "spray" o, semplicemente, per la sigillatura di fessure durante la manutenzione dei manti stradali.
Esistono sul mercato altre tecnologie riferite come "rubberized asphalt", come è il caso del processo dry, nel quale la gomma viene aggiunta durante la fase di mescolamento del bitume con gli inerti, e il processo Terminal Blend, che utilizza meno di 10% di polverino di gomma e alcuni additivi. Questi processi portano a caratteristiche diverse dei manti stradali ottenuti.
La tecnologia impiegata in questa variante consiste in un processo controllato e normato nel quale la modifica del bitume avviene prima della produzione del conglomerato. Il bitume Asphalt Rubber viene quindi miscelato agli inerti nelle stesse condizioni di un conglomerato tradizionale, non necessitando di temperature più elevate né per la produzione del conglomerato né in fase di stesa rispetto ad una soluzione tradizionale.

3.4 - Riduzione dello spessore

le elevate performance dei conglomerati Asphalt Rubber, confermate da 40 anni di sperimentazioni e applicazioni pratiche, hanno portato alla redazione di un manuale per la riduzione dello spessore di strati in conglomerati Asphalt Rubber da parte del California Department of Transportation (Caltrans), secondo il quale sono consentite riduzioni sino al 50% dello spessore di un strato in AR rispetto ad un conglomerato convenzionale. A parità di prestazioni, questo manuale è stato validato da prove condotte in Sud Africa e presso la U.C. Berkeley, oltre che da diverse altre applicazioni negli Stati Uniti e in Europa.

3.5 - Proprietà del conglomerato bituminoso

I conglomerati Asphalt Rubber hanno dimostrato una maggiore resistenza a fatica, dovuta all'elevata percentuale di bitume incorporata nei conglomerati Asphalt Rubber, ed una maggiore resistenza all'ormaiamento, attribuita alla viscosità più elevata del legante. Sono generalmente conglomerati caratterizzati da una permeabilità superiore, che consente di ridurre i fenomeni di splash and spray e di acquaplanning in caso di superficie bagnata.

3.6 - Efficienza economica

Dal momento che i conglomerati Asphalt Rubber possono essere stesi in strati di spessore ridotto e presentano una durabilità superiore, così come i trattamenti superficiali, rispetto ai prodotti convenzionali, l'Asphalt Rubber si è rivelato nel complesso economicamente vantaggioso in oltre l'80% dei casi analizzati durante un periodo di osservazione di 30-40 anni.

3.7 - Applicazioni dell'Asphalt Rubber

I conglomerati Asphalt Rubber possono essere applicati in strategie di riabilitazione di pavimentazioni esistenti per ridurne gli ammaloramenti causati da agenti atmosferici, disgregazione e ossidazione. Migliorano le caratteristiche superficiali, con buoni valori di IRI e attrito, e possono anche essere utilizzati come strato superficiale applicato a pavimentazioni rigide o sopra ponti e viadotti, con lo scopo d'evitare la fessurazione di riflessione, migliorare l'aderenza e ridurre i livelli di rumore. Conferiscono buone caratteristiche d'attrito e aumentano la durabilità della pavimentazione.

3.8 - Qualità dell'aria

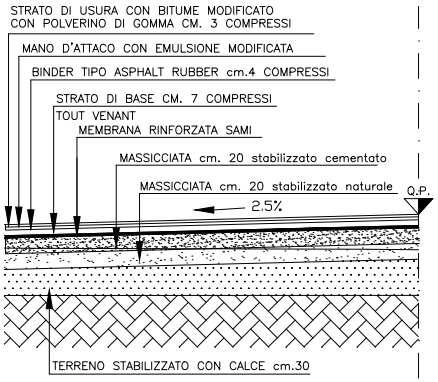
Le pavimentazioni eseguite con bitume modificato con polverino di gomma riutilizzano migliaia di Pneumatici Fuori Uso. L'integrazione di materiali polimerici all'interno delle miscele bituminose calde pone la questione sulla valutazione dei rischi per la salute dei lavoratori derivanti dalla necessità di aumentare le temperature di produzione e posa in opera.

In realtà, durante il processo di produzione del bitume modificato con polverino di gomma riciclata non vengono raggiunte temperature così elevate da permettere alla componente in gomma di incidere sulla qualità dei fumi.
Dal 1992, si eseguono studi di routine per analizzare la qualità dell'aria durante la costruzione dei conglomerati, e in ogni occasione sono stati riscontrati identici valori per conglomerati Asphalt Rubber e convenzionali, anche nel caso del riciclaggio delle stesse pavimentazioni in Asphalt Rubber.

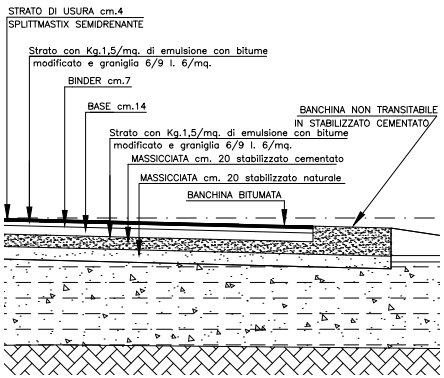
3.9 - Vantaggi della soluzione adottata

I principali vantaggi sono, in sintesi, costituiti da:

- Performance e durabilità superiori rispetto ai conglomerati tradizionali eseguiti con bitume normale e modificato;
- Maggior resistenza all'invecchiamento e all'ossidazione dovuta ad una maggior ricopertura degli inerti;
- Maggior resistenza all'ormaiamento grazie all'incremento della viscosità e del punto di rammollimento;
- Maggiore resistenza a fatica e alla fessurazione nel conglomerato, a causa del maggior contenuto percentuale di legante presente;
- Possibilità di applicare spessori inferiori di conglomerato rispetto ai conglomerati tradizionali, che comportano anche minori tempi di costruzione legati alla minor quantità di materiale;
- Vantaggio economico dovuto alla riduzione degli spessori, ad una maggior durabilità e alla minor manutenzione;
- Diminuzione del rumore;
- Maggior sicurezza legata alla riduzione dei fenomeni di splash and spray e acquaplanning e al miglioramento della visibilità notturna, dovuta alla colorazione scura persistente nel tempo che crea contrasto fra pavimentazione e segnaletica orizzontale;
- Miglioramenti di aderenza, tessitura e regolarità superficiale (IRI);
- Riciclo di ingenti quantità di Pneumatici Fuori Uso preservando nel contempo le risorse naturali;
- Minor consumo di aggregati dovuto alla diminuzione dello spessore.



ASPHALT RUBBER



TRADIZIONALE

3.10 - Dimensionamento e verifica dei pacchetti stradali proposti

Al fine di poter verificare la superiore performance della soluzione adottata per la Variante Canali di Reggio Emilia rispetto ad un conglomerato tradizionale si è proceduto ad un opportuno dimensionamento strutturale comparativo dei due pacchetti stradali descritti nell'immagine sopra.In particolare, il pacchetto stradale adottato per la Variante di Canali è descritta di seguito:

- 3 cm Asphalt Rubber Gap Graded per strato di usura;
- 4 cm Asphalt Rubber Gap Graded per strato di binder;
- 7 cm di base;
- SAMI in Asphalt Rubber;
- 20 cm massicciata stabilizzato cementato;
- 20 cm massicciata stabilizzato naturale;

Per la verifica e dimensionamento del pacchetto stradale è stata usata la metodologia di tipo verifica "strutturale" che consiste nel calcolare lo stato di tensione e deformazione (estensione) originato dai carichi applicati dovuti al passaggio del traffico, verificando i criteri di criticità della pavimentazione (rappresentati in immagine 31):

- Contributo dello strato in Asphalt Rubber alla diminuzione dell'estensione verticale di compressione nella parte superiore dello strato di fondazione della pavimentazione.
- Contributo dello strato in Asphalt Rubber alla diminuzione della tensione di trazione alla base degli strati in conglomerato bituminoso.

L'analisi strutturale è stata eseguita tramite il software BISAR.

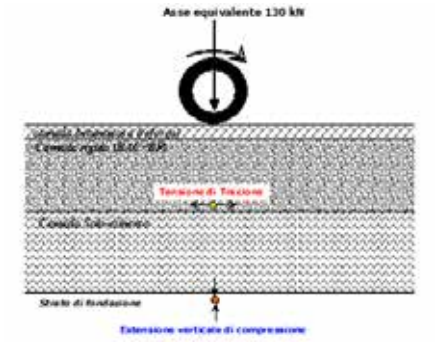


Immagine 31 - *Tensioni e estensioni di trazione e compressione utilizzate come criteri di verifica della pavimentazione*

Lo studio del traffico a cui è sottoposta la pavimentazione è essenziale per la determinazione della vita utile del pacchetto stradale. La conversione del traffico reale in un asse standard, corrispondente al passaggio di un unico carico rappresentativo, facilita il dimensionamento del pacchetto. A tal fine, è stato determinato il Numero Equivalente d'assi (NEEP), espresso in termini d'assi equivalenti da 130 kN (13 ton). Nel momento in cui si applica uno stato di tensione ad un materiale bituminoso, l'estensione risultante dipende dalla temperatura nello strato di pavimentazione e dal tempo d'applicazione del carico. Si calcola, quindi, il modulo di rigidezza (S_b) di *Van der Poel* come la relazione fra tensione ed estensione per un bitume a una determinata temperatura e per un definito tempo d'applicazione del carico. Si considerano le caratteristiche del bitume riferite al suo stato finale, dopo l'indurimento conseguente alla stesa. Si considera che all'apertura del traffico la penetrazione del bitume (Pr) è circa il 65% del suo valore iniziale (Pi):

$$P_r = 0{,}65 \times Pi = 0{,}65 \times (35a50)$$

L'indice di penetrazione del bitume (PIr) é dato da:

$$PI_r = \frac{1955{,}55 - 500 \times \log(P_r) - 20 \times SPr}{50 \times \log(P_r) - SP_r - 120{,}15}$$

Per il calcolo della temperatura di rammollimento si considera:

$$SP_r = 98{,}4 - 26{,}4 \times \log(P_r)$$

Il tempo d'applicazione, in secondi, del carico per strati di spessore compreso fra 10 e 350 mm è dato dalla relazione empirica:

$$t = 1/v \text{ Km/h}$$

Quindi, il modulo di rigidezza del bitume è calcolato utilizzando l'equazione di Ullidtz

$$S_b = 1{,}157 \times 10^{-7} \times t^{-0{,}368} \times 2{,}718^{-P1} \times (SP_r - T)^5$$

Il modulo di deformabilità del conglomerato è ottenuto, al fine del dimensionamento, dall'espressione (di *Heukelom e Klomp*):

$$S_m = S_b \times \left(1 + \frac{2{,}5 \times C_v}{n \times (1 - C_v)}\right)^{0{,}83 \times \log\left(\frac{4 \times 10^4}{S_b}\right)}$$

In cui:

$$C_v = \frac{V_a}{V_a + V_b}$$

Applicando il fattore di correzione di *Fijn Van Draat* e *Sommer*:

$$\frac{1}{1 + \left(\frac{V_v - 3}{100} \right)}$$

Le leggi considerate nel dimensionamento sono:

- Fatica nella fondazione:

$$R = \frac{\sigma_t}{\sigma_r} = 1 + a \times \log(N_{adm})$$

Nella quale:

σ_t - Valore massimo di tensione di trazione dell'asse equivalente (130 kN);

σ_r - resistenza alla trazione di flessione (per l'applicazione di un carico singolo);

a - constante, per ciascun materiale bituminoso, che prende i valori da –0.06 a –0.1;

N - Numero ammesso di passaggi dell'asse da 130 kN.

Per la deformazione permanete della fondazione con 5% di probabilità di ormaie, si ha:

$$\varepsilon_v = 1{,}8 \times 10^{-2} \times N^{-0{,}25}$$

In cui:

ε_v - Estensione massima ammessa nel suolo, verticale;

N – Numero di ripetizioni dell'applicazione del carico.

Per la ricerca delle soluzioni ottimali al momento del dimensionamento sono state considerate soluzioni gap-graded. Nelle tabelle seguenti vengono riepilogati i risultati dei dimensionamenti effettuati, rapportando la soluzioni applicata in Asphalt Rubber con una tipica soluzione tradizionale applicabile all'infrastruttura (evidenziata in giallo), attraverso un coefficiente di durata che quantifica l'incremento della vita utile attesa per la pavimentazione AR in termini di rapporto con la vita utile attesa per la soluzione convenzionale.

Considerando il comportamento teorico del pachetto stradale, la **soluzione in AR consente di incrementare del 30% le prestazioni del pacchetto tradizionale in termini di vita utile attesa** (Tabella 2), oltre che in termini di analisi costi-benefici e di abbattimento del rumore.

SOLUZIONE PACCHETTO STRADALE	Spessore Totale (m)	Modulo Deformabilità (MPa)	Fatigue			Defor Permanente		Criterio condizionante	Na (Shell)	AR rispetto Trad
		(BELLS3)	e_t *10e^{-6}	Vb (%)	N_f Shell	e_v *10e^{-6}	N_v Shell			
BG: 4 cm usura SMA + 7 cm binder + 14 cm base + 20 cm misto cementato + 20 cm stabilizzato + sottofondo 90 MPa	0.680	3452	104.6	9.0	2.83E+07	149.3	2.11E+08	Fatigue	2.83E+07	-
Riduzione spessore: 3 cm usura AR Gap graded + 4 cm binder AR Gap graded + 7 cm di base + SAMI in AR + 20 cm misto cementato + 20 cm stabilizzato + sottofondo 90 MPa	0.595	4500	134.8	14.0	3.60E+07	224.6	4.13E+07	Fatigue	3.60E+07	1.3

Tabella 2 - *Risultati del dimensionamento comparativo del pacchetto stradale in Asphalt Rubber e del pacchetto tradizionale*

3.11 - I vantaggi ambientali della pavimentazione in Asphalt Rubber

La soluzione adottata per la pavimentazione della Variante Canali di Reggio Emilia si distingue, come illustrato nei capitoli precedenti, per la particolare attenzione ambientale evidenziata dalla ricerca di materiali e soluzioni che consentano un significativo abbattimento delle risorse impiegate e ottimizzando il processo produttivo complessivo in termini di efficienza energetica e tempi di realizzazione.

Il lungo periodo di impiego della tecnologia *Asphalt Rubber* fa sì che, attualmente, siano disponibili innumerevoli studi ed esperienze che permettano di quantificarne i vantaggi ambientali rispetto alle alternative disponibili sul mercato. A tali studi bibliografici si aggiungono le analisi specifiche effettuate proprio sull'infrastruttura oggetto del presente studio.

La percentuale di polverino di gomma compresa tra il 15 e il 20% incorporata nel legante bituminoso

fa sì che l'Asphalt Rubber (metodo wet) rientri nella circolare 19 Luglio 2005: "Indicazioni relative ai materiali riciclati e beni e manufatti ottenuti con materiale riciclato, proveniente da articoli in gomma" - ai sensi del D.M. 203/2003 – G.U. n. 173 del 27 luglio 2005.
L'uso dell'Asphalt Rubber, quindi, non solo risulta di estremo interesse come soluzione tecnica, ma costituisce una efficiente applicazione per il riciclo dei Pneumatici Fuori Uso.
Il settore stradale costituisce, infatti, uno dei principali settori di impiego a livello internazionale dei Pneumatici Fuori Uso, così come risulta anche dalle esperienze statunitensi e di paesi europei quali Austria, Portogallo, Spagna e Italia.
L'utilizzo del polverino per realizzare Asphalt Rubber costituisce, quindi, una consolidata soluzione per il riciclo dei Pneumatici Fuori Uso.
I vantaggi ambientali di tale tecnologia sono legati a molteplici aspetti durante l'intero ciclo di vita delle pavimentazioni in AR. Da un lato, gli spessori ridotti del 44% e la durata utile della pavimentazione maggiore del 30% rispetto a un materiale tradizionale, consentono un notevole risparmio di materie prime, di energia per la produzione, trasporto e relativa posa in opere, con conseguente riduzione di emissioni inquinanti. Dall'altro lato si ha il riciclo dei Pneumatici Fuori Uso, la maggiore regolarità superficiale che riduce i consumi dei veicoli e le relative emissioni, la netta riduzione del rumore da rotolamento che può evitare l'attuale impatto ambientale dei pannelli fonoassorbenti. Inoltre, si tratta di un conglomerato riciclabile e la cui posa non produce più fumi rispetto ai tradizionali.

Di seguito si descrive il complesso dei benefici ambientali (documentati) ottenibili tramite l'impiego di conglomerato bituminoso Asphalt Rubber.

3.11.1 - Ridotte emissioni di CO_2 e ridotti quantitativi di inerti

Il conglomerato bituminoso comporta energie per riscaldare gli inerti e miscelare il bitume, trasportarlo, posarlo. Un conglomerato che richieda spessori ridotti del 50%, a parità di strada trattata abbatte parallelamente il 50% di questi consumi, oltre a quello degli inerti impiegati, che oltre ad essere un costo ambientale diretto comportano anch'essi consumi energetici per estrazione, trattamenti e trasporto. In California, per 11.000 miglia di strade da gestire e riabilitare, l'uso di AR ha consentito una riduzione delle emissioni di CO_2 pari ad un milione e mezzo di tonnellate/anno con un risparmio di oltre 48 milioni di dollari, un 24% del budget annuo di spesa dell'ente. AR può quindi costituire la risposta al riscaldamento globale e ai costi del petrolio.

3.11.2 - Le strade realizzate in AR sono completamente riciclabili

Le strade realizzate in AR sono completamente riciclabili, e questa tecnologia non produce fumi diversi da quelli di qualsiasi altro asfalto, perché sia nella produzione che nella posa si raggiungono solo temperature di fusione della gomma contenuta, e non di combustione. Le particelle di gomma prodotte, inoltre non sono sufficientemente piccole da rendersi volatili. Studi di routine effettuati fin dal 92 per analizzare la qualità dell'aria durante la realizzazione di strade con AR, hanno riscontrato valori identici a quelli convenzionali,anche nel caso di riciclaggio a caldo e freddo di manti AR.

3.11.3 - Il riciclo dei pneumatici fuori uso

L' Asphalt Rubber rientra tra i materiali indicati dalla Circolare 19 luglio 2005, ai sensi del D.M.203/2003 (G.U.n.173,del 27 luglio2005) perché, essendo realizzato con una percentuale minima del 15% di polverino di gomma riciclata da Pneumatici Fuori Uso, contribuisce al corretto recupero di questo prezioso materiale: sono infatti necessari circa 10.000 pneumatici da autovettura per ogni km di corsia (applicando 3+3 cm di spessore).

3.11.4 - Riduzione di consumi e problemi meccanici per i veicoli in transito

Numerosi studi realizzati negli USA ed Europa hanno dimostrato che le strade con maggiore regolarità superficiale (IRI) e con minor fessurazione, disgregazione, rugosità e cracking a fatica aiutano a ottimizzare il consumo e l'efficienza di combustibile dei veicoli. L'Università dell'Arizona ha, inoltre, eseguito un'analisi economica su quelli che potevano essere i vantaggi anche nei costi di gestione del veicolo da parte dell'utente per la durata di una strada e la pavimentazione in AR è risultata consentire un risparmio significativo per la riduzione di usura e problemi meccanici del veicolo. Lo stesso studio ha determinato un risparmio medio del 4.5% di carburante.

3.11.5 - Abbattimento del rumore e i suoi effetti collaterali, economici e ambientali

I conglomerati realizzati con il bitume modificato AR rappresentano una soluzione alternativa o complementare ai tradizionali sistemi antirumore (barriere) e ai relativi impatti ambientali, soprattutto visivi, applicabile anche in città.
Una elevata elasticità e regolarità superficiale consente forti riduzioni del rumore da rotolamento, che può risultare fino a circa 4 decibel inferiore rispetto a quello ottenuto dai migliori fonoassorbenti, quindi con una riduzione della pressione sonora di oltre il 50%, e del volume di oltre il 20%. Un risultato immediatamente e spontaneamente percepito dai cittadini interessati dalle prime pose realizzate in Italia, sottoposte a rigorose misurazioni fonometriche a cura del CIRS e dell'ARPAT, oltre che concretamente misurato anche all'estero. Uno strato di usura in AR consente di ottenere una riduzione delle emissioni sonore variabile in funzione della velocità di transito: -3 dB per velocità<50 km/h, 4 dB per velocità comprese tra 5 e 90 km/h, 6 dB oltre i 90 km/h. Dato che una barriera fonoassorbente è mediamente in grado di ottenere una riduzione di 1 dB per ogni 60 cm circa di altezza, è possibile ridurre o addirittura eliminarle, con un sostanziale miglioramento dell'impatto visivo a parità di emissioni sonore. Tali considerazioni, già sperimentate e comprovate in USA ed Europa, sono già stati oggetto di verifiche anche in Italia: il CIRS ha rilevato, a distanza di un mese dalla posa in opera di un manto stradale in AR, una riduzione di 4.5 dB per una velocità di percorrenza media di 40 km/h. Tale risultato è stato confermato dalle analisi svolte dall'ARPA della Regione Toscana,che ha determinato per lo strato di usura AR (3 cm) un coefficiente di assorbimento sonoro pari a 0.75.

3.12 - Bilancio energetico del cantiere

Di seguito si procede ad illustrare in maniera analitica il bilancio energetico del cantiere, con riferimento a tutte le fasi del processo produttivo e costruttivo della paviemntazioen stradale. L'intero iter costruttivo può, infatti, essere suddiviso nelle seguenti fasi:

- Produzione conglomerato;
- Trasporto conglomerato;
- Stabilizzazione terre da rilevato;
- Realizzazione nuova pavimentazione.

Per ciascuna delle fasi elencate si procede, nei paragrafi seguenti, a dettagliare i consumi ed i bilanci energetici di mezzi e materiali impiegati. Le due tabelle seguenti mostrano il calcolo delle quantità di materiali necessario per il successivo bilancio energetico.

Volume complessivo conglomerato AR	Superficie	Spessore	Totale
	[mq]	[m]	[m³]
Variante di Canali	34.800	0,14	4.872,00

Stabilizzazione di terre da rilevato	Lungh.	Largh.	Spessore	Superficie	Volume
	[m]	[m]	[m]	[m²]	[m³]
Asse principale	2.709,23	13,00	0,30	35.219,99	10.566,00
Rotatoria	263	13,00	0,30	3.419,00	1.025,70
Strade secondarie	1058	6,50	0,30	6.877,00	2.063,10
Variante Via Tassoni	400	10,00	0,30	4.000,00	1.200,00
Totale				**49.515,99**	**14.854,80**

Di seguito si esamina singolarmente ciascun aspetto del processo realizzativo della pavimentazione dell'opera in esame, ad esclusione della realizzazione della massicciata di sottofondo

per l'assenza di dati disponibili sulla fonte di approvvigionamento e, soprattutto, per l'ininfluenza nel confronto tra soluzione adottata innovativa per la Variante di Canali ed una soluzione tradizionale.

3.12.1 - Produzione conglomerato

L'impianto di produzione del conglomerato ha una capacità di produzione pari a 220.000 kg di conglomerato l'ora ed è alimentato da un bruciatore a doppio stadio avente una potenza termica massima pari a 581 kW.
È, quindi, possibile quantificare il consumo energetico e le rispettive emissioni associati alla produzione dei quantitativi sopra illustrati:

Produzione totale conglomerato [kg]	Capacità impianto [kg/h]	Potenza termica massima [kW]	Tempo di produzione [h]	Consumo energetico [kWh]	Equival. in CO_2 kg CO_2]
11.449.200	220.000	581	52	30.236	17.537

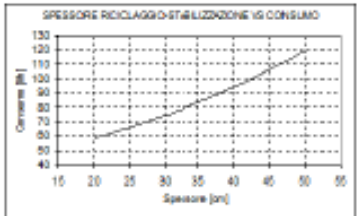
3.12.2 - Trasporto conglomerato

Il trasporto è avvenuto dall'impianto di produzione sito a Barcaccia di San Polo d'Enza (RE), per una distanza complessiva di 44 km per il viaggio di andata e ritorno di ciascun mezzo. Considerando il consumo medio di ciascun mezzo (considerando il viaggio di andata a pieno carico e il ritorno vuoto) e il rapporto di emissione di CO_2 del carburante (gasolio), è possibile calcolare sia il consumo energetico che le relative emissioni di anidride carbonica associati al trasporto del materiale a piè d'opera:

Volume totale conglomeratow	n. Viaggi	Distanza A/R [km]	Distanza tot. [km]	consumo mezzi trasporto [km/l]	Consumo totale [l]	Consumo energetico [kWh]	Equival. in CO_2 [kg CO_2]
4.872	271	44	11.909	2.5	4.764	21.741	12.610

3.13 - Stabilizzazione terre da rilevato

Considerando uno dei più diffusi modelli di stabilizzatrice, la Wirtgen WR2500S, sono stati raccolti i dati necessari a ricostruire la curva dei consumi in funzione delle condizioni operative (vedi figura seguente).



A seconda degli spessori da stabilizzare nelle diverse fasi, si ottengono consumi complessivi variabili da cui dipende il consumo energetico totale e le relative emissioni equivalenti di CO_2 come riportate di seguito.

Immagine 32 - *Curva di consumo della stabilizzatrice WR2500S*

Fase lavorativa con stabilizzatrice WR2500S (Potenza 500 kW)	Sup. [m²]	Consumo specifico [l/h]	Capacità lavoro [m²/h]	Tempo lavoro [h]	Consumo complessivo [l]	Consumo energetico [kWh]	Equivalente in CO_2 [kg CO_2]
Stabilizzazione terre da rilevato	49.516	59	500	99.032	5.816	26.544	15.396
Fase lavorativa con Rullo Marini 100VS2	**Sup. [m²]**	**Potenza [kW]**	**Capacità lavoro [m²/h]**	**Tempo lavoro [h]**	**Consumo complessivo [l]**	**Consumo energetico [kWh]**	**Equivalente in CO_2 [kg CO_2]**
	49.516	85	4.000	12.379	231	1.052	610
Consumo totale per stabilizzazione e riciclaggio						**27'597 kWh**	
Emissioni totali per stabilizzazione e riciclaggio						**16'006 kWh**	

3.14 - Realizzazione nuova pavimentazione

Una volta terminate le fasi di preparazione del piano e di fornitura del conglomerato, si procede alle operazioni di stesa della nuova pavimentazione. In questa fase, il bilancio energetico ha tenuto conto della potenza massima dei singoli mezzi impiegati, considerando un utilizzo medio in condizioni di lavoro corrispondenti al 70% della potenza massima. Sono, quindi, stati ricavati i consumi energetici e le rispettive emissioni:

Mezzo impiegato	Superficie [m²]	Potenza	Capacità lavoro [m²/h]	Tempo lavoro [h]	Consumo complessivo [l]	Consumo energetico [kWh]	Emiss. CO_2 [Kg CO_2]
Autospazzatrice Bucher	34.800	175	8000	4,35	117	533	309
Minipala Bobcat	34.800	30	16000	2,175	10	46	26
Vibrofinitrice Marini 665WD	34.800	118	1000	34,8	630	2.874	1.667
Botte emulsione + autocarro	34.800	136	12000	2,9	60	276	160
Rullo Marini 100VS2	34.800	85	4000	8,7	113	518	300
Totale						**4.247**	**2.463**

Per tutta la fase costruttiva, quindi, si ottiene un **consumo energetico totale pari a 83'821 kW** e un corrispondente valore di **emissioni di CO_2 pari a 48'616 kg CO_2**.
Nei grafici seguenti sono riportati i valori del consumo energetico e delle emissioni di CO_2 per le diverse fasi previste per la realizzazione dell'opera: produzione del conglomerato, trasporto del materiale in cantiere, stabilizzazione delle terre in rilevato, formazione della nuova pavimentazione.

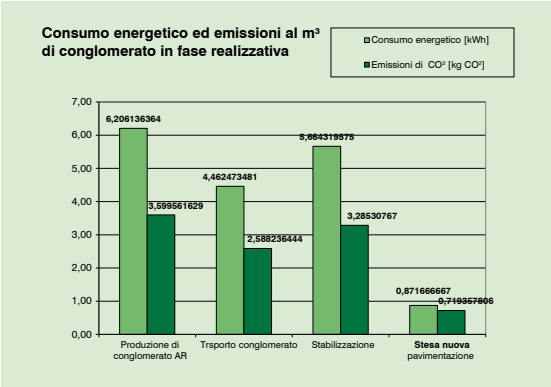


Immagine 33 - *Consumi energetici per m³ di conglomerato Asphalt Rubber prodotto e posato*

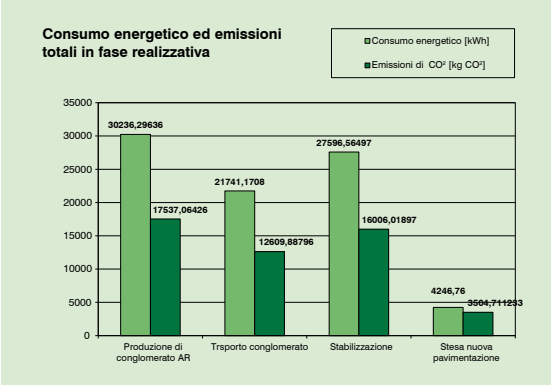


Immagine 34 - *Consumi energetici complessivi per la realizzazione della pavimentazione della Variante di Canali*

3.15 - Risparmio energetico ottenuto grazie alla soluzione adottata

La soluzione adottata per la Variante Canali di Reggio Emilia, permette un **vantaggio energetico immediato**, legato alla riduzione di materie prime e relative lavorazioni necessarie nella fase di realizzazione dell'opera, oltre ad un **vantaggio che deriva dalla maggior durata delle pavimentazioni** così realizzate. Questo secondo tipo di vantaggio, quantificato in termini ambientali ed economici in numerosi studi e monitoraggi disponibili in bibliografia, viene rafforzato dalle specifiche analisi effettuate proprio sulla pavimentazione in esame a distanza di circa sei anni dalla sua realizzazione.
Il risparmio energetico associato all'incremento di vita utile dell'opera si vanno, quindi, a sommare al risparmio energetico in fase costruttiva, di per sé comunque sufficientemente consistente da convincere della validità ambientale della soluzione adottata.

3.15.1 - Risparmio energetico in fase realizzativa

La riduzione dei quantitativi di materiale da impiegare o smaltire, e quindi la **minor produzione di conglomerato necessaria per la soluzione in Asphalt Rubber rispetto ad una soluzione tradizionale**, incide sia in termini di produzione che di trasporto. Per quanto riguarda la posa in opera, il risparmio energetico dovuto all'applicazione di strati minori di conglomerato risulta trascurabile rispetto alle prime due voci. Tale aspetto è stato, invece, quantificato nel bilancio complessivo del cantiere.
Analogamente a quanto illustrato nel capitolo precedente, si considera un'impianto di produzione del conglomerato avente capacità di produzione pari a 220.000 kg di conglomerato all'ora ed alimentato da un bruciatore a doppio stadio con una potenza termica massima pari a 581 kW.

È, quindi, possibile quantificare il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni di Co_2 equivalenti associati alla minor produzione di conglomerato, come illustrato nella tabella seguente:

Riduzione complessiva conglomerato [kg]	Capacità impianto [kg/h]	Potenza termica massima [kW]	Tempo di produzione [h]	Risparmio energetico [kWh]	Minori emissioni CO_2 [kg CO_2]
8.995.800	220.000	581	41	23.757	13.779

Nuovamente, il quantitativo di materiale prodotto e la distanza da percorrere permettono di definire il risparmio energetico associato al trasporto del materiale a piè d'opera; il trasporto avviene per una distanza complessiva di 44 km per il viaggio di andata e ritorno di ciascun mezzo. Considerando il consumo medio di ciascun mezzo (considerando il viaggio di andata a pieno carico e il ritorno vuoto) e il rapporto di emissione di CO_2 del carburante (gasolio), è possibile calcolare sia il risparmio energetico che le relative minori emissioni di anidride carbonica:

Riduzione complessiva conglomerato [m³]	n. viaggi	Distanza A/R [km]	Distanza tot. [km]	Consumo mezzi trasporto [km/l]	Riduzione consumo totale [l]	Risparmio energetico [kWh]	Minori emissioni CO_2 [kg CO_2]
3.828	213	44	9.357	2.5	3.743	17.082	9.908

Complessivamente, quindi, le soluzioni adottate per la pavimentazione stradale della variante Canali di Reggio Emilia consentono, rispetto ad una pavimentazione tradizionale, un risparmio energetico in fase realizzativa quantificato in 40'839 kW e una riduzione delle emissioni pari a 23'687 kg CO_2.

Nei grafici seguenti sono riportati i valori del risparmio energetico e delle riduzioni di emissioni di CO_2 per le fasi di produzione e di trasporto in cantiere del conglomerato.

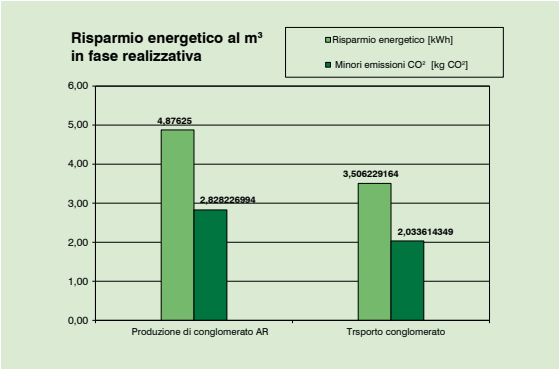


Immagine 35 - *Risparmio energetico in fase realizzativa per unità di conglomerato Asphalt Rubber prodotto e posato*

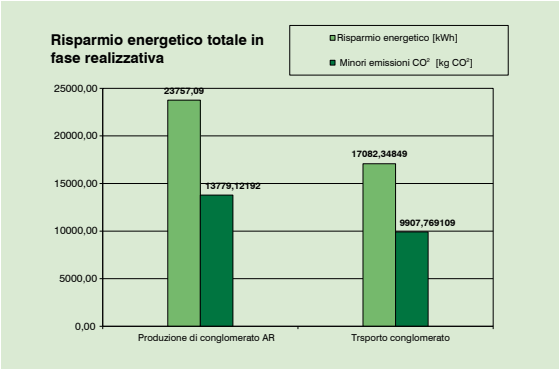


Immagine 36 - *Risparmio energetico complessivo in fase realizzativa e relativa riduzione di emissioni di CO_2*

Con riferimento alla sola **sovrastruttura stradale**, oggetto di analisi comparativa, il **risparmio energetico complessivamente ottenuto in fase realizzativa grazie alla pavimentazione in Asphalt Rubber è pari al 44%** rispetto ad una soluzione con conglomerato bituminoso tradizionale.

3.16 - Risparmio energetico durante la vita utile dell'opera

Analizzando la fase di esercizio della pavimentazione stradale è possibile quantificare il risparmio energetico derivante dall'incremento della vita utile della pavimentazione stessa.
In fase di dimensionamento la **durabilità della sovrastruttura stradale** è risultata **incrementata del 30%** grazie all'applicazione di conglomerati Asphalt Rubber rispetto all'impiego di conglomerati tradizionali.
Tale dato è stato in parte confermato dai risultati delle indagini strutturali eseguite a distanza di circa sei anni dalla realizzazione dell'opera, attraverso il prelievo di 14 carote (7 per ogni direzione di marcia) e un'analisi deflettometrica di superficie mediante *Falling Weight Deflectometer*.

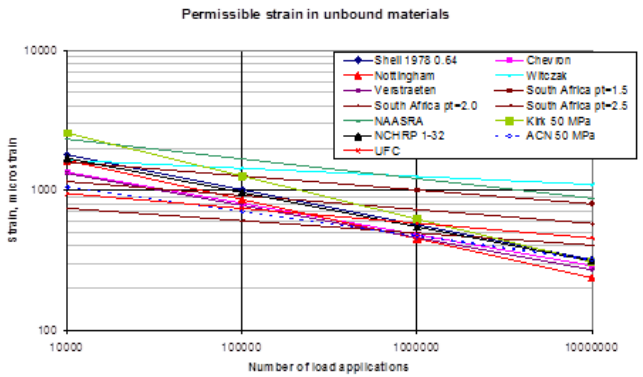


Immagine 37 - *Risposta meccanica della pavimentazione stradale a sei anni dalla realizzazione, espresso in numero di cicli di carico residui (PAVENCO, 2015)*

In particolare, l'analisi dei campioni prelevati ha permesso di quantificare la vita utile residua della pavimentazione, in termini di cicli di carico residuo (Immagine 38).
Considerando una vita utile dell'infrastruttura viaria pari a circa 30 anni, e con riferimento all'incremento della vita utile della sovrastruttura stradale, intesa come tempo intercorrente tra successivi ripristini, da 8 a 10,4 anni, è possibile quantificare il **risparmio energetico derivante dalla riduzione degli interventi di ripristino**.
Andando ad effettuare il bilancio energetico di un singolo ripristino, anch'esso con conglomerati Asphalt Rubber e seguendo i criteri illustrati nel capitolo 4, si considerano la fresatura e rifacimento degli strati di binder e usura per uno spessore di 3 cm.
Tale risparmio è quantificabile eseguendo il bilancio energetico della singola attività di ripristino, consistete nella fresatura di 3 cm della pavimentazione da riabilitare e di produzione e stesa del nuovo conglomerato Asphalt Rubber per un uguale spessore.

In aggiunta alle lavorazioni illustrate nei paragrafi precedenti, per eseguire il bilancio energetico della fresatura è necessario ricostruire i consumi energetici corrispondenti allo spessore di pavimentazione da rimuovere.
Ipotizzato il tipo di fresa individuata tra i modelli maggiormente diffusi (Wirtgen W2000), analizzando la relativa curva di consumo è possibile definirne la variazione dei consumi in funzione del carico di lavoro, ossia dello spessore di materiale da fresare (vedi figura seguente).
Per quanto riguarda lo smaltimento/riciclaggio del materiale di risulta, si ipotizza per linearità con le ipotesi precedenti il trasporto a discarica o sito di riciclaggio conservativamente ipotizzato ad una distanza di 10 km.

Immagine 38 - *Curva di consumo della fresatrice W2000*

Considerando le singole fasi produttive, in analogia con quanto illustrato nel capitolo 4, si quantificano di seguito i consumi energetici per l'attività di ripristino:

3.16.1 - Produzione conglomerato

Produzione totale conglomerato [kg]	Capacità impianto [kg/h]	Potenza termica massima [kW]	Tempo di produzione [h]	Consumo energetico [kWh]	Emmis. CO_2 [kg CO_2]
2.453.400	220.000	581	11	6.479	3.758

3.16.2 - Trasporto conglomerato

Volume totale conglomerato	n. Viaggi	Distanza A/R [km]	Distanza tot. [km]	Consumo mezzi trasporto [2.5km/l]	Consumo totale [l]
1.044	58	44	2.552	2.5	1.021

3.16.3 - Fresatura

Fase lavorativa con fresatrice W2000 (potenza 421 kW)	Superficie [m²]	Consumo specifico [l/h]	Capacità lavoro [m²/h]	Tempo lavoro [h]	Consumo complessivo [l]	Consumo energetico [kWh]	Emmis. CO_2 [kg CO_2]
Fresatura sp 3 cm	34.800	35	500	69,6	2.436	11.118	6.448

3.16.4 - Smaltimento materiali di risulta

Volume totale fresato	n. Viaggi	Distanza A/R	Distanza tot. [km]	Consumo mezzi trasporto [2.5km/l]	Consumo complessivo [l]	Consumo energetico [kWh]	Equivalente in CO_2 [kg CO_2]
1.044	58	20	1160	2.5	464	2.118	1.228

3.16.5 - Posa in opera pavimentazione nuova

Mezzo impiegato	Superficie [m²]	Potenza	Capacità lavoro [m²/h]	Tempo lavoro [h]	Consumo complessivo [l]	Consumo energetico [kWh]
Autospazzatrice Bucher	34.800	175	8.000	4.35	117	533
Minipala Bobcat	34.800	30	16.000	2.175	10	46
Vibrofinitrice Marini 665WD	34.800	118	1.000	34.8	630	2.874
Botte emulsione + autocarro	34.800	136	12.000	2.9	60	276
Rullo Marini 100VS2	34.800	85	4.000	8.7	113	518
Totale						**4.247**

Si ottiene, quindi, un consumo energetico per singola attività di rispristino, pari al risparmio energetico durante la vita utile dell'opera, pari a 28.620 KWh, a cui corrispondono minori emissioni per 16'600 kg CO_2, come illustrato nel grafico seguente.

Il risparmio energetico complessivamente ottenuto è quindi pari al 49% del consumo complessivo di realizzazione e riabilitazione: equivale al consumo energetico di 300 famiglie di Reggio Emilia in un mese

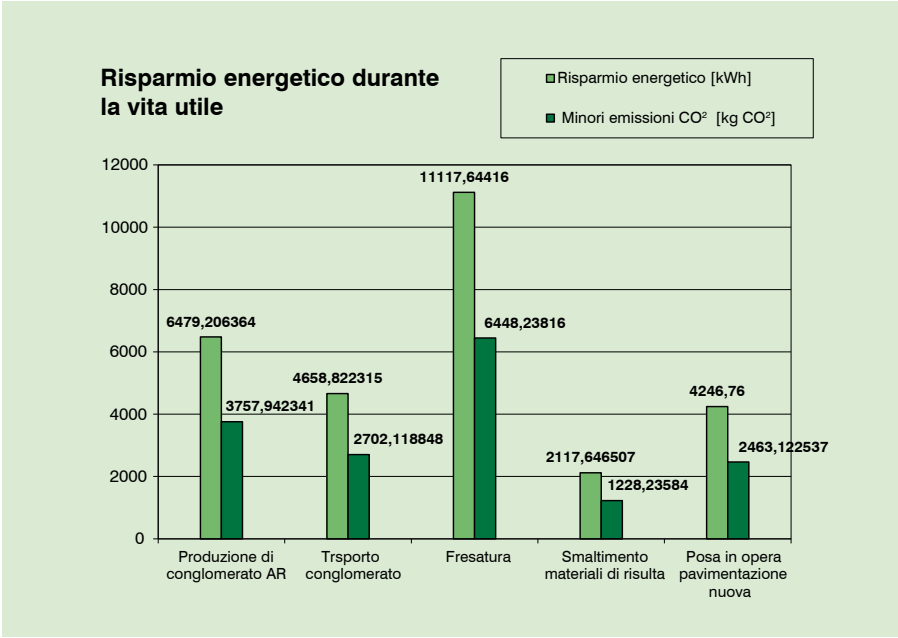


Immagine 39 - *Risparmio energetico complessivo in fase di riabilitazione e relativa riduzione di emissioni di CO_2*

3.17 - Conclusioni

La soluzione in asphalt rubber adottata per la pavimentazione della Variante Canali di Reggio Emilia è risultata, rispetto ad un tradizionale pacchetto stradale, migliore dal punto di vista sia ambientale che funzionale: al **vantaggio ambientale derivante dal riciclo di Pneumatici Fuori Uso e dai minori quantitativi di materie prime impiegate e movimentate**, si aggiungono infatti gli **ulteriori vantaggi economici ed ambientali legati alla maggiore vita utile ipotizzata e verificata per la sovrastruttura stradale**.
La pavimentazione realizzata consente, inoltre, un netto abbattimento del rumore, grazie allo strato di usura in Asphalt Rubber gap graded. Per tale ragione non risultano necessarie, neppure in ipotesi di futura espansione urbanistica, barriere antirumore lungo l'opera in esame, eventualmente abbinando la pavimentazione fonoassorbente ad interventi a ridotto impatto ambientale quali opere a verde (piantumazioni, siepi, ecc.), con un sostanziale miglioramento dell'impatto visivo dell'opera nel suo complesso a parità di emissioni sonore.
Tale scelta inoltre, per via delle migliori caratteristiche di aderenza e miglior tenuta nei tratti in curva, è particolarmente indicata in corrispondenza delle rotatorie e delle intersezioni caratterizzanti l'infrastruttura viaria in esame.
Dall'analisi quantitativa delle carateristiche di sostenibilità ambientale delle soluzioni proposte, è risultato che queste hanno consentito un **risparmio energetico immediato all'atto della realizzazione** quantificato in **40'839 kW** e una **riduzione delle emissioni di CO_2** pari a **23'687 kg CO_2**.
Inoltre, la maggior durabilità della pavimentazione adottata rispetto ad una pavimentazone tradizionale, permette un **ulteriore risparmio energetico durante la vita utile della stessa pari a 28.620 KWh, a cui corrispondono minori emissioni per 16.600 kg CO_2**.
Il **risparmio energetico complessivamente ottenuto** è quindi pari al 49% del consumo complessivo di realizzazione e riabilitazione e **corrisponde a compensare le emissioni dovute al transito di oltre 170.000 veicoli** lungo l'intero asse della Variante o, in alternativa, a **compensare il consumo energetico di 300 famiglie reggiane durante un intero mese**.

Bibliografia

I. Antunes, A. Murachelli. "Analysis of environmental sustainability in the rehabilitation of existing pavements using Asphalt Rubber hot mixes". Atti del convegno AR2009, Nanjing (Cina), 2-4 Nov. 2009.

R. Hicks, J. Epps, “Life cycle costs for asphalt rubber paving materials”. Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Portogallo.

“Asphalt Rubber Long-Term Performance – Official Publication of RPA”, Giugno 2005.

I. Antunes, F. Giuliani, J. Sousa, G. Way – “Asphalt Rubber: Quarant’anni ma non li dimostra”, Le Strade N°9, Settembre 2005.

J. Van Kirk, G. Holleran, “Reduced thickness asphalt rubber concrete leads to cost effective pavement rehabilitation”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portogallo.

“Asphalt Rubber Long Term Performance”, Rubber Pavement Association, 2004

H. Bahia, R. Davis, “Effect of Crumb Rubber Modifiers on Performance related properties of asphalt binders”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.63, 1994.

G. Way, J. Sousa, K. Kaloush, “Hot mix asphalt design prediction and field performance, an Arizona Study”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.

K. Surace, “Sound and noise: generation, propagation and reduction”, RPA Quiet solution, 2003.

"Asphalt Rubber Noise Data Compilation (Synthesis of current practice)", Executive Summary RPA, 2003.

"Report on the Traffic Noise Reduction in Sacramento County", Sacramento County Public Works Agency – Transportation Division, 1999.

D. Carlson, H. Z.hu, C. Xiao, "Analisys of Traffic Noise Before and After Paving with Asphalt Rubber", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.

B. Rymer, Paul Donavan, "Tire/Pavement Noise Intesity Testing in Europe: the NITE Sudy and its Relationship to Ongoing Caltrans Quiet Pavement Activities", 2004.

"Asphalt Rubber Noise Reduction", Rubber Pavement Association, 2004.

K. Kaloush, M. Witczak, G. Way, "Performance evaluation of Arizona asphalt rubber mixtures using advanced dynamic material characterization tests", Final Report 2002.

R. Hicks, J. Epps, "Life cycle costs for asphalt rubber paving materials", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, Portogallo.

M. Curry, A. Murta, L. Figueredo, L. Montegro, "Socioeconomic and environmental analysis for the use of rubberized asphalt in the construction of highways", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.

D. Carlson, "Rehabilitation of Portland cement concrete pavements with thin asphalt-rubber open graded friction course overlay in Arizona", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Portogallo.

J. Van Kirk, "Maintenance and rehabilitation strategies utilizing Asphalt Rubber chip seals", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia.

Van Kirk, L. Jack. (1999), "Review of the Use of Crumb Rubber in Pavement Maintenance and Rehabilitation Strategies," Basic Resources Inc., Presented at a Meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, Florida 1999.

J. Smith, "Asphalt Rubber open graded friction course", Modified Asphalt Technologies, Inc, 2001.

I.Antunes, F.Giuliani. J.Sousa, "Caracterização Reológica de Betumes Modificados CRM sujeitos a Envelhecimento Artificial", 1st European Road Congress, Lisbon 2004.

4. Le prestazioni acustiche delle pavimentazioni gap graded della Variante di Canali a confronto con pavimentazioni coeve non gommate

*A cura del **Dott. Ing. Paolo Galaverna***
Presidente e fondatore di Genesis Acoustic Workshop

Introduzione alla relazione del Dott. Ing. Galaverna

a cura di Ecopneus

Come abbiamo visto, al momento della Progettazione della Variante Canali nel 2006 le pavimentazioni di tipo Asphalt Rubber non erano ancora disponibili sul territorio nazionale; in Italia i primi interventi con questa tecnologia risalgono, infatti, all'anno seguente.
Di conseguenza per raggiungere gli obiettivi di riduzione del rumore causato dal rotolamento dei pneumatici non era stata contemplata l'adozione di una pavimentazione a bassa emissione sonora realizzata con leganti modificati con polverino di gomma da PFU. In fase di progetto venne adottato un manto di usura in conglomerato di tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) di migliore resistenza meccanica, nello spessore di 4 cm, affidando il compito di abbattere il rumore generato dal traffico alla costruzione di rilevati artificiali ai lati della carreggiata stradale con il reimpiego del terreno di risulta degli scavi di cantiere.
Tra le alternative allora disponibili, la possibilità di pavimentare la variante con un conglomerato drenante/fonoassorbente di tipo autostradale fu scartata poiché inidonea sia dal punto di vista della riduzione del rumore dato dal passaggio dei veicoli, che per le caratteristiche di resistenza meccanica ottenibile.
I conglomerati drenanti/fonoassorbenti di tipo autostradale, infatti, sono efficaci nella riduzione del rumore da rotolamento solamente a velocità di percorrenza superiori ai 100 km/h. I vuoti nella tessitura della pavimentazione che consentono di "disperdere" le emissioni sonore sono inoltre soggetti ad intasarsi velocemente a causa dalla sporcizia trasportata dai pneumatici dei veicoli circolanti. Le velocità medie di percorrenza, inoltre, non sono sufficienti a generare il cosiddetto "effetto pompa", utile a tenere pervi gli alveoli della pavimentazione in presenza di acqua meteorica.
L'adozione di questo tipo di manti di usura su strade di caratteristiche assimilabili sparse sul territorio nazionale, ha dato nel tempo risultati deludenti proprio a causa della qualità del traffico cui sono sottoposte, perdendo in breve tempo le caratteristiche di fonoassorbenza e drenabilità che avrebbero dovuto garantire e dimostrandosi al contrario sconvenienti dal punto di vista economico a causa della breve durata in rapporto ad altre pavimentazioni di tipo "chiuso".
A seguito dell'adozione della variante di progetto, che prevedeva l'impiego di pavimentazioni di tipo Asphalt Rubber, nello studio del mix design si è comunque privilegiato la rugosità superficiale del manto stradale alle massime caratteristiche di bassa emissione acustica potenzialmente ottenibili, ritenendo tale soluzione più adeguata dal punto di vista della sicurezza della circolazione.
Le emissioni acustiche sarebbero comunque state efficacemente contenute dalle barriere schermanti naturali adottate.
Fra novembre 2014 e aprile 2015 è stata effettuata una serie di rilevazioni affidate alla società Genesis Acoustic Workshop di Parma, con lo scopo di verificare la qualità della pavimentazione anche dal punto di vista delle prestazioni acustiche.
Le rilevazioni sono state effettuate in tre diverse campagne di misurazioni ciascuna di 7 giorni, ripetute per due cicli, con l'impiego di un contatraffico Kv Laser in grado di rilevare contemporaneamente i flussi di traffico e le caratteristiche dei veicoli in transito. La rilevazione fonometrica delle emissioni acustiche è stata effettuata con il metodo Statistical Pass By secondo la norma UNI_EN ISO 11819-1 in diversi periodi del giorno ed in diverse condizioni climatiche con diverse temperature dell'asfalto.
I risultati dei confronti effettuati con pavimentazioni coeve di tipo SMA hanno evidenziato le migliori prestazioni delle pavimentazioni in AR, con emissioni acustiche inferiori di 0,5-1 db nei tratti in condizioni di conservazione paragonabili e con risultati nettamente superiori nei tratti in cui la pavimentazione SMA presentava segni di ammaloramento, del tutto assenti sulla pavimentazione in A.R che è tutt'ora in perfetto stato di conservazione.

Il rumore prodotto dal contatto pneumatico-asfalto sta acquistando importanza sempre crescente nell'impatto acustico di un'infrastruttura stradale a seguito dei continui miglioramenti in fatto di riduzione del rumore prodotto dai componenti motore/scarico/trasmissione e dall'aerodinamica dei moderni veicoli. Nell'immagine 41 è possibile osservare che il contributo dei pneumatici sul rumore totale prodotto da un autoveicolo in transito rappresenta sempre una percentuale pressoché costante a tutte le velocità; tende a diminuire solo alle alte velocità, ovvero superiori a 100 km/h, dove la componente aerodinamica (dovuta al flusso d'aria intorno al veicolo) comincia ad essere particolarmente evidente. Scopo di questo studio è di verificare le prestazioni acustiche di un asfalto Asphalt Rubber a tessitura ottimizzata e di un asfalto tradizionale (detto di riferimento - SMA) entrambi coevi (2007), stesi su tratti di strada simili da un punto di vista geometrico e interessati da un flusso veicolare di caratteristiche simili in termini di composizione del parco auto e media di velocità di percorrenza. I siti oggetto d'indagine sono localizzati nel Comune di Reggio Emilia lungo la Tangenziale di Sud-Est (Immagine 42).

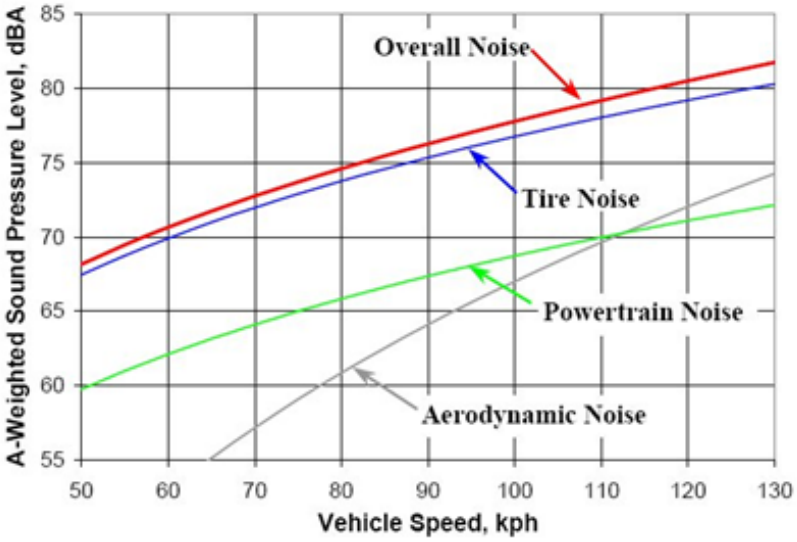


Immagine 40 - *Componenti del rumore prodotto da un veicolo circolante*

Immagine 41 - *Localizzazione dei punti di misura*

Nelle immagini 43 e 44 si riporta la documentazione fotografica delle due tipologie di asfalto indagate: l'asfalto di tipo tradizionale (SMA) e quello con tecnologia Asphalt Rubber a tessitura ottimizzata. I rilevamenti si sono svolti in distinte campagne di misura (Novembre 2014, Gennaio e Aprile 2015) che hanno previsto:

- n° 2 rilievi fonometrici di lunga durata (7 giorni) per la descrizione del clima acustico delle due aree d'indagine e n° 2 misure di traffico ad esse associate (Immagini 45 e 46) e della medesima durata, finalizzate allo studio della tipologia di traffico circolante nei due tratti di tangenziale e quindi per la validazione dei due punti di misura per le successive misure di Pass-by. Tali misure sono state realizzate nel Gennaio 2015.

Immagine 42 - *Asphalt Rubber*

Immagine 43 - *Asfalto di riferimento (SMA)*

- N° 4 rilievi fonometrici di Statistical Pass-by (SPB) (due nella campagna di misura del Novembre 2014 e due nella campagna di Aprile 2015) per la comparazione delle prestazioni acustiche dei due asfalti eseguiti secondo la norma UNI EN ISO 11819-1:2004 "Acustica – Misurazione. dell'influenza delle superfici stradali sul rumore da traffico – Metodo statistico applicato al traffico passante" (Immagini 47 e 48).
- Le postazioni di misura indagate si trovano in un contesto extraurbano "aperto" così come richiesto dalla norma.

Immagine 44 - *Punto di misura fonometrica e di traffico*

Immagine 45 - *Punto di misura fonometrica e di traffico settimanale per la tratta in asfalto modificato*

Immagine 46 - *Postazione di misura Passby tratta con asfalto di riferimento*

Immagine 47 - *Postazione di misura Passby tratta con asfalto modificato con polverino di gomma da PFU*

Poiché i rilievi fonometrici di Pass-by prevedono la misurazione dei massimi livelli di pressione sonora ponderata A di un numero significativo, dal punto di vista statistico, di passaggi di singoli autoveicoli assieme alle relative velocità, la stazione di misura era composta oltre che dal fonometro anche da un contatraffico KV Laser della Sodi Scientifica per la misura delle velocità di transito. I dati venivano raccolti ed elaborati tramite un software dedicato (Passby Manager) sviluppato dalla Genesis Acoustic Workshop s.r.l. (Immagine 49).

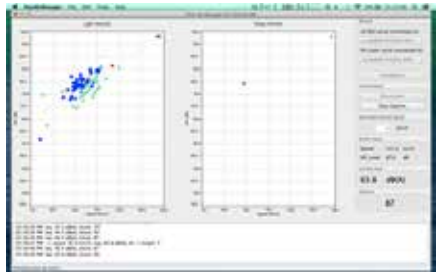


Immagine 48 - *Software passby manager*

Si osservi che in tutte le postazioni di misura i veicoli transitanti sono classificabili, secondo la norma UNI EN ISO 11819-1, in categoria 1 (autovetture).
Dall'analisi dei risultati delle misure fonometriche di lunga durata (Immagine 50) è già possibile effettuare una prima analisi prestazionale dei due diversi asfalti. Si può osservare che nel punto di misura posto in prossimità del tratto con pavimentazione in Asphalt Rubber, il clima acustico è contraddistinto, mediamente, da livelliacustici più bassi. Le successive analisi delle misure di SPB provano che ciò dipende dalla tipologia di asfalto indagato, infatti, i dati di traffico rilevati confermano che i flussi nei due tratti erano del tutto comparabili.

Immagine 49 - *Time history delle misure di lunga durata*

Si riportano nel seguito i risultati in forma grafica delle misure condotte con il metodo SPB. Come evidenziato dal grafico in immagine 51 riferito alla prima campagna di misura, l'asfalto gommato risulta più silenzioso rispetto a quello tradizionale, infatti, alla velocità di riferimento di 50 Km/h si osserva sul livello pesato A un abbattimento di circa 0.5 dB con tendenza a ridursi alle alte velocità.

Ciò può essere spiegato con il fatto che, dopo 7 anni, la parte di bitumatura superficiale, che è quella che a parità di tutti gli altri fattori, contribuisce a ridurre il rumore rispetto ad un asfalto tradizionale, è ormai usurata.
Pur essendo ancora leggermente meno rumoroso quindi, il miglior pregio dell'asfalto modificato dopo tanto tempo, sta nel suo perfetto stato di conservazione. Le misure sono state infatti effettuate in due sezioni in cui l'asfalto fosse ben conservato, cosa vera per tutto il tratto asfaltato con bitume addittivato in gomma ma non altrettanto vera per il tratto tradizionale, ove si possono notare evidenti segni di usura.

Quindi, a parità di stato di conservazione, i due asfalti quasi si equivalgono, ma nella maggior parte dei tratti, dove l'asfalto tradizionale mostra i primi cedimenti, risulterà anche molto più rumoroso.

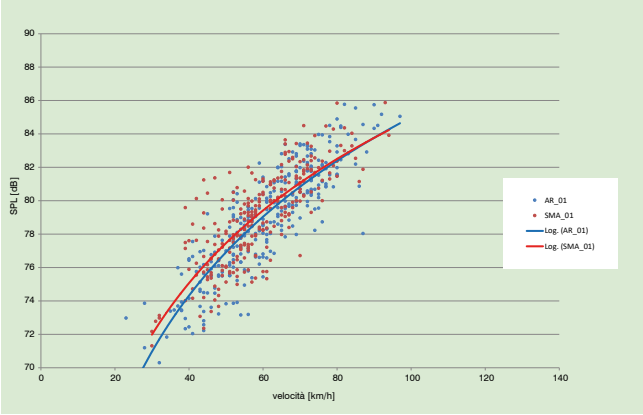


Immagine 50 - *Differenza tra le prestazioni acustiche dei due asfalti indagati (campagna di misura Novembre 2014)*

Le pavimentazioni in AR hanno emissioni acustiche inferiori di 0,5-1 db nei tratti in condizioni di conservazione paragonabili e risultati nettamente superiori nei tratti in cui la pavimentazione SMA presentava segni di ammaloramento

Immagine 51 - *Confronto tra le prestazioni acustiche dei due asfalti per la prima campagna di misura analisi in frequenza alla velocità di riferimento*

Analisi in frequenza alla velocità di riferimento

I grafici nelle immagini 52 e 53 mostrano il confronto diretto, per entrambe le campagne di misura, dei risultati dei rilievi di Pass-by per i due tipi di asfalto analizzati, ovvero dei livelli sonori L_{max} alle diverse frequenze (superiori a 100 Hz) in terzi d'ottava alla velocità di riferimento (50 km/h).
A tutte le frequenze superiori a 1000 Hz le prestazioni acustiche dell'asfalto AR risultano superiori rispetto a quelle dell'asfalto tradizionale (SMA) in entrambe le campagne di misura.

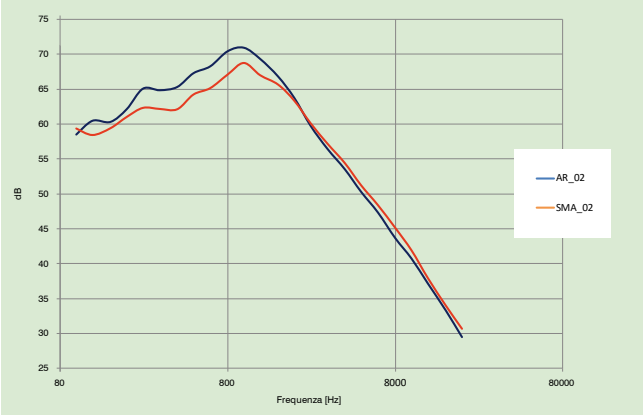


Immagine 52 - *Confronto tra le prestazioni acustiche dei due asfalti per la seconda campagna di misura.*

Analisi in frequenza alla velocità di riferimento

Sebbene il monitoraggio nelle tratte stradali in esame sia solo all'inizio, è interessante osservare come siano variate le performance dei due asfalti tra le due campagne di misura e per quale causa.
I grafici delle Immagini 54 e 55 mostrano un confronto temporale delle prestazioni dei due asfalti per ogni sito di misura riportando i livelli misurati in funzione della velocità di percorrenza dei veicoli. Si può osservare che, per entrambi gli asfalti, si è verificato un miglioramento delle prestazioni acustiche (espresso dall'abbassamento della curva di interpolazione logaritmica dei punti di misura).

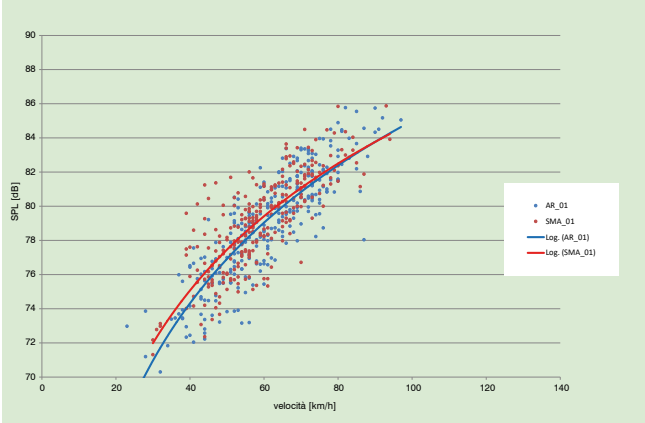


Immagine 53 - *Variazione delle prestazioni acustiche dell'asfalto AR tra le due campagne di misura.*

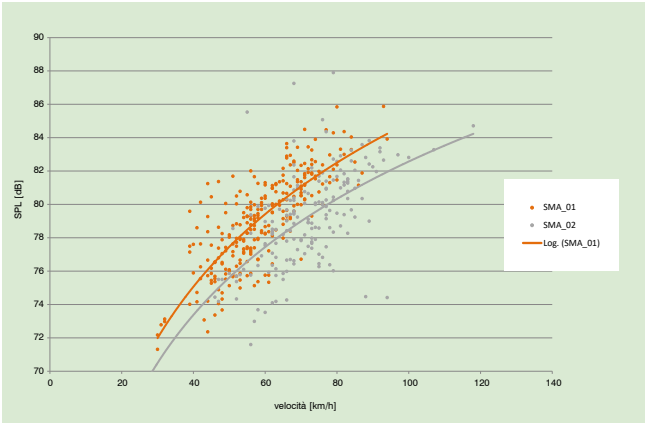


Immagine 54 - *Variazione delle prestazioni acustiche dell'asfalto SMA tra le due campagne di misura*

L'analisi in frequenza alla velocità di riferimento (50 km/h) conferma questa tendenza, soprattutto dalla frequenza di 1000 Hz in su (Immagini 56 e 57).
Poiché le due campagne di misura sono abbastanza vicine nel tempo, non è possibile imputare questo miglioramento a variazioni delle caratteristiche intrinseche degli asfalti ma a componenti ambientali differenti che hanno caratterizzato i due rilievi fonometrici.

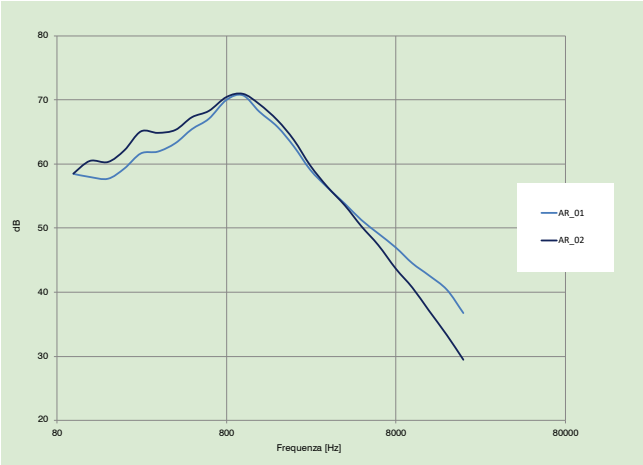


Immagine 55 - *Variazione delle prestazioni acustiche dell'asfalto ar tra le due campagne di misura analisi in frequenza alla velocità di riferimento.*

Analisi in frequenza alla velocità di riferimento

Diversi studi indicano che la temperatura dell'asfalto è un fattore che ha una certa influenza sui risultati delle misure di rumore da traffico veicolare. Pur avendo ancora effettuato, per i siti in esame, solo due campagne di misura SPB, ma in stagioni diverse e temperature dell'asfalto nettamente differenti, alla luce dei risultati ottenuti, si può già confermare questa influenza.

Immagine 56 - *Variazione delle prestazioni acustiche dell'asfalto sma tra le due campagne di misura analisi in frequenza alla velocità di riferimento*

Analisi in frequenza alla velocità di riferimento

Glossario

Asphalt Rubber:
L'Asphalt Rubber è un bitume modificato con una percentuale minima di polverino di gomma riciclata da Pneumatici Fuori Uso pari al 15% sul peso totale del legante, incorporata tramite processo wet, che abbia reagito durante un periodo di tempo sufficientemente lungo da permettere il rigonfiamento della gomma.

Gomma sbr/nr:
Gomma riciclata da PFU attraverso processi meccanici che permettono la separazione e comminuzione della gomma dagli altri componenti del pneumatico. Per la produzione di conglomerati bituminosi, è solitamente utilizzata la frazione più fina "polverino" corrispondente a granulometrie uguali o inferiori a 1 mm.

Processo wet
Nel cosiddetto "processo wet", il polverino di gomma viene aggiunto al bitume stradale in determinate condizioni di temperatura ed agitazione che permettono l'ottenimento di un mastice elastomerico caratterizzato da valori di viscosità sensibilmente superiori a quelli del legante di origine. Durante tale processo di miscelazione, il polverino assorbe e fissa la frazione maltenica del bitume che viene dunque inglobata nella matrice semi–gelatinosa del mastice; questo fenomeno (detto "swelling") previene dunque l'ossidazione e la dispersione dei malteni che è causa del processo naturale di invecchiamento e degradazione del bitume stradale.

Gap graded
I conglomerati di tipo semi-chiuso sono caratterizzati da una struttura litica di tipo discontinuo e da ottime proprietà meccaniche, elevata resistenza a fatica e scarsa sensibilità all'acqua; tali caratteristiche li rendono particolarmente adatti per ridurre tutti i fenomeni di fessurazione di riflesso, fessurazione a fatica e fessurazione

termica, con l'ottenimento di superfici prive di fenomeni d'ormaiamento (rutting), con una buona aderenza (skid resistance), ridotta necessità di manutenzione, una buona regolarità e ridotti livelli d'emissioni sonore. Inoltre, la rugosità delle pavimentazioni "gap-graded permette la riduzione del fenomeno di splash and spray e di aquaplaning migliorando dunque le caratteristiche di sicurezza della strada. Questa tipologia è adatta sia a strati di usura ma anche di binder.

Open graded
I conglomerati di tipo semi-aperto hanno più spiccate caratteristiche funzionali grazie alla elevata percentuale di vuoti residui che rende possibile il drenaggio dell'acqua meteorica. Tale porosità riduce anche la vibrazione del pneumatico e ne dissipa l'energia da impatto risultando quindi "fonoassorbente".

Processo dry
Nel processo Dry, il polverino/granulo di gomma viene inserito insieme ad inerti e bitume direttamente nell'impianto di miscelazione del conglomerato.

SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer)
Membrana di rinforzo realizzata con bitume Asphalt Rubber e inerti, avente la funzione di prevenire la propagazione dei fenomeni di fessurazione tra i vari strati bitumati che compongono la pavimentazione.

SCRIM (Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine)
Strumentazione che consente di determinare le caratteristiche di aderenza e macrotessitura superficiale della pavimentazione, attraverso la determinazione di tre parametri: il CAT (Coefficiente di Aderenza Trasversale) per l'aderenza; l'HS (Altezza in sabbia) e MPD (Mean Profile Depth) per la macrotessitura.

CAT (Coefficiente Aderenza Trasversale)
Il Coefficiente di Aderenza Trasversale dà indicazioni sull'effetto di interazione pneumatico-strada durante il rotolamento, necessario per garantire comfort di guida e sicurezza per l'utente. Tale parametro è influenzato dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione (levigatura, asperità degli inerti), dalle caratteristiche degli pneumatici (pressione di gonfiaggio, rigidezza del materiale) e dalle condizioni ambientali (asciutto, bagnato).

FWD (Falling Weight Deflectometer)
Macchinario per la determinazione delle caratteristiche di aderenza di una pavimentazione. Il Falling Weight Deflectometer è uno strumento in grado di applicare alla superficie stradale un carico dinamico il quale produce una deformazione dell'intera sovrastruttura, diffusa in direzione radiale rispetto al punto di applicazione del carico. Il carico è generato dalla caduta di una massa da un'altezza fissata, ed è trasmesso alla pavimentazione da una piastra circolare, a contatto con la superficie stradale, sulla quale il grave impatta.

Progetto grafico: *Peja Design;*
Fotografie: *ICP, Videoservice Italia, Gabriele Peja.*
Stampa: *TMB Stampa Roma.*
Finito di stampare nel mese di gennaio 2017.

FSC

Ti potrebbe interessare anche:

6
L'impiego di prodotti da Pneumatici Fuori Uso nelle pavimentazioni stradali

8
Prestazioni acustiche degli asfalti a bassa rumorosità in scenari urbani

13
Guida per la produzione di bitumi con polverino di gomma da Pneumatico Fuori Uso

Ecopneus Scpa
Via Messina, 38 Torre B
20154 Milano

Tel.: +39 02.92.970.1
Fax: +39 02.92.970.299

E-mail: info@ecopneus.it
Web: www.ecopneus.it