



FONDAZIONE
PER LO SVILUPPO
SOSTENIBILE

Sustainable Development Foundation

OPPORTUNITA' DI CIRCULAR ECONOMY NEL SETTORE DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Tecnologie, impatti e scenari per una
proposta di roadmap nazionale di settore

Dicembre 2018

Ricerca a cura della Fondazione per lo sviluppo sostenibile in collaborazione con Siteb e con il supporto tecnico scientifico dell'Università di Palermo



Gruppo di lavoro

Fondazione sviluppo sostenibile: Massimiliano Bienati, Daniela Cancelli, Andrea Barbabella (coordinatore)

Siteb: Ing. Stefano Ravaioli

Università di Palermo, Dipartimento di Energia, ingegneria dell'informazione e modelli matematici: Prof. Ing. Maurizio Cellura, Ing. Sonia Longo.

Si ringrazia inoltre per il suo contributo la Prof. Ing. Clara Celauro del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Palermo.

Presentazione della ricerca

Tra i principali driver di una economia circolare, l'allungamento del ciclo di vita dei prodotti, insieme all'opportunità di riciclarne i materiali componenti a fine vita, sono certamente quelli che determinano i maggiori vantaggi ambientali. Prodotti durabili, riutilizzabili e completamente riciclabili, consentono infatti di ridurre l'estrazione di nuove risorse vergini e di conservare buona parte dell'energia in essi contenuta, ossia quella già consumata nelle fasi di trasformazione da materiali grezzi a semilavorati o prodotti finiti.

Ciò è più che mai vero nel settore della costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali, dato il grande consumo di risorse naturali e di energia necessari, per cui la durata delle pavimentazioni, l'utilizzo di materiali riciclati e la temperatura di produzione e stesa dei conglomerati sono tre aspetti chiave in direzione di una maggiore sostenibilità del settore.

In questo contesto, a partire da un'analisi del settore degli asfalti in Italia e, in particolare, dell'impatto generato in termini di consumo di risorse e produzione di rifiuti, la ricerca si pone l'obiettivo di verificare e quantificare i vantaggi ambientali di ciclo di vita della diffusione, a scala nazionale, di un approccio alla manutenzione delle strade con tecnologie e soluzioni innovative che consentano, a parità di prestazioni della pavimentazione finale, elevati tassi di riciclo di fresato d'asfalto e basse temperature di preparazione e stesa dei conglomerati bituminosi.

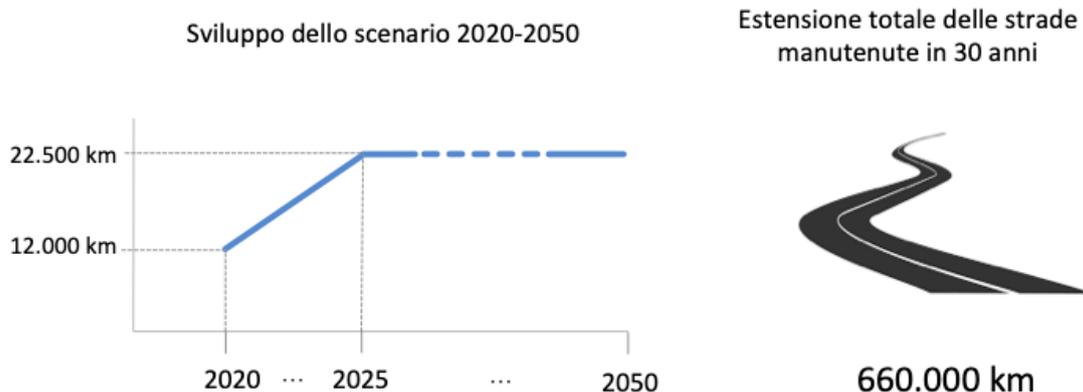
La ricerca è stata curata dalla Fondazione per lo sviluppo sostenibile in collaborazione con il Siteb, coinvolgendo esperti di settore sia in ambito industriale che universitario. Le valutazioni di impatto ambientale sono state elaborate in collaborazione con il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici dell'Università di Palermo, tra i fondatori dell'Associazione Rete Italiana LCA.

Executive Summary

Nel periodo dal 2006, anno di picco di produzione degli ultimi 30 anni, al 2017, la produzione di conglomerati bituminosi in Italia è calata di quasi il 50%, passando da 44,3 Mt a 23,7 Mt, per un valore cumulato complessivo di conglomerati non posati in opera pari a 180 milioni di tonnellate, equivalente a mancati interventi di manutenzione su circa 90.000 km di strade per un valore economico complessivo di circa 12 miliardi di euro. Gli effetti di questa politica di disinvestimento da parte delle Pubbliche Amministrazioni, si riscontrano nello stato di diffuso degrado della rete viaria del Paese, che rende urgente definire un piano di interventi straordinario che consenta di recuperare il tempo perduto. Un'urgenza che, tuttavia, non può prescindere dal rispetto degli impegni internazionali sottoscritti dal nostro Paese per la riduzione delle emissioni di gas serra, responsabili del cambiamento climatico in atto, e della necessità di ridurre la pressione sul capitale naturale.

In questo contesto, il presente Rapporto ricostruisce il quadro della rete viaria nazionale, analizza i consumi storici di conglomerati e bitumi del settore, approfondisce le tecnologie di produzione e posa, e quantifica il vantaggio ambientale di un piano di manutenzione che consenta di rimettere gradualmente in sicurezza la rete viaria nazionale adottando tecnologie innovative e circolari, rispetto a tecnologie tradizionali.

Lo scenario del piano di manutenzioni analizzato si sviluppa in due fasi distinte, prevedendo di riportare entro 5 anni gli interventi di manutenzione delle strade ai valori del 2006, stimati in una estensione di circa 22.500 km, da mantenere poi costanti fino al 2050. In 30 anni l'estensione complessiva delle strade mantenute risulterebbe pari a circa 660 mila km, equivalente al totale delle strade italiane.



In termini di risparmio di emissioni di gas serra, nello scenario a regime il vantaggio di effettuare gli interventi con tecnologie innovative a basse temperature ed elevato tasso di riciclo di fresato, rispetto a tecnologie tradizionali a caldo con modeste quote di riciclo, ammonta a 789 mila tonnellate di CO₂ equivalente risparmiate ogni anno, pari alle emissioni di 450 mila auto del parco circolante nazionale che percorrano 10.000 km. Considerando il bilancio cumulato nei 30 anni dello scenario per un totale di 660 mila km di strade mantenute, il risparmio risulta di 23 milioni di tonnellate di CO₂eq, pari alle emissioni 13 milioni di veicoli.

Bilancio delle emissioni di gas serra di ciclo di vita evitate con interventi di manutenzione ordinaria su 22.500 km di strade con tecnologie innovative e circolari rispetto a tecnologie tradizionali

789 Mt di CO₂-eq

Pari alle emissioni di 450.000 auto per 10.000 km di percorrenza



In termini di risorse minerali e fossili, il vantaggio di interventi effettuati a tecnologie innovative per i 22.500 km di manutenzioni annue dello scenario a regime, ammonta a 50 milioni di tonnellate di materiali non consumati, corrispondenti a una fila di 1,7 milioni di autocarri da 30 tonnellate, che diventano 50 milioni considerando le 1,5 miliardi di tonnellate di risorse vergini risparmiate nei 30 anni.

L'opportunità di riuscire a rendere effettivi questi vantaggi, richiede un salto in avanti sia da parte delle amministrazioni locali e centrali, che devono dotarsi di piani di manutenzione mirati al ripristino delle pavimentazioni di loro competenza per ordine di priorità, nonché di specifiche competenze improntate a recepire le migliori innovazioni tecnologiche proposte dal mercato, sia da parte degli operatori del settore, che devono investire nell'adeguamento tecnologico degli impianti, oltre che continuare a sostenere la ricerca e sviluppo per consolidare le tecnologie innovative esistenti e svilupparne di nuove ancora più performanti.

INDICE DELLA RICERCA

1	IL SETTORE DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI IN ITALIA	9
1.1	La rete nazionale di strade asfaltate in Italia	10
1.2	La manutenzione delle strade asfaltate in Italia	17
1.3	Consumo di risorse e emissioni inquinanti dalla manutenzione degli asfalti in Italia ...	21
1.4	La dimensione economica del comparto degli asfalti	23
2	TECNOLOGIE E OPPORTUNITÀ DI CIRCOLARITÀ NEL SETTORE DELLE STRADE. 27	
2.1	I vantaggi della circolarità.....	28
2.2	Tecnologie per la produzione e stesa di pavimentazioni a temperature ridotte	29
2.3	Tecnologie per migliorare le prestazioni delle pavimentazioni stradali	33
2.4	Il riciclo del conglomerato bituminoso da recupero	35
3	I VANTAGGI AMBIENTALI DELLE TECNOLOGIE INNOVATIVE E CIRCOLARI IN UNO SCENARIO DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE AL 2050	40
3.1	Lo scenario di riferimento: un nuovo modello per le manutenzioni stradali in Italia....	41
3.2	Analisi di ciclo di vita: impostazione generale e ipotesi di base	45
3.3	I benefici ambientali di un nuovo modello di manutenzione stradale	48

1 Il settore delle pavimentazioni stradali in Italia

1.1 La rete nazionale di strade asfaltate in Italia

Nel Nuovo Codice della Strada (N.C.S.)¹ le strade sono definite come “*l'area ad uso pubblico destinata alla circolazione dei pedoni, dei veicoli e degli animali*” (Art. 2, comma 1) e vengono classificate in base alle loro caratteristiche tecnico-funzionali, nonché distinte in relazione alla responsabilità di gestione da parte delle amministrazioni competenti. La classificazione tecnico-funzionale riporta le caratteristiche costruttive minime che una strada deve possedere in relazione a esigenze di funzionalità e di sicurezza per l'importanza del traffico veicolare cui sono destinate.

Nel quadro del sistema viario nazionale, per le grandi arterie di collegamento a elevato traffico, quali le *autostrade* e le *strade extraurbane principali*, è previsto che le carreggiate siano indipendenti e separate da spartitraffico invalicabili con almeno due corsie per ogni senso di marcia, che non vi siano intersezioni a raso, che siano dotate di una corsia di emergenza e di banchine pavimentate ecc. Diversamente, per le *strade extraurbane secondarie*, a minore intensità di traffico, è prevista una sola carreggiata con due corsie per ogni senso di marcia e banchine, non necessariamente pavimentate. In ambito urbano, oltre alle autostrade, si hanno *strade di scorrimento*, che anche in questo caso devono essere dotate carreggiate indipendenti con almeno due corsie per ogni senso di marcia, più una eventuale corsia riservata ai mezzi pubblici, prevedere intersezioni a raso semaforizzate, ecc., e *strade di quartiere*, ossia semplici carreggiate a due corsie dotate di banchine o marciapiedi. A completamento di questa classificazione si trovano infine le *strade locali*, sia urbane che extraurbane, che comprendono anche gli *itinerari ciclopeditoni*, intesi come strade locali, urbane, extraurbane o vicinali, destinate prevalentemente alla percorrenza pedonale e ciclabile.

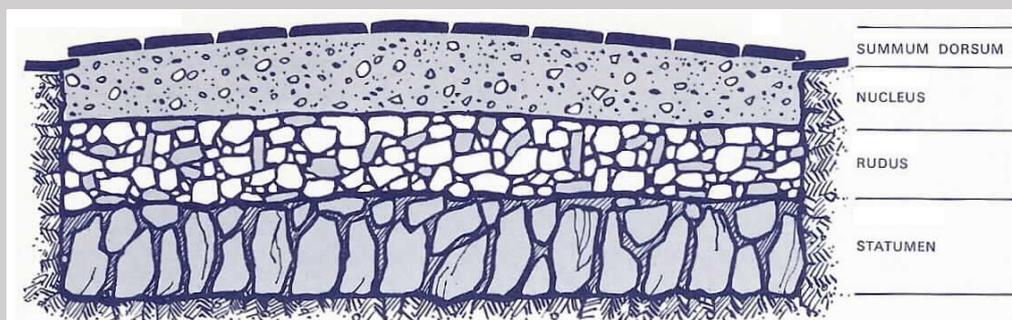
Diversamente dalla classificazione tecnico-funzionale, la classificazione amministrativa distingue le strade per competenza di gestione dei diversi enti pubblici. Risulta così un sistema di responsabilità di gestione che, a cascata e per pertinenza strategica e territoriale, distingue le competenze dello Stato da quelle delle Regioni, delle Province e dei Comuni. Oltre alle *autostrade*, di competenza statale e prevalentemente gestite in concessione da privati, le *strade statali* riguardano le strade di interesse nazionale come le grandi direttrici di traffico o di collegamento con gli Stati esteri confinanti, nonché gli allacciamenti alla rete statale delle infrastrutture strategiche, quali i porti marittimi, gli aeroporti. Diversamente, le *strade regionali* riguardano i collegamenti tra il capoluogo di Regione e gli altri capoluoghi, le *strade provinciali* collegano tra di loro le provincie di una stessa regione e le *strade comunali* collegano tra loro le frazioni di un comune.

¹ D.Lgs. n. 285, 30 aprile 1992

Strade antiche e moderne

Dal punto di vista ingegneristico, si può dire che furono i Romani i precursori delle moderne strutture stradali. Lo stesso vocabolo “strada” ha la sua etimologia latina in “strata”, che significa “via lastricata”, ma è anche il femminile sostantivato di “stratus”, che significa “strato”. La caratteristica comune delle strade dei Romani riguardava proprio la loro costruzione, che prevedeva lo scavo di un tracciato, la posa di una solida massicciata, formata da tre strati di diversi materiali lapidei, e la copertura con uno strato finale.

Figura 1. Sezione di una tipica “via silice strada” di epoca romana



Il primo strato (Statumen), che era composto da grossi blocchi di pietrame sistemati di taglio per uno spessore di almeno 30 cm, sosteneva un secondo strato (Ruderatio), di altrettanto spessore, costituito da ciottoli di medie dimensioni, su cui a sua volta poggiava un terzo strato (Nucleus) di circa 25 centimetri di ghiaia mista ad argilla. A copertura finale veniva steso un lastricato di selce, nel caso delle vie consolari e delle strade più importanti o da una semplice inghiaia per le strade meno importanti.

Con questa tecnica costruttiva, pur variando i materiali utilizzati a seconda della disponibilità delle zone in cui venivano costruite, i Romani costruirono una rete di strade consolari di oltre 80 mila chilometri collegando i centri nevralgici e commerciali nella penisola italiana e, con l’Impero, al di fuori di essa.

Con Roma, dunque, l’esistenza di un sistema viario ben funzionante fu visto come uno degli elementi fondamentali di una efficiente organizzazione statale sia dal punto di vista militare che amministrativo ed economico, tant’è che della responsabilità per la costruzione, manutenzione e gestione delle stesse erano investite le maggiori cariche dello Stato, tra cui i censori e i consoli, cui molte strade erano intitolate, come la via Aurelia, la Flaminia, la Cassia, l’Appia.

In seguito alla caduta dell’Impero e per un lungo periodo che attraversò tutto il medioevo, la costruzione di nuove strade e la manutenzione di quelle esistenti venne meno per ragioni opposte a quelle che resero grande l’Impero Romano. In questo periodo, infatti, l’isolamento e l’inaccessibilità venivano considerate parte di una strategia di difesa dei feudi dagli attacchi esterni. Con la mancanza di interventi di riparazione, ne seguì che le strade di grande collegamento divennero pressoché inagibili.

Con il Rinascimento e la sua spinta per creare una nuova civiltà ancorata all’eredità lasciata dai greci e dai romani, aperta agli scambi culturali e al commercio, l’interesse per il ripristino di un efficiente sistema di collegamento terrestre ritornò ad essere strategico, per quanto in un primo periodo, in Italia e in molti parti d’Europa, le rivalità tra gli stati ne ostacolarono l’efficace realizzazione.

Unica eccezione la Francia, dove nel 1747 venne fondata l'*Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, la più antica scuola di ingegneria civile della storia, tutt'ora attiva, che contribuì in modo determinante all'evoluzione verso una moderna concezione di sovrastruttura a strati che fosse facile da costruire e da mantenere e in grado di sostenere i carichi sempre più rilevanti dei mezzi di trasporto. Pionieristico in questo senso fu il lavoro svolto da Pierre Marie Trésaguet, ingegnere francese che per primo sviluppò un approccio scientifico alla costruzione di pavimentazioni stradali e in una pubblicazione del 1764 propose uno schema costruttivo a tre strati: una fondazione di grosse pietre poggiata su un sottofondo sagomato con pendenze trasversali per favorire lo scolo dell'acqua; un secondo strato di pietre più piccole, battute per infilarci negli interstizi della fondazione, e un terzo strato superficiale di pietrisco fine.

Questo schema costruttivo, rimase in auge per alcuni decenni, fino a quando, agli inizi dell'Ottocento, iniziò ad affermarsi la proposta di John Mac Adam, un ingegnere scozzese, ispettore delle strade del Regno Unito, di sostituire lo strato di fondazione con un unico strato di pietrisco avente opportune caratteristiche dimensionali e di durezza. Questo approccio, più economico e meno laborioso di quello del Trésaguet, si impose come riferimento del modo migliore di fare le strade per tutto il XIX secolo e venne via via perfezionato adottando materiali lapidei di origine calcarea che, sottoposti a bagnatura in fase costruttiva si cementavano fino a formare una crosta dura e impermeabile all'acqua, a protezione del sottofondo.

Con il '900 e l'avvento dell'automobile, emerse la necessità di migliorare ulteriormente le prestazioni delle strade. A causa del grip dei pneumatici e della velocità dei veicoli, lo strato superficiale in pietrisco si usurava molto rapidamente, generando un impoverimento della massiciata con la conseguente formazione di buche, che richiedevano costosi interventi di manutenzione. Inoltre, nelle stagioni secche, la grande quantità di polvere sollevata dal passaggio dei veicoli, oltre al fastidio per gli utenti stessi, creava danni alle proprietà attraversate, nonché problemi di igiene, soprattutto nei centri abitati. Per non dire del fango che si formava nelle stagioni umide, con le conseguenze che si possono immaginare sulla viabilità.

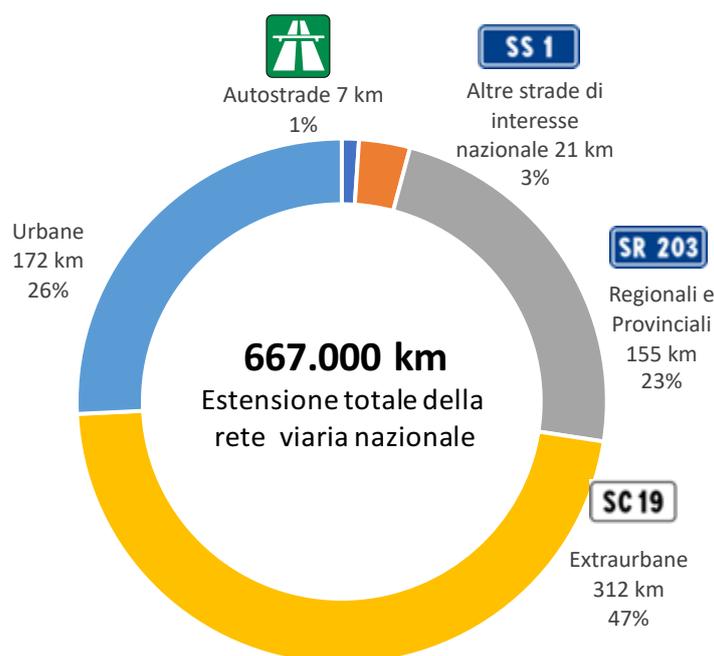
Dapprima, il problema di uno strato superficiale più coeso e performante, fu affrontato utilizzando il catrame ottenuto dalla combustione del carbone, che steso sul pietrisco superficiale consentiva la formazione di una crosta omogenea resistente al passaggio dei veicoli. Successivamente alla prima guerra mondiale, tuttavia, l'aumento del traffico veicolare richiese il superamento dell'approccio empirico che aveva caratterizzato la costruzione della gran parte delle strade esistenti a quel periodo, introducendo ulteriori elementi di scientificità nella progettazione delle strade, anche alla luce delle caratteristiche di nuovi materiali in grado di migliorare le prestazioni costruttive delle pavimentazioni.

Con questo scopo, nel 1920, il Touring Club Italiano fonda l'Istituto Sperimentale Stradale, in collaborazione con il Politecnico di Milano, dando inizio alla fase di ricerca e sperimentazione del modo migliore di fare le strade, che attraverserà tutto il XX secolo, passando per la Seconda Guerra Mondiale, la ricostruzione degli anni cinquanta e sessanta e che oggi, nell'era della transizione alla circular economy, si apre a nuove sfide per la sostenibilità.

Il Codice della Strada (art. 13 D .Lgs. 285/92) obbliga gli enti gestori di strade alla realizzazione del catasto strade: secondo un Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 2001 entro 5 anni dall'entrata in vigore del decreto stesso tutte le strade (autostrade, strade di interesse nazionale, regionali, provinciale, comunali extraurbane e comunali) dovevano essere accatastate, attraverso un sistema informatizzato. Ad oggi il catasto delle strade non risulta ancora pienamente attuato, in particolare per le strade comunali ed extraurbane. Tra l'altro oggi è ancora in corso la ripartizione e l'attribuzione giuridica di molte tra le principali strade italiane fra Statali (ora denominate "di interesse nazionale", unitamente alle autostrade), Regionali e Provinciali.

Secondo i dati più aggiornati pubblicati dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, la rete stradale nazionale si estende per un totale di circa 667 mila chilometri. Di questi, circa 183 mila km riguardano la rete delle strade primarie e principali, che comprendono quasi 7 mila km di autostrade, 21 mila km di strade di interesse nazionale e 155 mila km di strade regionali e provinciali. La rimanente parte è costituita dalla rete delle strade secondarie e locali, per un totale di circa 484 mila km di strade comunali urbane e extraurbane².

Figura 2. Ripartizione dell'estensione della rete viaria nazionale



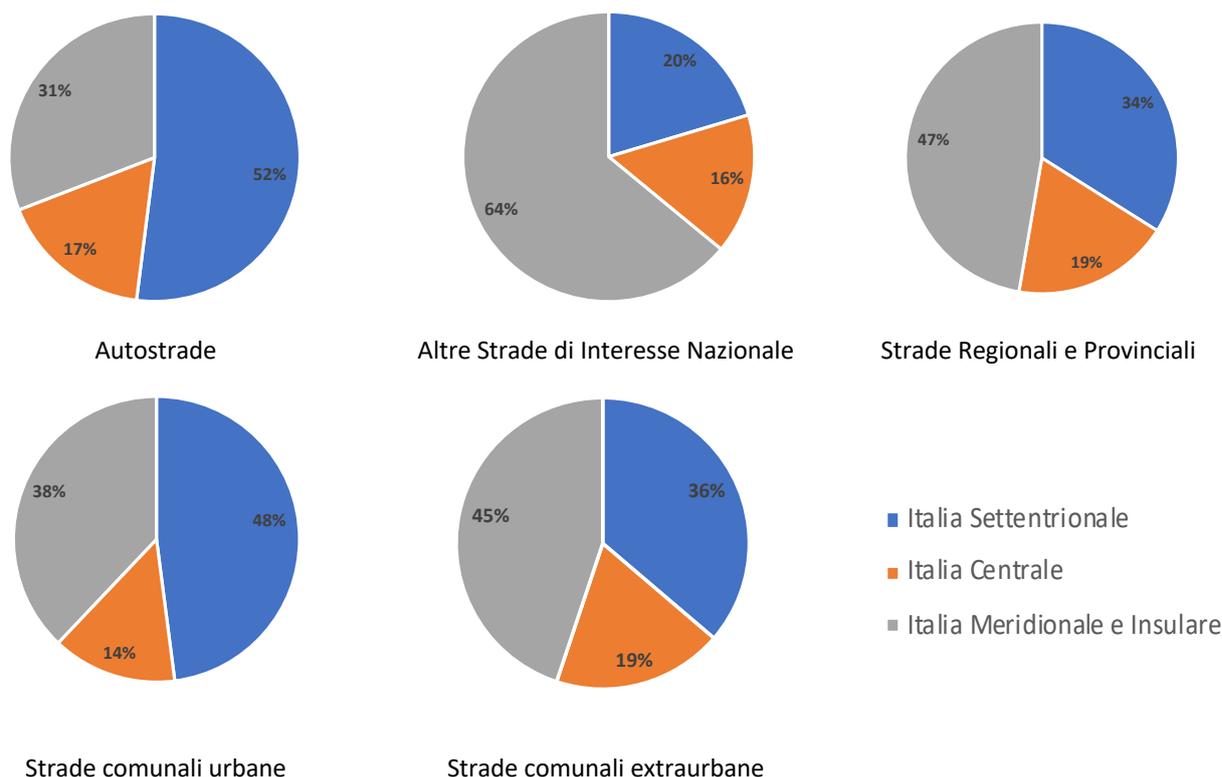
Fonte: Elaborazione Fondazione su dati del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Nel dettaglio per macroregione, la rete delle autostrade risulta più estesa al nord (52%), rispetto al Sud e Isole (31%) e al Centro (17%), mentre per le altre strade di interesse nazionale, nonché regionali e provinciali, si ha evidenza di una maggiore estensione nelle regioni del Sud e Isole (64%

² Dati aggiornati al 1999, come riportati nel "Conto Nazionale delle infrastrutture e dei trasporti, Anno 2004". Ad oggi, per queste categorie di strade non sono disponibili dati nazionali più aggiornati.

e 47%, rispettivamente), rispetto al Nord (20%, 34%) e al Centro (16%, 19%). Per quel che riguarda le reti di strade comunali, quelle urbane sviluppano un'estensione maggiore al nord (48%), rispetto al Sud e Isole (38%) e al Centro (14%), mentre quelle extraurbane vedono una maggiore estensione al Sud e Isole (45%), rispetto al Nord (36%) e al Centro (19%).

Figura 3. Distribuzione per ripartizione geografica dell'estensione delle reti stradali italiane



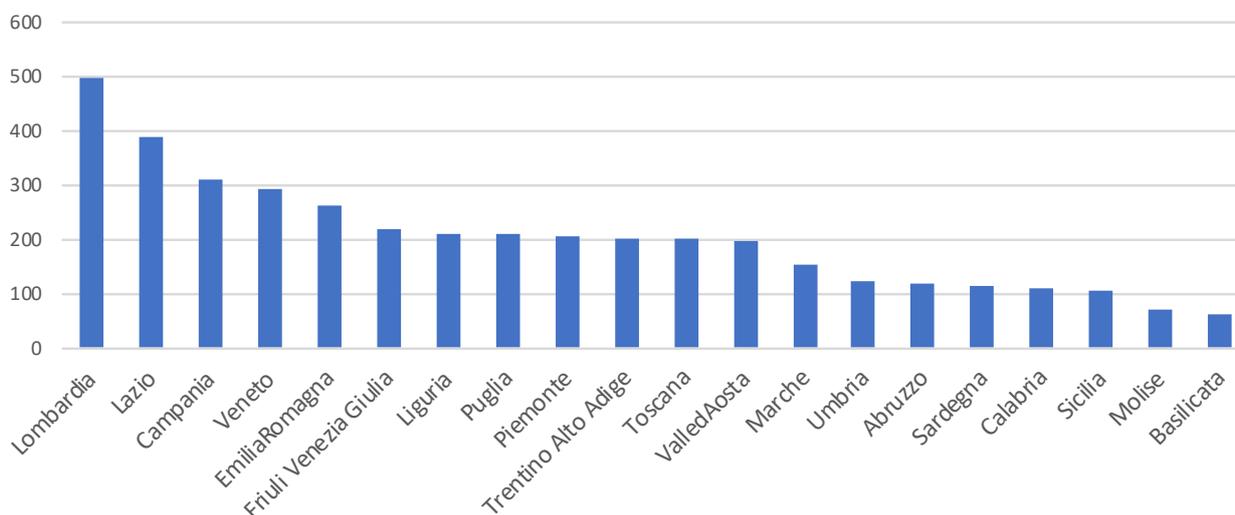
Fonte: elaborazione Fondazione su dati del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

In questo quadro, risulta che l'Italia Settentrionale ha la maggiore dotazione di Autostrade sia rispetto ai residenti (1,3 km ogni 10.000 abitanti), sia rispetto alla superficie (3 km ogni 100 km/quadri), sia rispetto al parco veicoli circolante (2 km ogni 10.000 autovetture), mentre l'Italia centrale ha una dotazione di Autostrade pari a 0,98 km ogni 10.000 abitanti (2,03 km 100 km/quadri e 1,5 km ogni 10.000 autovetture). Al contrario, per quanto riguarda le strade regionali e provinciali (con 35 km per 10.000 abitanti e 60 km per 100 kmq) e le altre strade di interesse nazionale (con 7 km per 10.000 abitanti e 11 km per 100 kmq), l'Italia Meridionale ed Insulare prevale largamente sul resto di Italia.

Riguardo alla pressione sulla rete stradale, si evidenziano situazioni di criticità in Lombardia (496 autovetture circolanti per km) e nel Lazio (389 autovetture circolanti per km), che risultano essere le due regioni con la maggiore concentrazione di autovetture per chilometro di estensione stradale. Per contro, le regioni in cui si registra la minor concentrazione di autovetture per chilometro di

strada, sono la Basilicata (62 autovetture circolanti per km) e il Molise (71 autovetture circolanti per km).

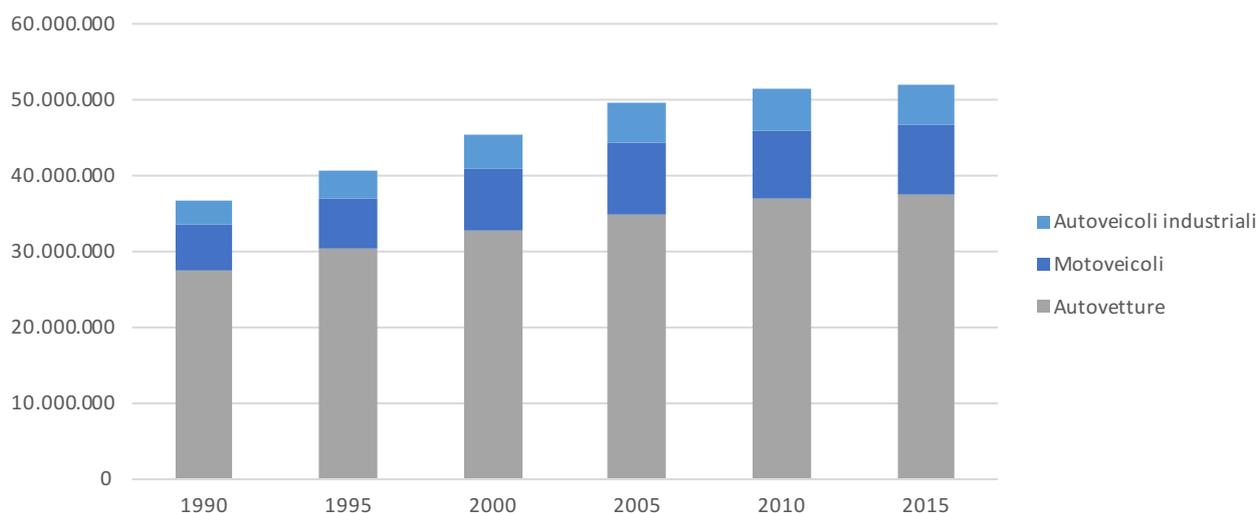
Figura 4. Autovetture circolanti in Italia: dettaglio regionale (veicoli/km)



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati ACI e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Dal 1990 al 2015, il numero complessivo di veicoli è passato da 36,5 milioni a quasi 52 milioni (+42%), di cui il 72% autovetture (38 milioni), il 18% motoveicoli ed il restante 10% dagli autoveicoli industriali (autobus, autocarri e motrici).

Figura 5. Veicoli circolanti in Italia, anni 1990-2015



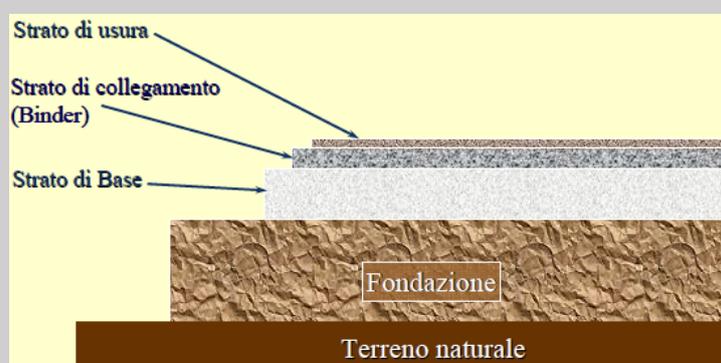
Fonte: Elaborazione Fondazione su dati del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Caratteristiche delle pavimentazioni stradali moderne

Le pavimentazioni stradali hanno la funzione di sopportare le azioni indotte dal traffico e di garantire condizioni di sicurezza e confort agli utenti. A questo scopo, la loro struttura deve garantire caratteristiche superficiali di planarità e aderenza, consentire di dissipare in profondità gli sforzi e le pressioni trasmesse dalle ruote dei veicoli, per resistere il più a lungo possibile a un elevato numero di passaggi, nonché di proteggere la stabilità del piano viabile dal degrado causato dagli agenti atmosferici, ad esempio dalle infiltrazioni di acqua e dal gelo.

In generale, la struttura di una moderna pavimentazione stradale è formata da una successione di strati costituiti da materiali di caratteristiche fisiche e meccaniche diverse, scelti a seconda della funzione cui ogni strato assolve e del tipo di sollecitazione prevalente a cui sono sottoposti dai carichi di traffico.

Figura 6. Schema semplificato di una pavimentazione stradale



Fonte: web

Lo strato di fondazione è prevalentemente realizzato con miscele di aggregati petrografici (misto granulare), che possono essere legati o non legati a seconda delle caratteristiche di rigidità che si vogliono ottenere per la sovrastruttura. Sulla fondazione poggiano i cosiddetti strati di nero, ossia conglomerati bituminosi di diverso spessore e caratteristiche granulometriche a seconda degli inerti utilizzati.

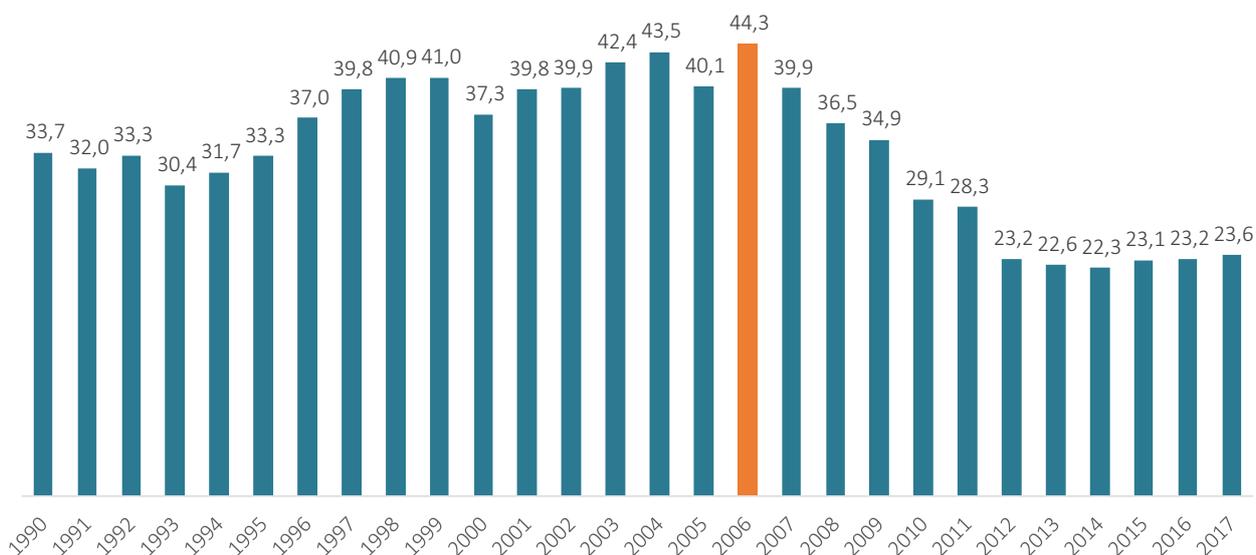
Le pavimentazioni stradali possono essere classificate come flessibili, semirigide, rigide o composite, a seconda dai materiali utilizzati negli strati e dell'ordine con cui sono disposti nella struttura. Nelle pavimentazioni *flessibili*, la fondazione è costituita da un misto granulare non legato che sostiene uno strato di base in conglomerato bituminoso o misto bitumato su cui poggiano lo strato di collegamento, o binder, e lo strato di usura, entrambi in conglomerato bituminoso. Lo stesso schema viene utilizzato anche per le pavimentazioni *semirigide*, indicate per forti volumi di traffico veicolare, con l'unica differenza che in queste è presente anche uno strato di sottobase in misto granulare cementato, che assicura una minor deformabilità della sovrastruttura. Le pavimentazioni *rigide* sono costituite da lastre in calcestruzzo, semplice, armato o precompresso, che poggiano su uno strato di fondazione in misto granulare stabilizzato o cementato. Le pavimentazioni composite sono pavimentazioni rigide ricoperte da uno strato di usura in conglomerato bituminoso.

1.2 La manutenzione delle strade asfaltate in Italia

Nel 2017, il consumo di conglomerati bituminosi nel settore strade in Italia risulta pari a 23,6 Mt, di cui circa l'83% relativo a conglomerati con bitume tal quale e il 17% a conglomerati con bitumi modificati. Rispetto al 2006, anno di picco di produzione e consumo, la riduzione risulta pari al 46,6%, prevalentemente associata al crollo della domanda di conglomerati con bitumi tradizionali, che passano da 39,9 Mt a 19,7 Mt (-50,6%), mentre la quota dei conglomerati con bitumi modificati subisce una flessione più contenuta passando da 4,4 a 4,0 Mt (-10%).

Il trend negativo registra una consistente riduzione proprio nel periodo della crisi economica a cavallo tra il 2008 e il 2012, in cui si passa da un consumo di oltre 36 milioni di tonnellate a poco più di 23 milioni di tonnellate (-38%), valore che rimane poi sostanzialmente costante anche negli anni successivi.

Figura 7. Consumo di conglomerati bituminosi in Italia dal 1990 al 2017 (milioni di tonnellate)



Fonte: ISPRA

Questi consumi comprendono anche una quota di conglomerato bituminoso da recupero, o *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*, ossia il fresato di asfalto recuperato da operazioni manutenzione delle pavimentazioni che, attraverso opportuni trattamenti, può essere riciclato nella produzione di nuovi conglomerati, sia a caldo che a freddo, o come materiale non legato per sottofondi e sottobasi.

Secondo il Siteb, allo stato attuale delle manutenzioni ordinarie e straordinarie effettuate sulle pavimentazioni stradali, ogni anno vengono generati circa 9 milioni di tonnellate di RAP. Ecocerved³, riporta una produzione media annuale di circa 6 milioni di tonnellate di "rifiuti da miscele

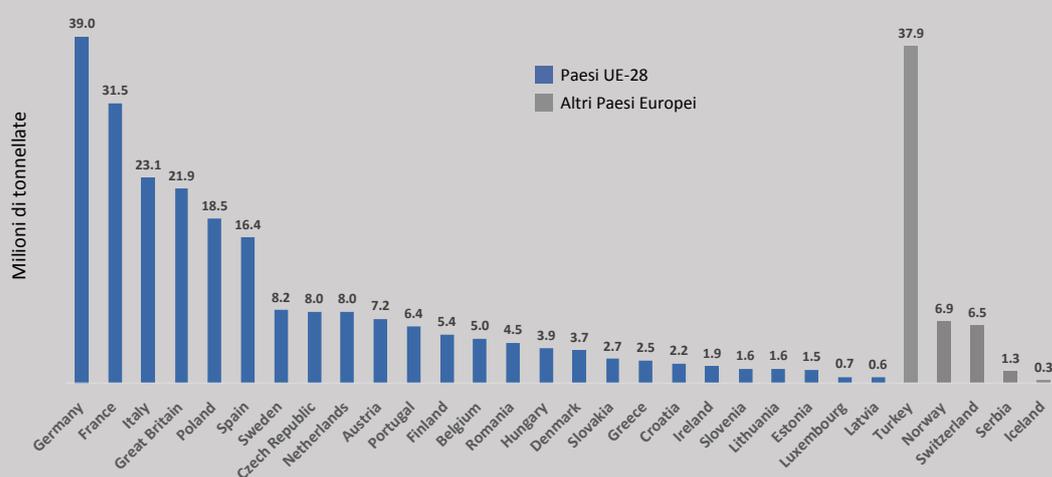
³ Italia del Riciclo, 2017

bituminose e catrami (codice CER 1703), un dato che si discosta da quello pubblicato dal Siteb in quanto estrapolato dai MUD per i rifiuti inerti e, quindi, riferito alle sole imprese che hanno l'obbligo di presentazione di tale documentazione⁴.

Consumo conglomerati bituminosi in Europa

Secondo EAPA⁵, nel 2015 la produzione e consumo di conglomerati bituminosi in Europa ammontava a 279 milioni di tonnellate, di cui 226 Mt consumate nei Paesi UE28. Del totale, il 67% dei consumi riguardano sette Paesi, nell'ordine la Germania (39 Mt), la Turchia (38 Mt), la Francia (32,5 Mt), l'Italia (23 Mt), Il Regno Unito (22 Mt), la Polonia (18,5 Mt) e la Spagna (16,5 Mt).

Figura 8. Consumo di conglomerati bituminosi in Europa nel 2015



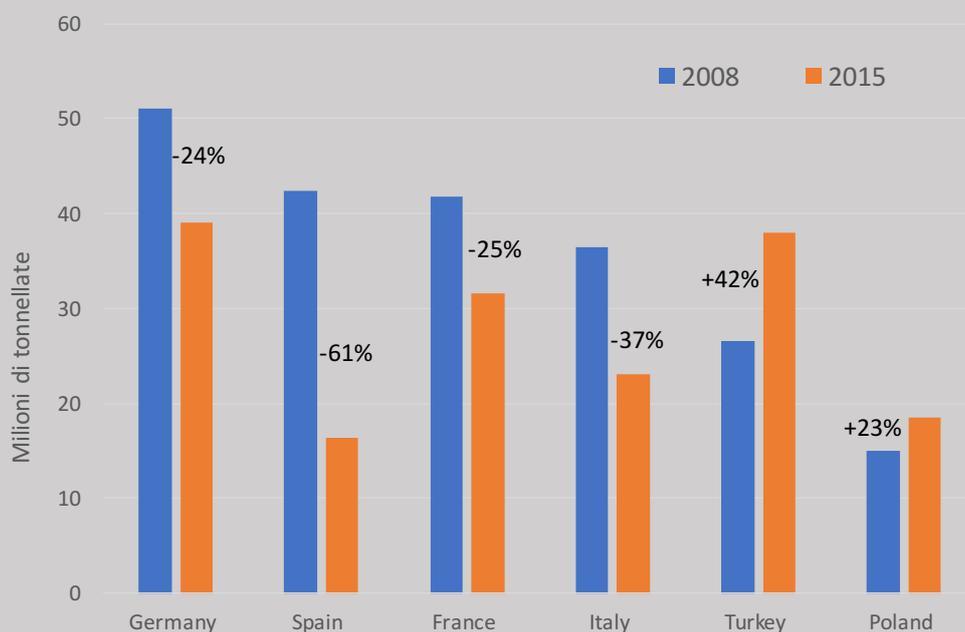
Fonte: EAPA

Rispetto al 2008, il consumo complessivo di conglomerati bituminosi in Europa è diminuito di oltre il 17% passando da 338 a 279 milioni di tonnellate, soprattutto a causa di un trend negativo che ha investito quasi tutta l'area dei Paesi della UE28, in cui i consumi sono passati da 300 a 226 Mt (-25%). In questa classifica, infatti la Turchia risulta incrementare i propri consumi di conglomerati, passando dalle 26,6 Mt del 2008 alle 37,9 Mt del 2015 (+42%), mentre la maggior parte dei Paesi della UE-28 più significativi in termini di consumi registrano un trend negativo: Spagna -26 Mt (-61%); Italia -13,4 Mt (-37%); Germania -12 Mt (-24%), Francia -10,3 Mt (-25%).

⁴ Il dato è estrapolato dai MUD per i rifiuti inerti ed è quindi riferito alle imprese che hanno l'obbligo di presentazione del MUD. Si ricorda che sono esonerati da tale obbligo, per i soli rifiuti non pericolosi, le imprese e gli enti produttori iniziali che non hanno più di dieci dipendenti. Il fresato di asfalto è identificato dal codice CER 170302 "miscele bituminose" ed un rifiuto non pericoloso, per cui le imprese che lo producono non hanno l'obbligo del MUD, poiché trattasi anche generalmente di piccole imprese con meno di 10 dipendenti. Si fa presente inoltre, che una parte consistente di rifiuti di fresato di asfalto è stoccata a fine anno per essere successivamente utilizzata in attività di recupero.

⁵ "Asphalt in Figures", EAPA, 2015

Figura 11. Variazioni di consumo di conglomerati bituminosi per i più significativi Paesi Europei (2008-2015)



Fonte EAPA

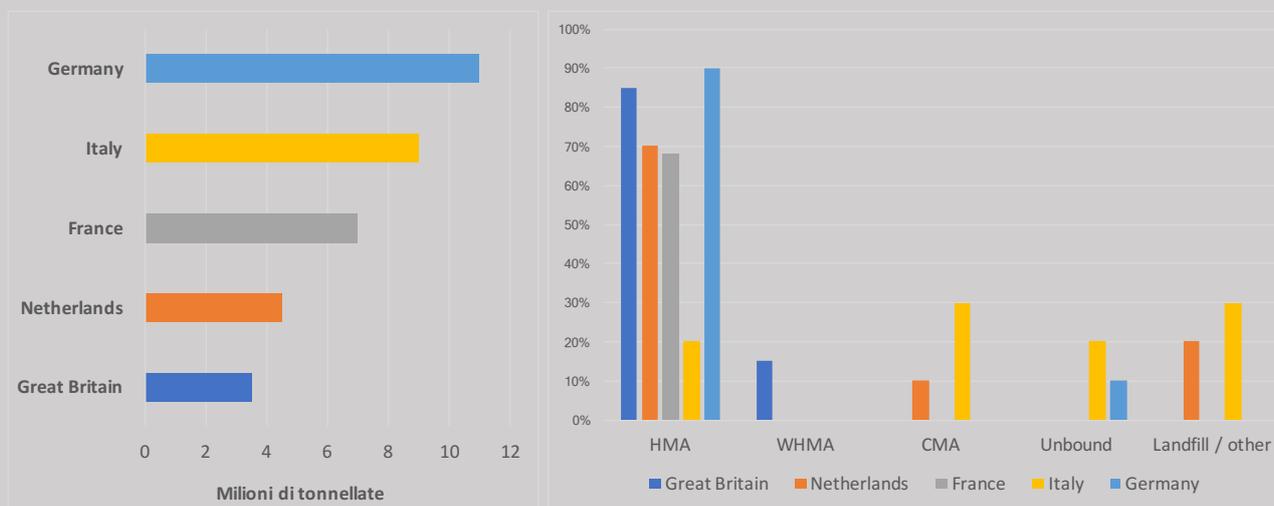
In questi consumi sono comprese anche le quote di conglomerati bituminosi riciclati (o Reclaimed Asphalt Pavement, RAP), ossia la parte di “fresato di asfalto” rimosso da una pavimentazione riutilizzato tal quale negli strati non legati o, come opzione a maggior valore aggiunto, reimmesso nel ciclo produttivo di nuovi conglomerati bituminosi per la stesa degli strati di nero con tecnologie a caldo (Hot Mix Asphalt, HMA), a temperature ridotte (Warm Mix Asphalt, WMA e Half Warm Mix Asphalt, HWMA) e a freddo (CMA).

Dai dati pubblicati da EAPA, al 2015, 23 Paesi Europei hanno prodotto un totale di circa 47 milioni di tonnellate di RAP, di cui il 70% in soli cinque Paesi: Germania (11 Mt), Italia (9 Mt), Francia (7 Mt), Olanda (4,5 Mt), Gran Bretagna (3,5 Mt).

Rispetto al riciclo, dalle statistiche EAPA risulta che in Germania il 90% del fresato è riciclato nella produzione di nuovi conglomerati con tecnologia HMA e il 10% viene utilizzato come materiale non legato (sottofondi e sottobasi). In Gran Bretagna l'85% del fresato è riciclato per la produzione di conglomerati bituminosi a caldo (HMA e WMA senza specificare) e il 15% viene riciclato in conglomerati a freddo (CMA). In Francia il 68% è riciclato a caldo con tecnica HMA e per la rimanente parte non è specificato il tipo di riciclo/smaltimento. In Olanda il 70% è riciclato a caldo HMA, il 10% a freddo e il 20% è smaltito in discarica.

Per l'Italia, le statistiche EAPA fotografano una situazione che vede il riciclo dei fresati per la produzione di nuovi conglomerati a caldo intorno al 20% del totale fresato prodotto, mentre il 30% viene riciclato a freddo, prevalentemente in sottofondi stabilizzati a cemento. Un ulteriore 20% è riciclato come materiale non legato nelle fondazioni e il rimanente 30% viene stoccato in attesa di utilizzo.

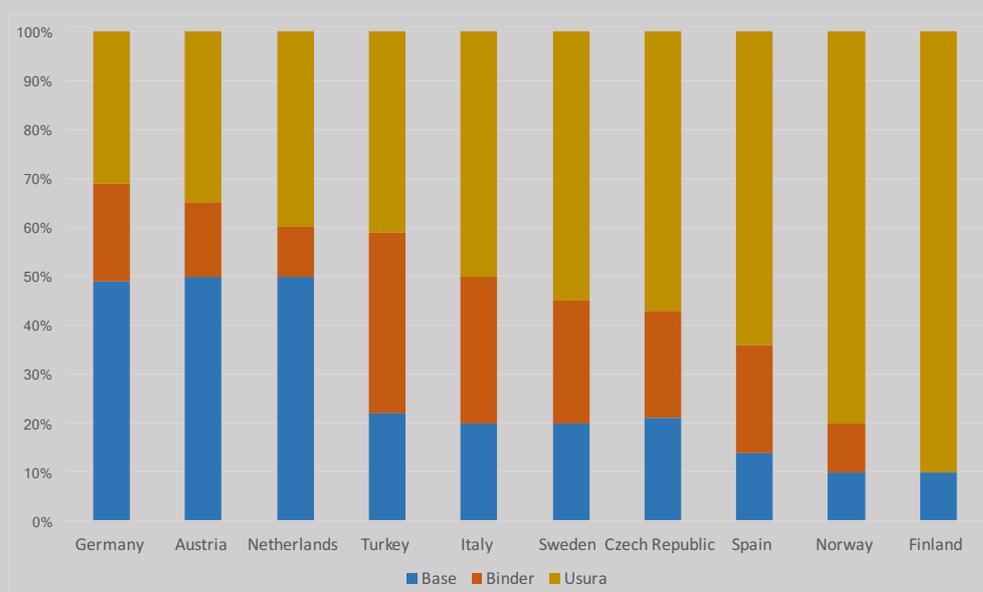
Figura 12. Produzione di RAP e ripartizione del riutilizzo nei principali Paesi europei nel 2015



Fonte: EAPA

Per quel che riguarda l'utilizzo dei conglomerati nei diversi strati di pavimentazione, i dati pubblicati da EAPA evidenziano una grande variabilità. Limitando lo sguardo ai principali Paesi consumatori per cui risultano disponibili i dati di dettaglio, in Germania, così come in Austria e Olanda, la maggior percentuale di utilizzo ha riguardato interventi sugli strati di base, mentre negli altri Paesi la maggior percentuale è stata utilizzata per la stesa di strati di usura e di binder.

Figura 13. Ripartizione dell'utilizzo di conglomerati negli strati di nero delle pavimentazioni in Europa nel 2015



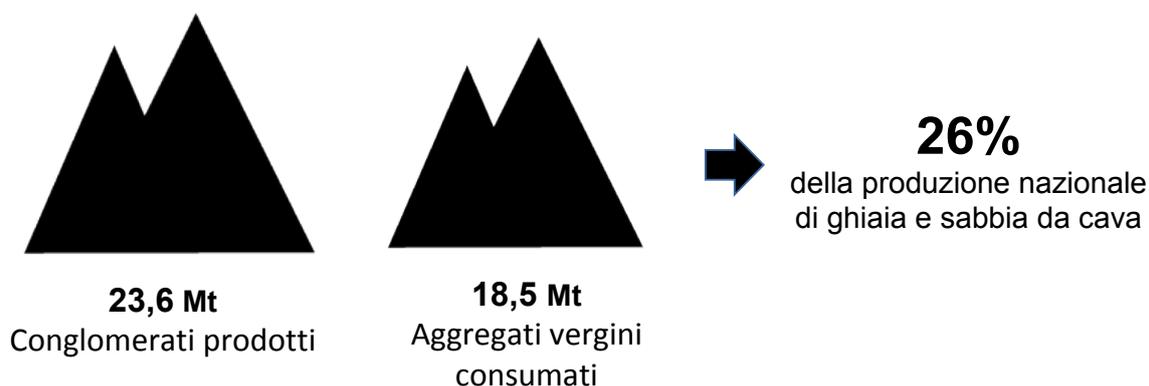
Fonte: Elaborazione fondazione su dati EAPA

1.3 Consumo di risorse e emissioni inquinanti dalla manutenzione degli asfalti in Italia

I conglomerati bituminosi sono una miscela complessa di bitume industriale, inerti vergini e da riciclo, e altri materiali (filler, additivi chimici, polimeri modificanti, ecc.). Gli aggregati inerti rappresentano la maggior proporzione in peso della miscela (90% circa), mentre il contributo di bitume varia dal 4% al 7%, quello dei filler dal 3% al 10% e quello degli additivi, se presenti, arriva a circa il 2%.

Rispetto a questa composizione media, al netto della quota di riutilizzo del fresato d'asfalto⁶ la produzione dei 23,6 milioni di tonnellate di conglomerati in Italia nel 2017 ha riguardato circa 18,5 milioni di tonnellate di aggregati vergini, che rappresentano poco meno del 30% della produzione nazionale di ghiaia e sabbia da cava del 2014 (pari a 68,5 Mt, ultimo dato ufficiale reso disponibile da ISPRA).

Figura 14. Produzione di conglomerati e consumo di aggregati vergini nel 2017



Fonte: elaborazione Fondazione su dati Siteb e Ispra

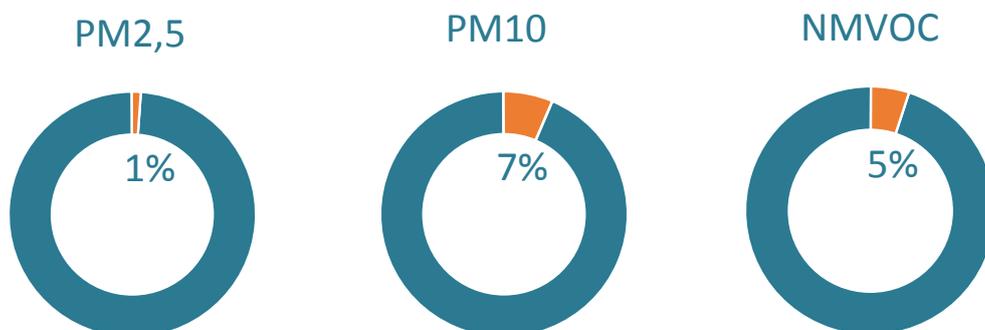
Secondo i dati dell'Inventario ISPRA, nel 2016 in Italia le emissioni di particolato associate alle fasi di produzione e stesa dei conglomerati⁷ (*road paving whit asphalt*) ammontano a 239 t di PM_{2,5} e 1.750 t di PM₁₀, rispettivamente pari all'1,2% e al 7% delle emissioni di particolato del settore trasporto stradale. Le emissioni di NMVOC (composti organici volatili non metanici) sono pari a

⁶ La quantità di conglomerati bituminosi riciclati ogni anno è stimata variabile in un intervallo tra il 15% e il 30% del totale dei conglomerati prodotti a livello nazionale.

⁷ La statistica riguarda tre tipologie di emissione: 1) **emissioni convogliate di impianto**: prodotte durante le fasi "essiccazione" degli inerti e di preparazione della miscela con bitume, caratterizzate da punti di emissione ben definiti e con VLE (valori limiti di emissione) specifici della tecnologia di produzione dei conglomerati bituminosi. 2) **emissioni diffuse in impianto**: prodotte durante le fasi di "carico/scarico materiali" e altre fasi "accessorie al funzionamento dell'intero lay-out impiantistico" prive di un punto specifico di misurazione ma "riducibili" ricorrendo all'adozione di particolari soluzioni di abbattimento studiate appositamente in base alla causa che le produce. 3) **emissioni diffuse di stesa**: prodotte nelle fasi di stesa della pavimentazione in cantiere.

6.310 t, il 5,2% del settore trasporto su strada e il 3,2% delle emissioni della categoria solventi (uso di solventi domestici, fungicidi, sgrassatori e altri prodotti chimici).

Figura 15. Quota delle emissioni per produzione e uso di conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali sul totale emissioni del trasporto stradale nel 2016



Fonte: Ispra

Emissioni generate dal traffico veicolare

Negli ultimi anni molti lavori hanno preso in considerazione le emissioni di particolato generate dal traffico veicolare (*road dust*). Tra le molteplici potenziali cause di tali emissioni è riportato anche il rilascio di particolato proveniente dall'usura del manto stradale (automobile road abrasion).

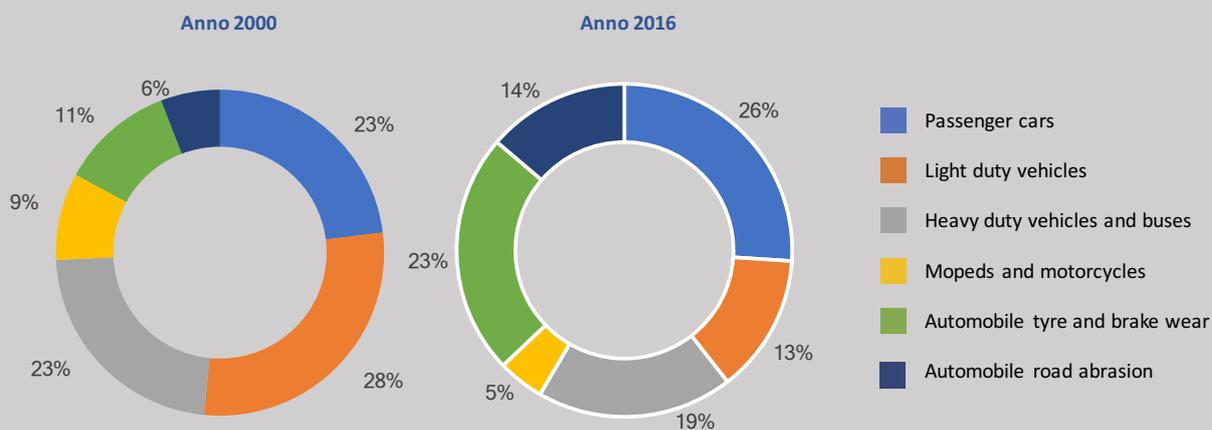
Il traffico veicolare è responsabile dell'introduzione in atmosfera di particelle generate da processi combustivi, connessi direttamente ai gas di scarico dei veicoli, ma anche da processi non combustivi, come l'abrasione meccanica di freni, copertoni ed asfalto ed il risollevarsi di polvere precedentemente depositata sulle strade. Il contributo non combustivo da abrasione e risollevarsi risulta estremamente difficile da quantificare a causa proprio del fatto che le polveri emesse in atmosfera sono costituite da diverse componenti (frammenti microscopici derivanti dall'usura di pneumatici, di asfalto e di componenti dell'impianto frenante delle vetture, polvere depositata su strada).

La progressiva diminuzione delle emissioni dal tubo di scarico, fa sì che il contributo delle emissioni di particolato da traffico veicolare non motoristiche (*non-exhaust*) ma da usura, in particolare di freni e pneumatici, stia diventando percentualmente via via più importante in conseguenza dell'incremento delle percorrenze complessive. Secondo i dati dell'inventario ISPRA nel 2016 le emissioni di PM2,5 per usura di pneumatici e freni delle automobili sono pari ad oltre 4.500 t (il 23% di tutto il settore trasporto su strada), per abrasione del manto stradale oltre 2.600 t (il 14% di tutto il settore trasporto su strada); nel 2000 la quota era rispettivamente dell'11% e del 6% delle emissioni del settore. A livello nazionale le emissioni non exhaust sono pari al 4% delle emissioni nazionali di PM2,5, anche se si deve considerare che tali emissioni sono affette da una incertezza più elevata delle emissioni allo scarico.

Una riprova dell'importanza delle emissioni da traffico non-exhaust può essere ottenuta dagli studi di source *apportionment* basati sulla caratterizzazione chimico-fisica degli elementi rapportabili in modo più o meno specifico alla sorgente di emissione. Tali studi confermano il ruolo non trascurabile della sorgente emissiva di abrasione.

Uno studio del Parlamento europeo del 2014 “*EU road surfaces: economic and safety impact of the lack of regular road maintenance*” riporta che una superficie stradale ben mantenuta riduce il tasso di deterioramento degli pneumatici e anche il consumo di carburante.

Figura 16. Emissioni di Pm2,5 nel trasporto stradale, 2000-2016



Fonte: Ispra

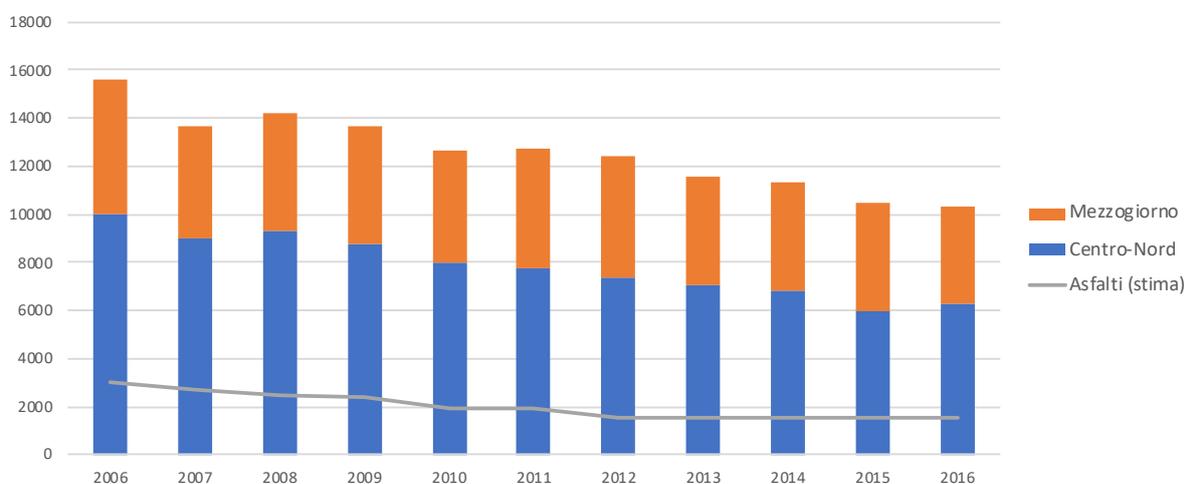
1.4 La dimensione economica del comparto degli asfalti

Il numero di buche nelle strade è spesso un indicatore utile per valutare il buon governo di una Pubblica Amministrazione (PA). La cattiva manutenzione del manto stradale ha delle conseguenze non solo sulla sicurezza degli automobilisti, ma anche sul decoro della città. Mantenere la città curata, con infrastrutture funzionali e strade non dissestate ha un costo.

Secondo i dati dell’Agenzia per la Coesione Territoriale (Conti pubblici territoriali⁸) nel 2016 le amministrazioni pubbliche e le imprese pubbliche nazionali e locali hanno speso oltre 10 miliardi di euro per la viabilità stradale. Nella voce di spesa “viabilità” non rientrano solo i costi dell’asfalto per riparare le buche, ma sono compresi tutti gli interventi infrastrutturali necessari per migliorare la mobilità urbana, non solo per le automobili: rotonde, ponti, strade, ma anche piste ciclabili e aree pedonali. Anche la spesa per l’arredo urbano strumentale alla circolazione stradale è compresa nel computo: semafori, cartelli stradali, illuminazione e i servizi connessi in generale alla gestione della viabilità.

⁸ La banca dati Conti Pubblici Territoriali (CPT) sviluppa dati finanziari di cassa: la ricostruzione dei flussi di spesa è effettuata sulla base dei bilanci consuntivi degli enti, tenendo conto cioè dei dati definitivi relativi a spese effettivamente realizzate. Ciascun ente viene considerato, attraverso l’eliminazione dei flussi intercorrenti tra le varie tipologie di soggetti, quindi attraverso un processo di consolidamento degli stessi, quale erogatore di spesa finale.

Figura 17 - Spesa per la viabilità in Italia dal 2006 al 2016 (milioni di euro)⁹



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Agenzia per la Coesione Territoriale

Nel 2016 oltre il 60% della spesa, 6,5 miliardi, è attribuito alle amministrazioni locali (Province e Comuni), il 26% alle amministrazioni centrali (Stato e ANAS) e l'11% alle amministrazioni regionali.

Negli ultimi 10 anni, tra il 2006 e il 2016, la spesa totale per la viabilità è diminuita del 34% (passando da 267 a 173 euro pro capite). In particolare, gli investimenti pubblici nel settore si sono dimezzati: nel 2006 la PA aveva investito 11,2 miliardi per la gestione delle strade (4,3 miliardi di spesa corrente), nel 2016 gli investimenti per la manutenzione delle strade sono stati pari a 5,7 miliardi (4,6 miliardi di spesa corrente). La spesa in conto capitale delle regioni del centro e nord Italia passa da 7,2 a 3,1 miliardi di euro (-57% in 10 anni), quella del Mezzogiorno da 4 a 2,5 miliardi (-37%).

Secondo l'ANAS, per la manutenzione straordinaria (messa in sicurezza e miglioramento) della rete stradale nazionale (circa 26 mila km) servirebbero 2,5 miliardi di euro di investimenti all'anno. Il Piano 2016-2020 della società nazionale delle strade (23,5 miliardi di euro) prevede manutenzioni per 1,04 miliardi di euro in media all'anno. La spesa effettiva ad oggi è stata di 450 milioni di euro nel 2016, e 5-600 milioni nel 2017 (dato provvisorio).

Il valore della rete stradale nazionale

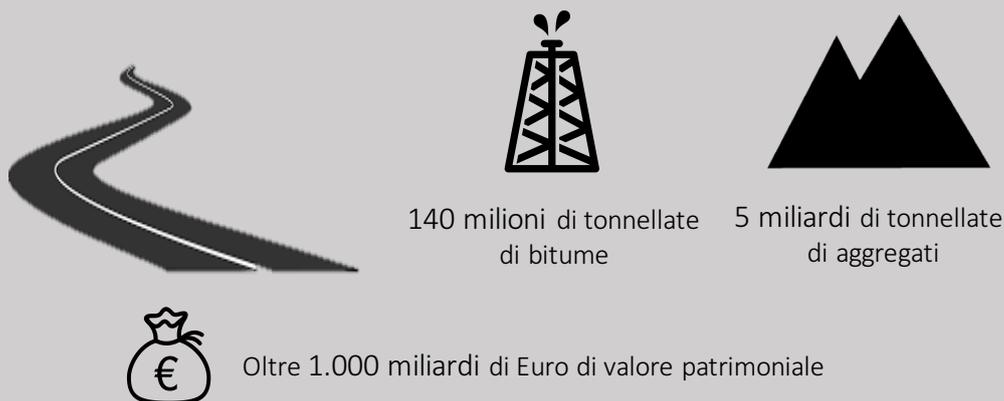
Mediamente il piano viario di una autostrada a tre corsie è largo 30 metri e la sua sovrastruttura si sviluppa in profondità per circa 80 centimetri. Le strade statali e regionali hanno una larghezza media di 18 metri con uno sviluppo in profondità di circa 40 centimetri, così come quelle provinciali, che sono larghe 12

⁹ il valore economico della quota di spesa per la viabilità destinata alla manutenzione delle pavimentazioni è stimato sulla base di una media di prezzi per la posa dei tre strati separatamente a partire dai prezziari regionali per una estensione degli interventi di manutenzione stimata a partire dal consumo di conglomerati in riferimento a una strada di 10 metri di larghezza con uno sviluppo in profondità variabile tra 20 cm e 30 cm, opportunamente ripartiti nei tre strati di nero, considerando un utilizzo dei conglomerati per il 50% allocata al rifacimento dell'usura, al 30% del binder e al 20% della base (rif. statistiche EAPA, 2015).

metri, mentre quelle comunali, la cui larghezza media è di circa 9 metri, si sviluppano in profondità per circa 30 centimetri.

A partire da questi parametri medi, e con riferimento al costo medio per metro quadrato e per centimetro di profondità, differenziato per le diverse tipologie di strati componenti, in una pubblicazione del 2012 il Siteb ha stimato il valore del patrimonio della sovrastruttura della rete di strade italiane in oltre 1.000 miliardi di Euro¹⁰.

Figura 18 - Il patrimonio delle strade in Italia



Fonte: elaborazione Fondazione su dati Siteb

Ma a quanto ammonta questo patrimonio in termini di risorse naturali impiegate? Mutuando il metodo di calcolo e i parametri geometrici e strutturali adottati dal Siteb per la valutazione economica, e considerando il peso specifico medio dei conglomerati compattati e del pietrisco che compone gli strati stabilizzati, risulta un valore di oltre 5 miliardi di tonnellate di materiali, di cui circa 140 milioni di tonnellate di bitumi e per la rimanente parte di aggregati di varia natura. Tradotto in altri termini, si tratta dell'equivalente di 44 mila piscine olimpioniche piene di bitume e di un cumulo di rocce da scavo pari circa 17 volte il volume della parte sporgente del monte Cervino¹¹.

Questo importante patrimonio deve essere efficientemente mantenuto in opera il più a lungo possibile, evitando di disperderne il valore facendo mancare la dovuta manutenzione. Senza manutenzione, infatti, le pavimentazioni stradali si degradano via via più velocemente con il passare del tempo, richiedendo interventi di ricostruzione anticipati, ogni 10-15 anni, rispetto alla potenziale vita utile di 20 anni e oltre.

Inoltre, in condizioni di abbandono o senza una efficace programmazione della manutenzione, dopo pochi anni il decadimento delle strade diventano pericolose: secondo diversi studi, l'ammaloramento delle pavimentazioni (levigatura, disgregazione, ormaimenti, fessurazioni, ondulazioni, rigonfiamenti, ecc.) è un fattore rilevante per l'incidentalità stradale¹².

¹⁰ "Il valore delle nostre strade", C. Giavarini, Rassegna del Bitume, nr. 72, 2012.

¹¹ Stima del volume di una piramide a base quadrata con prominenza di 1.000 m e un angolo di pendenza di 30 gradi.

¹² Haryati Yaacob et al. / Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 78: 7-2 (2016) 75-82; "Effects of Pavement Surface Conditions on Traffic Crash Severity", J. Lee et al., Journal of Transportation Engineering, October 2015; "Road "Surface Characteristics and Crash Occurrence: A Literature Review", Austroads Inc. 2008; "The handbook of Highway Engineering", 2006.

In una strada fatta a regola d'arte¹³, il monitoraggio periodico del suo stato di "salute" e la programmazione di interventi di manutenzione consentono di allungare la vita utile dello strato superficiale e di ridurre il degrado degli strati più profondi, procrastinando i tempi di intervento strutturali e consentendo un risparmio economico e di risorse nel tempo.

A parte qualche eccezione, la rete viaria del nostro Paese, è caratterizzata da un forte stato di degrado i cui fattori sono riconducibili da un lato all'inadeguatezza di buona parte delle stesse infrastrutture, progettate molti anni or sono e non più idonee a sopportare l'incrementato traffico veicolare attuale, sia in termini di entità che di composizione¹⁴, e dall'altro all'inadeguatezza dell'allocazione delle risorse economiche necessarie alla manutenzione, ordinaria e straordinaria, come si può evincere dall'andamento della domanda di bitumi e conglomerati nel corso dell'ultimo decennio.

¹³ Il concetto di "regola d'arte" nelle opere di ingegneria civile si riferisce al complesso di regole tecniche cui attenersi al fine di assicurare uno standard minimo di accettabilità di un prodotto, in termini di durabilità, affidabilità e sicurezza, dove per prodotto si intende sia un manufatto, sia il risultato di una attività intellettuale, quale ad esempio un progetto.

¹⁴ In Italia il traffico pesante per le merci è quasi tutto su gomma, il che sottopone le pavimentazioni a forti sollecitazioni accelerandone l'obsolescenza.

2 Tecnologie e opportunità di circolarità nel settore delle strade

2.1 I vantaggi della circolarità

Tra i principali driver di una economia circolare, l'allungamento del ciclo di vita dei prodotti, insieme all'opportunità di riciclarne i materiali componenti a fine vita, sono certamente quelli che determinano i maggiori vantaggi ambientali. Prodotti durabili, riutilizzabili e completamente riciclabili, consentono infatti di ridurre l'estrazione di nuove risorse vergini e di conservare buona parte dell'energia in essi contenuta, ossia quella già consumata nelle fasi di trasformazione da materiali grezzi a semilavorati o prodotti finiti. Per fare un semplice esempio concreto, basti pensare all'alluminio, la cui produzione dal riciclo di rottami richiede solo il 4% dell'energia complessivamente necessaria alla sua produzione da bauxite, un minerale che deve innanzitutto essere escavato, prevalentemente in miniere a cielo aperto, per poi essere trattato con soda caustica concentrata a caldo per produrre idrossido di alluminio da cui estrarre il metallo, ad esempio per via elettrolitica.

Ciò è più che mai vero nel settore della costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali, dato il grande consumo di risorse naturali e di energia necessari, per cui la durata delle pavimentazioni, l'utilizzo di materiali riciclati e la temperatura di produzione e stesa dei conglomerati sono tre aspetti chiave in direzione di una maggiore sostenibilità del settore. Basti pensare che per la stesa dei soli strati di nero di un chilometro di strada a una carreggiata con una larghezza media di 10 metri, sono necessari fino a 8.000 tonnellate di conglomerato bituminoso¹⁵ (ca. 300 tonnellate di bitume e 7700 tonnellate di inerti), una quantità corrispondente a 270 camion rimorchio a pieno carico. E che l'energia necessaria alla produzione di questo quantitativo di conglomerato come Hot Mix Asphalt tradizionale a 160 °C¹⁶, ammonta a circa 2,4 TJ, equivalente al consumo medio annuo di energia elettrica di 600 cittadini italiani¹⁷.

Senza la pretesa di essere esaustivi, nel seguito del capitolo vengono sinteticamente presentate le principali innovazioni tecnologiche già oggi disponibili che, se opportunamente considerate in un quadro progettuale coerente, offrono l'opportunità di realizzare strade ad elevata durabilità, utilizzando materiali di recupero e ricorrendo a tecnologie di produzione e stesa dei conglomerati a basse temperature, se non a freddo.

¹⁵ Valore variabile a seconda della profondità degli strati bituminosi presa in considerazione.

¹⁶ Stima effettuata sulla base dei dati pubblicati nell'articolo "Eco-profilo dell'asfalto", di Carlo Giavarini, Università la Sapienza di Roma, Rassegna del Bitume 58/08

¹⁷ Stima basata sul consumo medio di energia elettrica ad uso domestico per abitante in Italia, dati statistici Terna, 2017.

2.2 Tecnologie per la produzione e stesa di pavimentazioni a temperature ridotte

I conglomerati bituminosi, che costituiscono la parte preponderante di una pavimentazione stradale, sono miscele composte prevalentemente da aggregati inerti (ghiaia e sabbia) e da un legante di matrice bituminosa, che grazie alle sue proprietà reologiche conferisce all'amalgama finale le caratteristiche idonee a essere utilizzata come elemento strutturale di una pavimentazione stradale. Nella preparazione di conglomerati, gli inerti granulari vengono rivestiti da una sottile pellicola di materiale legante che ne favorisce l'adesione reciproca al fine di formare una miscela legata, appunto, che una volta stesa e adeguatamente compattata restituisce alla pavimentazione le dovute caratteristiche strutturali di resistenza ai carichi di traffico, nonché di protezione degli strati profondi all'azione dell'acqua. In questo meccanismo, la viscosità del bitume gioca un ruolo fondamentale al fine di ottenere un rivestimento ottimale degli aggregati con una pellicola uniforme di materiale.

Il bitume

Il bitume si presenta in uno stato solido-fragile a basse temperatura, in uno stato solido-semisolido a temperatura ambiente, e in stato liquido a temperature elevate. Il bitume industriale è derivato dalle frazioni di fondo della distillazione sottovuoto del petrolio con una composizione chimica complessa di composti organici ad alto peso molecolare attribuibili a due classi: gli asfalteni e i malteni. Gli asfalteni sono miscele di idrocarburi aromatici contenenti eteroatomi quali zolfo, azoto, ossigeno, e sono presenti nel bitume in concentrazione variabile dal 5% al 25%, mentre i malteni, che rappresentano la maggior quota di composti di un bitume, sono una miscela di idrocarburi alifatici, resine e oli.

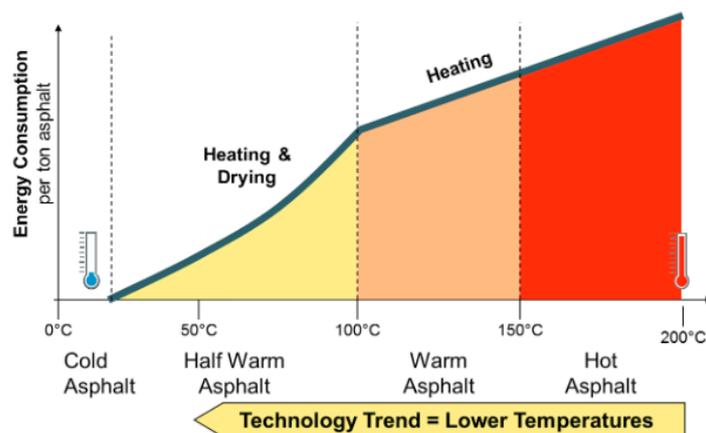
Il comportamento meccanico del bitume è influenzato dalla concentrazione relativa di questi composti. In particolare, gli asfalteni gli conferiscono consistenza, resistenza alle sollecitazioni meccaniche lo rendono adesivo, mentre l'azione delle resine malteniche e degli oli lo rendono elastico, fluido e scorrevole a caldo.

Per questo il bitume è classificato come un materiale viscoelastico-termoplastico, ossia che reagisce con comportamento elastico alle deformazioni indotte da brevi tempi di carico, con un comportamento viscoso alle forze indotte da carichi prolungati, e aumenta la sua lavorabilità sotto l'azione del calore.

Le tecniche di produzione dei conglomerati bituminosi possono essere classificate a seconda della temperatura di preparazione delle miscele, e in particolare:

- miscele calde o **Hot Mix Asphalt** (HMA) prodotte in un intervallo di temperature comprese tra 150 °C e 190 °C;
- miscele tiepide o **Warm Mix Asphalt** (WMA) prodotte a temperature comprese tra 100 °C e 150 °C) e miscele semi-tiepide o **Half Warm Mix Asphalt** (HWMA) prodotte a temperature comprese tra 70 °C e 100 °C);
- miscele fredde o **Cold Mix Asphalt** (CMA) prodotte a temperatura ambiente.

Figura 19 - Classificazione delle tecniche di produzione dei conglomerati a seconda delle temperature di produzione e indicazione di massima dei vantaggi di risparmio energetico associati



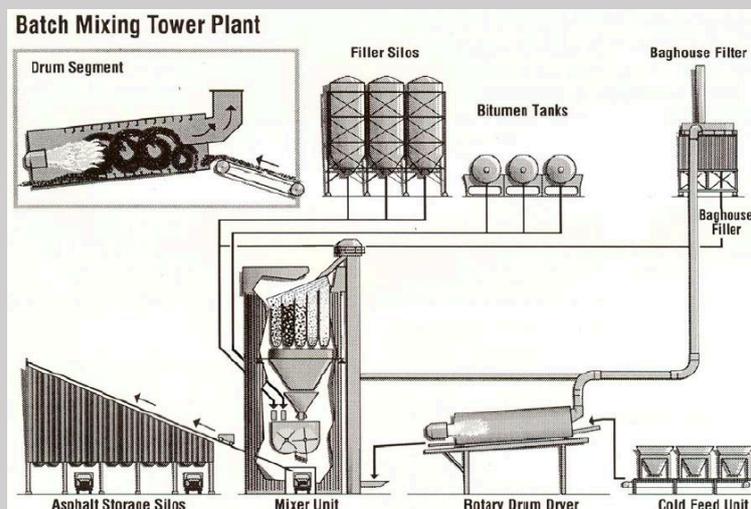
Fonte: EAPA

Diversamente dalle preparazioni HMA, adatte a qualsiasi tipologia di bitumi, le preparazioni a temperature ridotte, WMA e CMA, che garantiscono minori consumi diretti di energia e di emissioni di inquinanti nocivi, richiedono tecnologie innovative che consentono di ridurre la viscosità del legante bituminoso a parità di temperatura.

Schema tipico di un impianto di produzione di conglomerati bituminosi HMA

Data la loro flessibilità di utilizzo e le prestazioni di produzione, a livello europeo la tipologia di impianti di produzione di conglomerati bituminosi con tecnologia HMA più utilizzati sono di tipo discontinuo. Si tratta di impianti altamente automatizzati in cui tutte le operazioni di caricamento e miscelazione dei materiali sono controllate in remoto da una cabina di comando.

Figura 20 - Schema di impianto HMA discontinuo tradizionale



Fonte: EAPA

In questi impianti, gli aggregati grezzi utilizzati per la produzione dei conglomerati, solitamente stoccati nei pressi o direttamente nel sito d'impianto, vengono prelevati e immessi in opportune tramogge dosatrici che alimentano l'essiccatore in funzione delle curve granulometriche richieste per la produzione.

Nell'essiccatore, un tamburo rotante posizionato inclinato e dotato di apposite palettature interne che consentono l'avanzamento degli inerti in controcorrente rispetto alla fiamma del bruciatore, gli aggregati inerti vengono asciugati e riscaldati a elevate temperature. Il vapore acqueo e i fumi di scarico generati nel processo vengono aspirati all'estremità fredda del tamburo e condotti attraverso un separatore di polveri con filtri a manica, prima di essere rilasciati puliti in atmosfera attraverso un camino di opportuna altezza. Date le loro caratteristiche, le polveri separate vengono riutilizzate nel ciclo produttivo insieme agli altri materiali filler.

Al termine del processo di essiccazione, gli aggregati caldi vengono convogliati nella parte superiore della torre di miscelazione e separati a seconda della loro granulometria per mezzo di setacci vibranti, in modo da consentirne un utilizzo in base alla ricetta di produzione del conglomerato desiderata. A seconda del tipo di conglomerato desiderato, gli aggregati vengono convogliati al miscelatore dove vengono ricoperti da bitume caldo, a sua volta pompato nel mixer direttamente dai serbatoi di stoccaggio riscaldati. Sempre in questa fase, viene aggiunta anche una specifica quantità di filler, prelevata dai silos di stoccaggio.

Dopo un tempo di miscelazione variabile da 25 a 90 secondi, a seconda dell'impianto e del tipo di miscela, il conglomerato finito viene trasferito direttamente su camion in attesa per la consegna immediata al cantiere o, tramite un convogliatore, verso i silos riscaldati per lo stoccaggio temporaneo.

La riduzione della temperatura di produzione (WMA e CMA) dei conglomerati bituminosi è il risultato degli sviluppi della ricerca nell'ambito della chimica dei bitumi, per consentire di modularne la viscosità e, di conseguenza, favorirne la lavorabilità a temperature inferiori rispetto a quelle dei tradizionali processi di preparazione HMA, e finanche a freddo¹⁸. In generale, tali tecnologie si differenziano per la modalità di preparazione e additivazione dei leganti, e possono essere suddivise in tre categorie:

- bitumi e conglomerati bituminosi additivati
- bitumi schiumati
- emulsioni bituminose

In tutti i casi, si tratta di tecnologie che permettono anche il riciclaggio di conglomerato bituminoso di recupero, con l'opportunità di aggiungere al vantaggio di minori consumi di energia, quello di un recupero circolare in *closed-loop* (recupero nella stessa filiera e per lo stesso scopo) di un materiale ad elevato valore aggiunto.

¹⁸ "Conglomerati bituminosi a bassa energia. Lo stato dell'arte", Rassegna del bitume, 54, 2006

2.2.1 Bitumi e conglomerati bituminosi additivati

Le proprietà reologiche di un bitume possono essere modificate con l'utilizzo di diverse tecnologie che impiegano prodotti come:

- Materiali che apportano acqua per la schiumatura del bitume (zeoliti, sabbie umide, sali etc.)
- Additivi chimici di diversa natura (cere, liquidi amminici, etc.) che consentono di modificare la viscosità del bitume e/o la lavorabilità del conglomerato bituminoso

Lo scopo di tali processi produttivi è quello di conferire ai conglomerati bituminosi una lavorabilità tale da poter essere prodotti e posti in opera alle temperature caratteristiche dei WMA e CMA.

2.2.2 Bitumi schiumati

Nei bitumi schiumati, la riduzione della viscosità del bitume e la conseguente migliore capacità di miscelazione con gli aggregati a basse temperature, e finanche a freddo, si ottiene attraverso la modifica del suo stato fisico di utilizzo: non più sotto forma di liquido ma di schiuma con alto potere di dispersione e dotata di elevata superficie specifica. La schiumatura del bitume si ottiene mescolando acqua a temperatura ambiente al bitume caldo additivato con agenti schiumogeni: l'espansione di volume dell'acqua nel passaggio di stato da liquida a vapore, genera la schiuma che aumenta il volume del legante (fino a 15-20 volte) riducendo la viscosità della miscela. Questa tecnologia conferisce ai conglomerati bituminosi una lavorabilità tale da poter essere prodotti e posti in opera alle temperature caratteristiche dei WMA e CMA.

2.2.3 Emulsioni bituminose

La riduzione della viscosità del bitume per renderlo idoneo alla preparazione di conglomerati a basse temperature (CMA) può essere ottenuta attraverso la preparazione di emulsioni, soluzioni colloidali di bitume disperso in acqua. La preparazione di emulsioni bituminose avviene mediante l'utilizzo di bitume, prodotti chimici (quali agenti emulsionanti, stabilizzanti, attivanti di adesione, correttori di acidità, ecc.) e acqua, miscelati con l'ausilio di un mulino colloidale.

2.3 Tecnologie per migliorare le prestazioni delle pavimentazioni stradali

Le prestazioni meccaniche di una pavimentazione stradale, la sua resistenza a fenomeni di fessurazione, di ormaimento ecc., dipendono in larga parte dalle caratteristiche dei conglomerati bituminosi utilizzati, dalla scelta dei materiali costituenti e dalle modalità di produzione e posa in opera. Queste prestazioni possono essere sensibilmente migliorate, allungando il ciclo di vita della pavimentazione stessa e aumentandone contestualmente la resistenza ai carichi di traffico, con tecnologie di produzione dei conglomerati che prevedono l'impiego di bitumi modificati con polimeri, compound polimerici e fibre di varia natura, nelle miscele. Queste nuove tecnologie consentono di ottenere conglomerati che, pur conservando le proprietà leganti della fase bituminosa, ereditano le caratteristiche reologiche e prestazionali del polimero, ottenendo numerosi vantaggi in termini di opportunità di impiego:

- maggiore flessibilità alle basse temperature operative;
- maggiore consistenza alle alte temperature operative;
- maggiore ampiezza dell'intervallo di temperature di impiego;
- riduzione della suscettività termica;
- maggiore resistenza ai carichi e alla fatica;
- elevato recupero elastico;
- maggiore coesione ed adesione agli inerti lapidei;
- maggiore resistenza all'invecchiamento.

Queste tecnologie si possono raggruppare in due macro-categorie a seconda che i polimeri siano aggiunti in fase di preparazione del bitume (metodo wet), nel qual caso si parla di tecnologia *Polymer Modified Bitumen* –PMB- o che siano aggiunti in fase di preparazione del conglomerato bituminoso (metodo dry), come leganti di rinforzo in miscela, nel qual caso si parla di *Polymer Mixed Asphalt* –PMA-. L'origine di questi polimeri, che possono essere sia elastomerici (ad es. gomme) che plastomerici (plastiche), nonché delle fibre, può essere sia da materia prima vergine, ad esempio gomma naturale, che da materiali circolari open-loop, ossia materiali da riciclo dei rifiuti selezionati provenienti da altre filiere, come nel caso delle preparazioni con polverino di gomma derivato dal riciclo di pneumatici fuori uso o del polietilene derivato dal riciclo delle plastiche.

2.3.1 Bitumi modificati PMB

I bitumi modificati con polimeri, noti con la sigla internazionale PMB, sono ottenuti miscelando una opportuna base bituminosa e polimeri di natura elastomerica (ad esempio gomme SBS) o plastomerica (ad esempio EVA). I bitumi modificati sono prodotti a caldo in appositi impianti produttivi attraverso un processo nel quale si realizza una unica nuova fase omogena, con interazione chimico fisica fra il polimero e il bitume. Dal punto di vista prestazionale un bitume modificato con polimeri è un legante bituminoso che presenta comportamento reologico assimilabile a quello del polimero modificante utilizzato, avendo al contempo conservato le proprietà leganti originali. La quantità di polimeri utilizzata nelle miscele varia a seconda della qualità del bitume utilizzato e delle prestazioni reologiche attese per il prodotto finale.

Indicativamente si utilizza il 3-5% di polimero in peso sul bitume per la produzione di conglomerati bituminosi modificati e il 6-8% per miscele bituminose ad elevato modulo di rigidità ed elevata resistenza a fatica. I PMB sono normati a livello europeo secondo la specifica EN 14023.

Nella categoria dei bitumi modificati, seppure con una loro specifica denominazione, rientrano anche i bitumi preparati utilizzando polverino di gomma derivato da pneumatici fuori uso (*Crumb Rubber Modified Bitumen - CRMB*). Questi sono ottenuti tramite uno specifico processo produttivo denominato WET che consiste nella miscelazione a caldo del bitume tal quale col polverino di gomma. I bitumi modificati con polverino di gomma da PFU sono normati secondo la specifica ASTM D 6114 e sono prodotti a caldo in appositi impianti, mediante un processo tramite il quale il legante assume caratteristiche di maggiore viscosità con interazione chimico fisica fra la gomma e il bitume.

La maggiore viscosità del legante consente più elevati dosaggi nella pavimentazione con maggiore resistenza all'ormaiamento e maggiore resistenza a fatica. Come per i classici PMB, la percentuale di polverino di gomma utilizzata varia in funzione della qualità del bitume tal quale e delle prestazioni reologiche attese dal prodotto finale. Indicativamente si utilizza l'8-15% di polverino di gomma in peso sul bitume tal quale per la produzione di conglomerati bituminosi migliorati e il 16-22% per miscele bituminose ad elevato modulo di rigidità ed elevata resistenza a fatica.

I conglomerati modificati con tecnologie PMB o CRMB risultano adatti alla produzione di pavimentazioni, sia per gli strati di base, sia per quelli di collegamento (anche ad alto modulo) e di usura, con prestazioni idonee a sopportare carichi di traffico a elevata intensità e velocità dei mezzi, anche in condizioni di piovosità (grazie all'opportunità di produrre asfalti drenanti), nonché di resistere in condizioni di temperature di esercizio molto severe o con elevate escursioni termiche. Nello specifico caso di pavimentazioni con leganti di tipo CRMB, in aggiunta a queste caratteristiche, sono riscontrati ulteriori vantaggi tecnici in merito alla riduzione della rumorosità e all'aumento di aderenza pneumatico-pavimentazione, oltre a una maggiore durata di vita utile.

2.3.2 Modifica della miscela bituminosa PMA (metodo dry)

Le miscele bituminose PMA sono preparate direttamente in impianto di produzione, mescolando polimeri o compound polimerici di varia natura (ad esempio elastomeri, poliolefine e/o plastomeri di diversa densità) ai materiali inerti prima dell'aggiunta di bitume caldo. La percentuale di polimeri utilizzata varia a seconda della qualità del bitume utilizzato e delle prestazioni finali desiderate per il conglomerato bituminoso. Indicativamente si utilizza il 4-6% di polimero o compound polimerico in peso sul bitume tal quale per la produzione di conglomerati bituminosi modificati e il 7-10% per miscele bituminose ad elevato modulo di rigidità ed elevata resistenza a fatica. I compound polimerici possono anche contenere fibre di varia natura (ad esempio cellulosa, vetro, sintetiche, etc.) che consentono di ottenere diverse prestazioni come agglomeranti del bitume, di rinforzo microstrutturale e/o macrostrutturale, etc. I compound polimerici con fibre sono aggiunti al conglomerato bituminoso in percentuali variabili fino allo 0,6% in peso sugli aggregati a seconda

delle prestazioni richieste al prodotto finito. Inoltre, a questi compound può essere aggiunto anche polverino di gomma da PFU con la finalità di realizzare conglomerati bituminosi a minore emissione acustica e/o vibrazionale, e una migliore aderenza pneumatico-pavimentazione.

Le caratteristiche fisico-meccaniche del conglomerato bituminoso di tipo PMA sono verificate attraverso analisi prestazionali, sulla base della normativa europea vigente.

I conglomerati bituminosi modificati con tecnologie PMA risultano idonei per la costruzione di pavimentazioni prestazionali atte a sopportare elevati carichi di traffico e con elevata incidenza di mezzi pesanti, soggette a sforzi tangenziali e operanti in condizioni di severe temperature di esercizio o con elevate escursioni termiche.

2.3.3 Modifica della miscela bituminosa PMB con polverino di gomma da PFU (pneumatici fuori uso)

Il recupero di polverino di gomma da PFU, oltre alla tecnologia Crumb Rubber (CRMB - metodo wet), può essere effettuato con metodo DRY, che prevede la preparazione della miscela utilizzando come legante PMB. L'introduzione della gomma avviene direttamente nel mescolatore dell'impianto di produzione dopo l'inserimento del bitume. Anche in questo caso, la quantità di polverino di gomma varia in funzione della qualità del PMB utilizzato e delle prestazioni che si vogliono ottenere per la pavimentazione finale. Indicativamente si utilizza l'1,0-2,0% di polverino di gomma in peso sugli aggregati. Le pavimentazioni realizzate con questa tecnologia, oltre a raggiungere le prestazioni meccaniche conferite dall'impiego di PMB, consentono di ottenere anche una soddisfacente riduzione della rumorosità e delle vibrazioni e una migliore aderenza pneumatico-pavimentazione.

2.4 Il riciclo del conglomerato bituminoso da recupero

Il conglomerato bituminoso da recupero proveniente dalla demolizione di delle pavimentazioni stradali o *Reclaimed Asphalt Pavement*, -RAP-, pur avendo perso parte delle proprietà meccaniche a causa dell'invecchiamento del legante, rimane un materiale molto pregiato per il suo contenuto di aggregati selezionati e bitume. Il problema dell'invecchiamento del bitume contenuto nel RAP, essendo causa di un comportamento rigido, di scarse proprietà di adesione e di rivestimento dei materiali lapidei, è affrontato con specifici prodotti, denominati Attivanti Chimici Funzionali (ACF), che consentono di "ringiovanire" il bitume ripristinandone le proprietà reologiche originarie.

Opportunamente trattato, infatti, il RAP può essere completamente riciclato come materia prima seconda per la preparazione di nuovi conglomerati bituminosi con caratteristiche fisico-meccaniche paragonabili a quelli che impiegano esclusivamente materiali di primo utilizzo.

Il riciclaggio del RAP nella produzione di nuovi conglomerati bituminosi può essere effettuato in impianto o in situ con tecnologie a caldo, a tiepido e a freddo. Tra queste, quella maggiormente diffusa è quella del riciclaggio in un mix caldo in impianto (*hot mix plant recycling*), in cui il fresato,

opportunamente frantumato, vagliato e selezionato, viene mescolato in quantità variabili con aggregati e bitume vergini e additivi rigeneranti.

Alcune tecniche di riciclaggio a caldo in situ con treno di riciclo (*hot in-place recycling*), che prevedono il riscaldamento della pavimentazione prima della fresatura e del contestuale riciclo per mezzo di apposita macchina riciclatrice, pur storicamente sperimentate, non sono più utilizzate in Italia per i rischi associati al riscaldamento della pavimentazione bituminosa. Per contro, il riciclaggio a freddo, in impianto (*cold mix plant recycling*), in situ con impianto mobile posizionato in prossimità del cantiere, o in situ con treno di riciclo (*cold in-place recycling*), che è tra le opzioni più efficaci in termini di circolarità e risparmio energetico, viene effettuato con l'ausilio delle tecnologie tipiche delle emulsioni bituminose o dei bitumi schiumati.

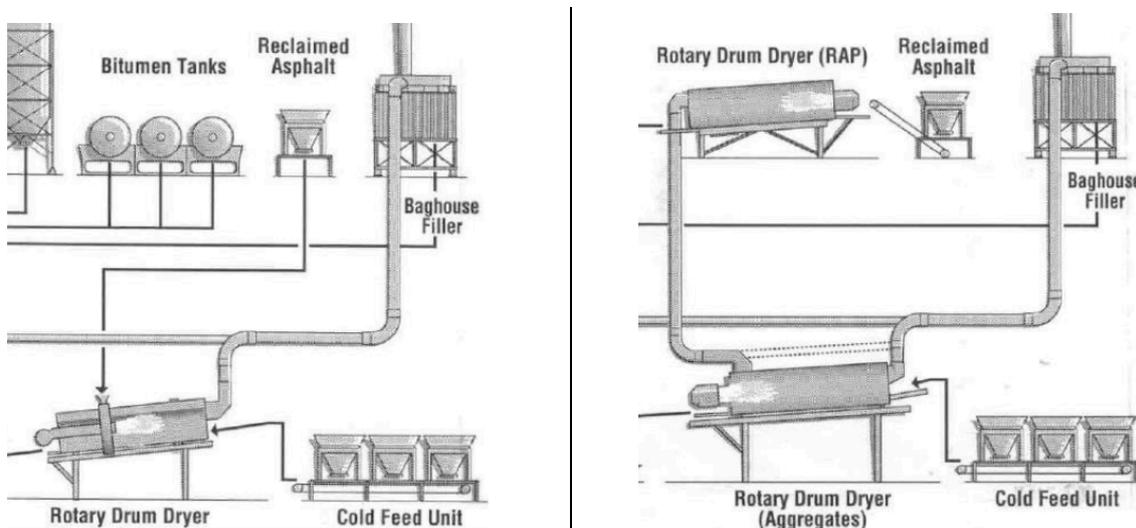
2.4.1 Riciclaggio del fresato a caldo in impianto

Data l'efficacia degli Attivanti Chimici Funzionali, che opportunamente dosati permettono la rigenerazione completa del bitume invecchiato, i limiti a elevate percentuali di riciclaggio a caldo del RAP riguardano prevalentemente la tipologia di dotazioni tecnologiche degli impianti.

In funzione dell'impiego di diverse tipologie di impianto (continui o discontinui), è possibile preparare mix di conglomerati bituminosi con contenuto di riciclato variabile fino a circa il 50% sul peso della miscela. Tale percentuale dipende dai metodi di immissione del fresato nel sistema produttivo (è possibile utilizzare anche più metodi contemporaneamente):

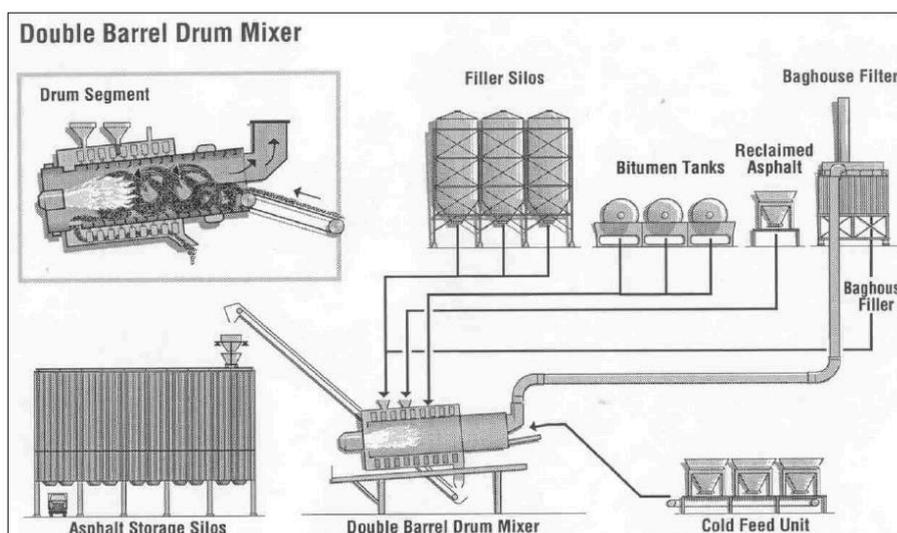
- Anello di riciclaggio: semplice modifica del tamburo essiccatore che consente di riscaldare il RAP senza contatto diretto con la fiamma, sfruttandone il calore generato per l'essiccazione degli inerti e per contatto diretto con gli aggregati caldi. In funzione delle dimensioni è possibile riciclare sino a circa il 40%;
- Immissione alla base dell'elevatore a tazze: il RAP è introdotto a freddo nell'elevatore e il suo riscaldamento avviene per contatto diretto con gli aggregati caldi (sfruttando maggiori tempi di riscaldamento). In funzione delle dimensioni è possibile riciclare sino a circa il 30%;
- Immissione diretta nel mescolatore: il RAP è introdotto a freddo nel mescolatore e il suo riscaldamento avviene per contatto diretto con gli aggregati caldi (brevi tempi di riscaldamento). In funzione delle dimensioni è possibile riciclare sino a circa il 20%;
- Tamburo essiccatore con camicia: è composto da due cilindrici concentrici nei quali gli aggregati sono immessi in quello centrale (presenza di fiamma diretta) e il fresato è immesso nella camicia (tra i due cilindri). Il riscaldamento del RAP avviene per contatto con le pareti e i fumi caldi. In funzione delle dimensioni è possibile riciclare sino a circa il 50%;
- Doppio tamburo: il fresato è riscaldato in un tamburo essiccatore dedicato che permette di mantenere le temperature idonee per un corretto utilizzo, anche attraverso la circolazione di fumi caldi derivanti dal cilindro principale degli aggregati vergini. È possibile riciclare sino al 100%.

Figura 21 - Sezioni di schema di impianto HMA discontinuo con cilindro essiccatore dotato di anello di riciclaggio (sx) e di impianto HMA discontinuo con cilindro essiccatore in equi-corrente per il RAP



Fonte: EAPA

Figura 22 - Schema di impianto HMA continuo con *Double Barrel Drum Mixer* per il riscaldamento del RAP prima della miscelazione aggregati vergini.



Fonte: EAPA

Il riutilizzo di fresato deve essere sempre preceduto dall'ideale gestione con particolare riferimento all'individuazione delle caratteristiche chimico-fisiche e da tecniche di frantumazione e vagliatura per un corretto studio dei mix design e relativa rigenerazione. I impianti industriali *All RAP* sono

stati sviluppati soprattutto negli Stati Uniti per la produzione di conglomerati bituminosi con 100% fresato a caldo¹⁹. Processi di produzione a tiepido sono in fase avanzata di sperimentazione²⁰.

2.4.2 Riciclaggio del fresato a freddo

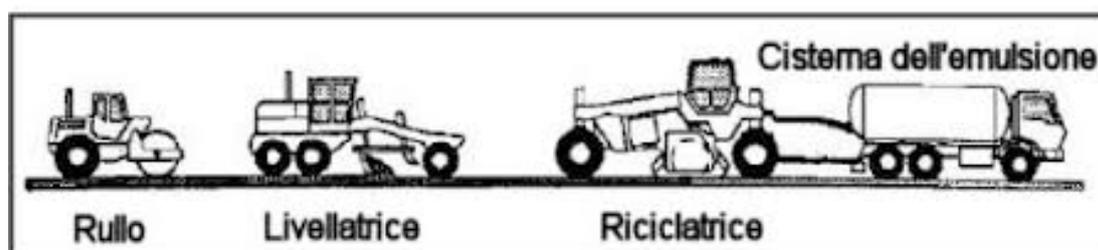
Il riciclaggio a freddo dei fresati è la tecnologia che offre il maggior beneficio in termini di risparmio di risorse e di energia e può essere effettuato sia in impianto che in situ. In entrambi i casi vengono sfruttate le potenzialità delle tecnologie delle emulsioni bituminose e dei bitumi schiumati.

Il riciclaggio a freddo in impianto prevede le stesse procedure di gestione del RAP adottate per quello a caldo. In caso di utilizzo direttamente in situ, tali procedure risultano semplificate. In ogni caso è fondamentale lo studio del mix design per il raggiungimento delle prestazioni fisico-meccaniche richieste per tale tipo di pavimentazione.

Con riferimento alla produzione in impianto (fisso o mobile), la posa in opera dei CMA non prevede significative differenze rispetto alla tecnologia utilizzata per gli HMA e WMA.

Diversamente, l'organizzazione di un cantiere per il recupero della pavimentazione direttamente in situ con treno di riciclaggio, consente di effettuare tutte le operazioni tipiche della riabilitazione di una pavimentazione (fresatura del manto, miscelazione del RAP con emulsione o bitume schiumato, aggiunta di additivi ed eventuali legante a cemento e inerti, posa e compattazione) in un'unica sequenza, senza il trasporto del fresato dal cantiere all'impianto e viceversa.

Figura 23 - Schema semplificato di un treno di riciclaggio con emulsione bituminosa e riciclatrice gommata



Fonte: web

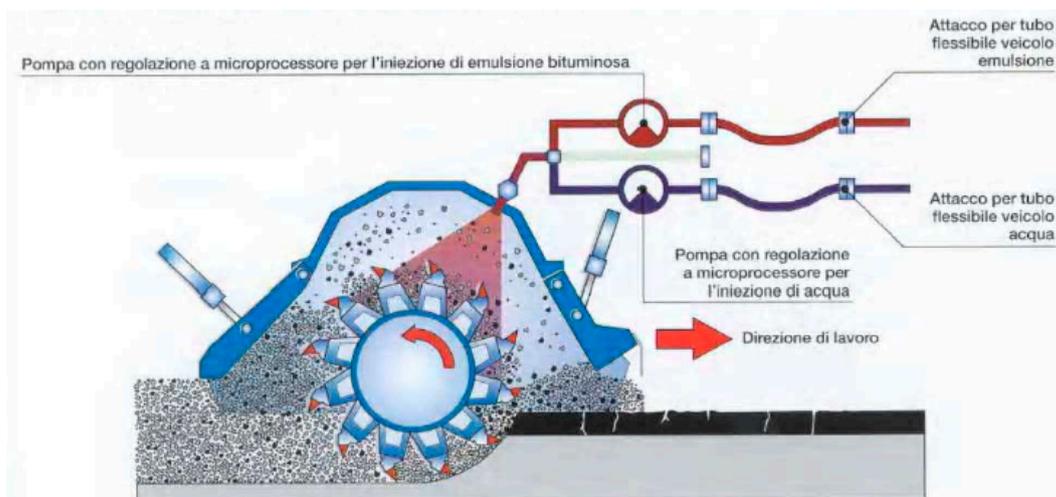
I treni di riciclaggio vengono implementati con diverse configurazioni a seconda dell'applicazione, del tipo di leganti, dell'uso di stabilizzanti e delle caratteristiche geometriche della strada sottoposta a riabilitazione. In queste configurazioni, la macchina riciclatrice svolge la funzione di "locomotiva", spingendo tutte le parti del treno ad essa collegata mediante apposite barre di collegamento.

¹⁹ "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis", M. Zaumanis et al., Resources, Conservation and Recycling, 92, 2014.

²⁰ "Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP", M. Dinis-Almeida, et al., Construction and Building Materials, 112, 2016

Il cuore delle macchine riciclatrici è costituito da un tamburo che consente la fresatura della pavimentazione e la simultanea mescolazione del fresato con emulsione o bitume schiumato, cemento, additivi e acqua, opportunamente dosati per mezzo di un dispositivo di iniezione.

Figura 24 - Particolare della camera di riciclaggio di una macchina riciclatrice



Fonte: web

La macchina riciclatrice può essere impostata per il riciclaggio della pavimentazione a diversi spessori a seconda delle necessità. Il riciclaggio in profondità (fino a 300 mm) viene effettuato in casi di pavimentazioni fortemente deteriorate per cui è necessario un consolidamento strutturale, ad esempio che coinvolga sia la base che una porzione di fondazione. Diversamente, il riciclaggio superficiale (fino a profondità di 150 mm) viene effettuato nei casi di pavimentazioni in cui gli strati portanti risultano strutturalmente solidi.

2.4.3 Utilizzo e riciclaggio di aggregati alternativi nella produzione di conglomerati

Nella preparazione dei conglomerati bituminosi, in alternativa agli aggregati lapidei tradizionali e da recupero, possono essere utilizzati aggregati artificiali prodotti industrialmente, ad esempio l'argilla espansa nel caso di necessità di pavimentazione leggera e fonoassorbenti, o come scarti di altre lavorazioni. In questo ambito particolare interesse riguarda il riciclo delle scorie di acciaieria, che grazie alle loro caratteristiche di durezza, rugosità e resistenza all'abrasione e all'attrito, vengono impiegate sia come materiali granulari per sottofondi e fondazioni, sia come aggregati di alta qualità negli strati legati a bitume.

3 I vantaggi ambientali delle tecnologie innovative e circolari in uno scenario di interventi di manutenzione al 2050

3.1 Lo scenario di riferimento: un nuovo modello per le manutenzioni stradali in Italia

Nel periodo dal 2006, anno di picco di produzione degli ultimi 30 anni, al 2017, la produzione di conglomerati bituminosi in Italia è calata di quasi il 50%, passando da 44,3 Mt a 23,7 Mt, per un valore cumulato complessivo di conglomerati non posati in opera pari a 180 milioni di tonnellate, equivalente a mancati interventi di manutenzione ordinaria su circa 90.000 km di strade per un valore economico complessivo di circa 12 miliardi di euro²¹.

Gli effetti di questa politica di disinvestimento da parte delle Pubbliche Amministrazioni, si riscontrano nello stato di diffuso degrado della rete viaria del Paese, che rende urgente definire un piano di interventi straordinario che consenta di recuperare il tempo perduto. Un'urgenza che, tuttavia, non può prescindere dal rispetto degli impegni internazionali sottoscritti dal nostro Paese per la riduzione delle emissioni di gas serra, responsabili del cambiamento climatico in atto, e della necessità di ridurre la pressione sul capitale naturale: due facce della stessa medaglia.

Compatibilmente con questo quadro, lo studio analizza le ricadute di impatto di uno scenario al 2050 che preveda un piano straordinario di interventi per riportare, entro il 2025, l'estensione chilometrica annuale della manutenzione delle strade ai livelli del 2006, considerato dal settore come minimo compatibile con una gestione efficiente della rete, mantenendola poi costante negli anni successivi.

Le valutazioni di impatto vengono effettuate confrontando gli impatti ambientali di ciclo di vita associati a interventi di manutenzione effettuati con tecnologie di tipo tradizionale rispetto a interventi effettuati con tecnologie innovative a elevato tasso di circolarità che, a parità di prestazioni delle pavimentazioni, consentono di massimizzare il recupero del fresato d'asfalto e di ridurre i consumi di energia nelle fasi di produzione e posa dei conglomerati.

Nel 2017, a fronte di una produzione di 23,6 milioni di tonnellate di conglomerati bituminosi, si stima siano stati effettuati interventi di manutenzione per un'estensione media di 12.000 km di strade, per un valore economico complessivo di poco superiore a 1,6 miliardi di euro. Per contro, nel 2006, anno di picco di produzione di conglomerati degli ultimi 30 anni, a fronte di 44,3 milioni di tonnellate di conglomerati consumati, l'estensione media delle strade mantenute risultava pari a 22.500 km per un totale di spesa di circa 3 miliardi di euro.

²¹ Stima effettuata considerando una strada di 10 metri di larghezza con uno sviluppo in profondità variabile tra 20 cm e 30 cm, opportunamente ripartiti nei tre strati di nero, considerando un utilizzo dei conglomerati per il 50% allocata al rifacimento dell'usura, al 30% del binder e al 20% della base (rif. statistiche EAPA, 2015). Rispetto a questa ripartizione, il valore economico è stimato sulla base di una media di prezzi per la posa dei tre strati separatamente a partire dai prezzi regionali.

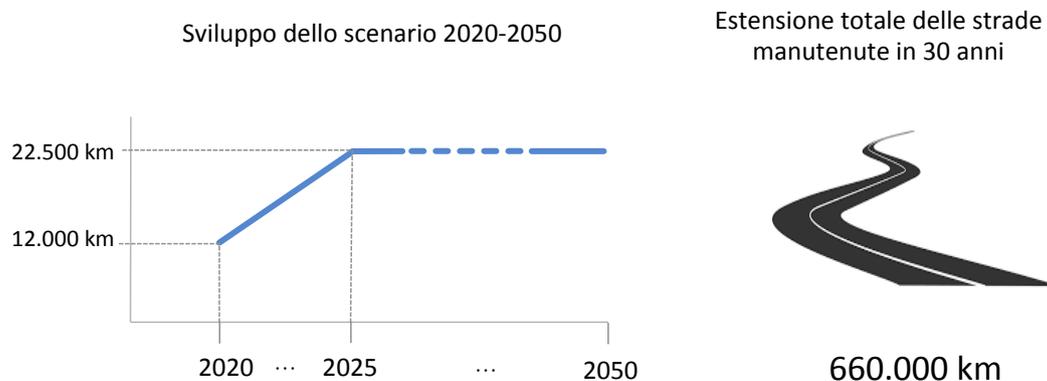
Figura 25 - Confronto tra livelli di manutenzione 2006 e 2017



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Siteb

A partire da questi dati, lo scenario di riferimento oggetto di analisi viene costruito per un periodo di 30 anni, dal 2020 al 2050, prevedendo di riportare entro cinque anni l'estensione annua delle manutenzioni dai 12.000 km stimati per il 2017 ai 22.500 km dell'anno 2006, per poi mantenerle costanti su questo valore fino al 2050. Rispetto a questa configurazione, in trent'anni, l'estensione delle strade mantenute risulta pari a circa 660.000 km, equivalente al totale della rete viaria nazionale.

Figura 26 - Scenario al 2050



Fonte: Elaborazione Fondazione

Lo scenario è implementato per tre diverse macro-tipologie di strade, riscontrabili nella composizione della rete viaria nazionale, in riferimento a interventi di manutenzione effettuati sugli strati di base, binder e usura, con tecnologie tradizionali e innovative. Queste si differenziano per l'opportunità di operare a basse temperature, e finanche a freddo, con elevati tassi di riciclo di fresato (tecnologie innovative), rispetto a un approccio di produzione e stesa a caldo dei conglomerati con modesti tassi di riciclo di fresato (tecnologie tradizionali).

Figura 27 - Quadro sinottico di implementazione dello scenario 2050 per tipologia di strade e tecnologie di manutenzione

Tipologia di strade	1) Strade con caratteristiche geometriche idonee per il riciclaggio in situ	2) Strade con caratteristiche geometriche non idonee per il riciclaggio in situ	3) Strade urbane di quartiere non soggette a carichi di traffico pesante
Tecnologie adottate per gli interventi	<p>Tradizionali</p> <p>Recupero fresato: 20% in strati di base e binder, 10% in strati di usura</p> <p>Base, Binder e Usura:</p> <ul style="list-style-type: none"> Hot Mix Asphalt con con bitume tal quale (80% dei casi) Warm Mix Asphalt con bitume modificato PMB (20% dei casi). 	<p>Recupero fresato: 20% in strati di base e Binder, 10% in strati di usura</p> <p>Base, Binder e Usura: Hot Mix Asphalt con con bitume tal quale</p>	<p>Recupero fresato: 20% in strato di base-binder, 10% in strato di usura</p> <p>BaseBinder e Usura: Hot Mix Asphalt con bitume tal quale off site</p>
Tecnologie adottate per gli interventi	<p>Innovative</p> <p>Recupero fresato: 100%</p> <p>Base: Cold Mix Asphalt in emulsione bituminosa con treno di riciclo in situ.</p> <p>Binder e Usura: Warm Mix Asphalt modificato PMA</p>	<p>Recupero fresato: 100%</p> <p>Base: Cold Mix Asphalt in emulsione bituminosa prodotto off site</p> <p>Binder e Usura:</p> <ul style="list-style-type: none"> Warm Mix Asphalt modificato PMA (80% dei casi) Warm Mix Asphalt modificato con polverino di gomma di PFU medoto DRY (20% dei casi) 	<p>Recupero fresato: 100%.</p> <p>BaseBinder: Cold Mix Asphalt in emulsione bituminosa prodotto off site</p> <p>Usura:</p> <ul style="list-style-type: none"> Warm Mix Asphalt modificato PMA (80% dei casi) Warm Mix Asphalt modificato con polverino di gomma di PFU medoto DRY (20% dei casi)
Tipologia di interventi	<p>Ripristino della funzionalità della pavimentazione per elevati carichi di traffico, anche pesante</p> <p>Base 13 cm</p> <p>Binder 7 cm</p> <p>Usura 6 cm</p>	<p>Ripristino della funzionalità della pavimentazione per elevati carichi di traffico, anche pesante</p> <p>Base 18 cm</p> <p>Binder 6 cm</p> <p>Usura 5 cm</p>	<p>Ripristino della funzionalità della pavimentazione per carichi di traffico leggero</p> <p>BaseBinder 13 cm</p> <p>Usura 4 cm</p>

Per ciascuna tipologia di strade vengono presi in considerazione tre interventi di manutenzione, a seconda che gli strati di nero delle pavimentazioni vengano ripristinati completamente o in parte: rispetto all'estensione delle strade, il 15% riguarda il ripristino dei tre strati (Base+Binder+Usura), il 30% il rifacimento di binder e usura (Binder+Usura) e il 55% il rifacimento del solo strato di usura (Usura)²².

²² Ripartizione compatibile con le ipotesi di allocazione del consumo di conglomerati del modello di calcolo di cui alla nota 21 a pp. 40, per una strada di 10 metri di larghezza e con uno sviluppo in profondità degli strati di nero pari a 27 cm, ripartito in 15 cm per la base, 7 cm per il binder e 5 cm per l'usura.

Nel dettaglio, per 22.500 km di strade mantenute nello scenario a regime (che rappresentano il 3,4% del totale delle strade nazionali), il rifacimento di Base+Binder+Usura coinvolge un totale di 3.375 km di strade, il rifacimento di Binder+Usura riguarda 6.750 km di strade e il rifacimento del solo strato di usura riguarda 12.375 km di strade. Rispetto alla composizione della rete viaria nazionale, tale configurazione riguarda manutenzioni effettuate su 234 km di autostrade, 730 km di strade statali, 1.270 km di strade regionale, 4.000 km di strade provinciali e 16.267 km di strade comunali (urbane e extraurbane).

Figura 28 - Configurazione dello scenario a regime rispetto alla composizione della rete viaria nazionale

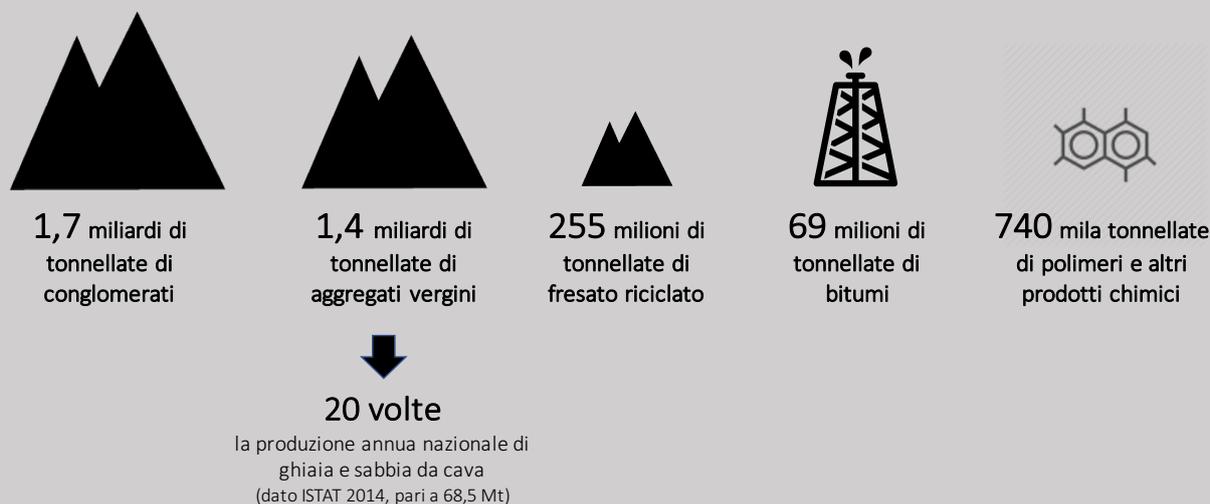
Larghezza media (m)		30	18	18	12	9			
Strade della rete viaria nazionale (km)		Autostrade 	Statali 	Regionali 	Provinciali 	Comunali (urbane e extraurbane) 	TOTALI (km)		% (su 22.500 km)
Rifacimento di Base+binder+Usura	Strade Tipo 1	30	44	76	60	244	454	3.375	15%
	Strade Tipo 2	5	66	114	540	1.304	2.029		
	Strade Tipo 3	0	0	0	0	892	892		
Rifacimento di Binder+Usura	Strade Tipo 1	60	88	152	120	488	908	6.750	30%
	Strade Tipo 2	11	131	229	1.080	2.607	4.058		
	Strade Tipo 3	0	0	0	0	1.785	1.785		
Rifacimento di Usura	Strade Tipo 1	109	160	280	220	895	1.664	12.375	55%
	Strade Tipo 2	19	241	419	1.980	4.780	7.439		
	Strade Tipo 3	0	0	0	0	3.272	3.272		
TOTALE		234	730	1.270	3.999	16.267	22.500		

Consumo diretto di materiali nell'ipotesi di interventi effettuati con tecnologie tradizionali

Rispetto alla configurazione proposta per lo scenario, considerando il caso di interventi effettuati con tecnologie tradizionali a caldo con un recupero di fresato del 20% negli strati di base e binder e del 10% negli strati di usura (dato medio considerato rappresentativo del settore), la manutenzione di 22.500 km di strade richiede un consumo di 59,6 milioni di tonnellate di conglomerati ogni anno, di cui 48,6 Mt di aggregati vergini (82%), 2,3 Mt di bitumi (4%), 0,25 Mt di polimeri e altri composti (0,04%) e 8,6 Mt di fresato d'asfalto di recupero (14%).

Il totale cumulato nei 30 anni dal 2020 al 2050, risulta pari a 1,76 miliardi di tonnellate di conglomerati, di cui 1,44 miliardi di tonnellate di aggregati vergini, equivalenti a 20 volte la produzione nazionale di ghiaia e sabbia da cava.

Figura 29 - Impatto al 2050 del consumo cumulato di conglomerati con un approccio tecnologico tradizionale



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo e Siteb

Le valutazioni di impatto di ciclo di vita nel confronto tra tecnologie innovative e tradizionali adottate per gli interventi di manutenzione dello scenario, sono elaborate rispetto alle emissioni di gas serra, al consumo di risorse naturali e al consumo di acqua: i tre indicatori di impatto considerati maggiormente significativi per il tipo di attività considerata.

Per ciascun indicatore, gli impatti sono calcolati a partire dai risultati dell'analisi LCA effettuata in collaborazione con il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici dell'Università di Palermo²³.

3.2 Analisi di ciclo di vita: impostazione generale e ipotesi di base

L'analisi del ciclo di vita è uno strumento di analisi ambientale e di supporto alle scelte e decisioni nel campo della pianificazione e delle politiche ambientali, che valuta i carichi energetici ed ambientali relativi a un processo, o un'attività, attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del

²³ "LCA screening comparativo degli impatti ambientali di ciclo di vita per la realizzazione di pavimentazioni stradali con tecnologie innovative ad elevata efficienza delle risorse rispetto a tecnologie convenzionali", M. Cellura, S. Longo, Università degli Studi di Palermo, 2018

processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale²⁴.

Secondo la norma UNI ES ISO 14040, che definisce la LCA una "compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto (insieme elementare di unità di processo connesse tra loro per quanto riguarda materia ed energia, che perseguono una o più funzioni definite)", una procedura LCA considera quattro fasi, che riguardano:

- 1) Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio (Goal and Scope Definition): è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.
- 2) Analisi di Inventario (Life Cycle Inventory Analysis, LCI): è la parte dedicata allo studio del ciclo di vita di un processo o di un'attività; lo scopo principale è quello di analizzare tutti i processi di trasformazione e trasporto attraverso cui i flussi di energia e di materiali permettono il funzionamento del sistema produttivo in esame.
- 3) Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): è lo studio dell'impatto energetico-ambientale provocato dal processo o dall'attività ed ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati nell'Inventario. È questa la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di Inventario al giudizio di pericolosità ambientale.
- 4) Interpretazione e Miglioramento (Life Cycle Interpretation): è la parte conclusiva di una LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o delle attività considerati, valutandoli in maniera iterativa con la stessa metodologia LCA in modo da non attuare azioni tali da peggiorare lo stato di fatto.

Rispetto a questo approccio, nel presente studio è stata effettuata una comparazione tra gli impatti energetico-ambientali connessi a interventi di manutenzione di pavimentazioni stradali effettuate con tecnologie a elevata circolarità delle risorse (tecnologie innovative) rispetto a quelli causati da interventi realizzati con tecnologie convenzionali con l'obiettivo di:

- valutare gli impatti energetico-ambientali connessi ai processi di manutenzione ordinaria di tre tipologie di pavimentazioni stradali realizzate con differenti tecnologie (convenzionali e innovative);
- comparare gli impatti associati all'utilizzo di tecnologie innovative rispetto a quelle convenzionali;
- identificare le fasi del processo e i flussi in input/output responsabili dei maggiori impatti energetico-ambientali.

In dettaglio, sono state esaminate tre tipologie di strade, caratteristiche della rete nazionale, per ciascuna delle quali sono stati considerati interventi di manutenzione per gli elementi costitutivi gli strati superficiali di base, binder e usura, effettuati con tecnologie innovative e convenzionali:

²⁴ Il termine LCA, Life Cycle Assessment (Analisi del Ciclo di Vita), venne coniato nel 1993 durante il Congresso SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) a Smuggler Notch (Vermont, USA).

- Strada di tipo 1: strade con caratteristiche geometriche idonee per il riciclaggio in situ (ad es. strade con almeno due corsie per ogni senso di marcia, tra cui autostrade, strade urbane ad elevata percorrenza, superstrade, ecc.);
- Strada di tipo 2: strade con caratteristiche geometriche non idonee al riciclaggio in situ (ad es. strade con lunghezza rettilinea inferiore ai 500 m, strade strette, ecc.);
- Strada di tipo 3: strade urbane di quartiere non soggette a carichi di traffico pesante (ad es. strade urbane di città).

Al fine di consentire di estendere le valutazioni di impatto a qualsiasi tipologia di strada e per qualsiasi lunghezza, l'unità funzionale selezionata è 1 m² (un metro quadrato) di pavimentazione, su cui viene effettuato, in accordo con le indicazioni delle Product Category Rules per strade e autostrade²⁵, un intervento di manutenzione ordinaria, avente una vita utile di 20 anni²⁶.

La fase del ciclo di vita della pavimentazione stradale presa in considerazione nell'analisi è quella relativa al modulo B4 "Sostituzione" definito nella norma EN 15804 sulla sostenibilità delle costruzioni²⁷. Tale modulo include tutte le azioni connesse alla sostituzione di un elemento della costruzione (nel caso in specie della pavimentazione stradale) in modo da ripristinare le condizioni necessarie affinché il prodotto in esame (nel caso in specie gli strati di asfalto superficiale base, binder e usura) possa svolgere la sua funzione garantendo specifiche prestazioni funzionali e tecniche.

I confini del sistema identificati includono:

- Approvvigionamento, inclusi i trasporti ai siti di produzione, delle materie prime e dei materiali impiegati per la produzione del conglomerato bituminoso e delle emulsioni bituminose;
- Produzione del conglomerato bituminoso e delle emulsioni bituminose utilizzati per il ripristino degli strati di asfalto;
- Produzione dei macchinari utilizzati in cantiere;
- Trasporto del conglomerato bituminoso e delle emulsioni bituminose dal sito di produzione al cantiere;
- Processo di ripristino degli strati di asfalto, inclusi i consumi di combustibile per l'utilizzo dei macchinari e i consumi di acqua;
- Trasporto dei rifiuti di processo riutilizzati nello stesso sistema in esame (fresato d'asfalto) e successivo trattamento di riciclo fino al conseguimento dello stato di "end-of-waste".

²⁵ International EPD System, Product Category Rules (PCR) Highways, Streets and Roads (except Elevated Highways), Product Category Classification: UN CPC 53211, 2013:20, Version 2.0, 2018.

²⁶ Per durata di vita utile dell'intervento di manutenzione si intende una composizione di interventi che riguarda un rifacimento dello strato di base (vita utile 20 anni), due rifacimenti dello strato di binder (vita utile 10 anni), quattro rifacimenti dello strato di usura (vita utile 5 anni).

²⁷ EN 15804:2012+A1:2013, Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products, 2013.

Gli impatti connessi alla produzione dei fabbricati e degli impianti di produzione dei materiali e dei macchinari utilizzati nel processo in esame sono stati esclusi dall'analisi, poiché, considerato che tali fabbricati e impianti sono utilizzati per molti anni, si è assunto che gli impatti connessi alla loro produzione siano trascurabili con riferimento all'unità funzionale selezionata. Gli impatti e i benefici connessi all'utilizzo del materiale riciclato (fresato d'asfalto), che ha raggiunto lo stato di "end-of-waste", come materia prima seconda in sostituzione di materiali vergini all'esterno dei confini del sistema in esame sono stati valutati separatamente.

Per ogni intervento di manutenzione preso in esame sono state considerate le seguenti fasi:

- Scarifica degli strati esistenti;
- Pulizia della superficie scarificata;
- Ripristino degli strati rimossi, che include lo spandimento di emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio, nonché la stesa e compattazione del relativo strato

Tutti i processi includono il trasporto del fresato riutilizzato nel sistema in un impianto di riciclo e la produzione e trasporto del conglomerato bituminoso e dell'emulsione bituminosa.

Per i consumi di materiali e di energia nei processi considerati sono stati utilizzati dati primari, se disponibili, nonché dati secondari (di letteratura o forniti dai costruttori per impianti e macchinari presi in considerazione).

Le categorie di impatto energetico – ambientale selezionate per descrivere le prestazioni del sistema riguardano:

- Consumo di energia primaria (Cumulative Energy Demand - CED);
- Effetto serra potenziale (Global Warming Potential - GWP);
- Consumo della risorsa acqua (Water Resource Depletion - WRD);
- Consumo di risorse (Resource Consumption - RC).

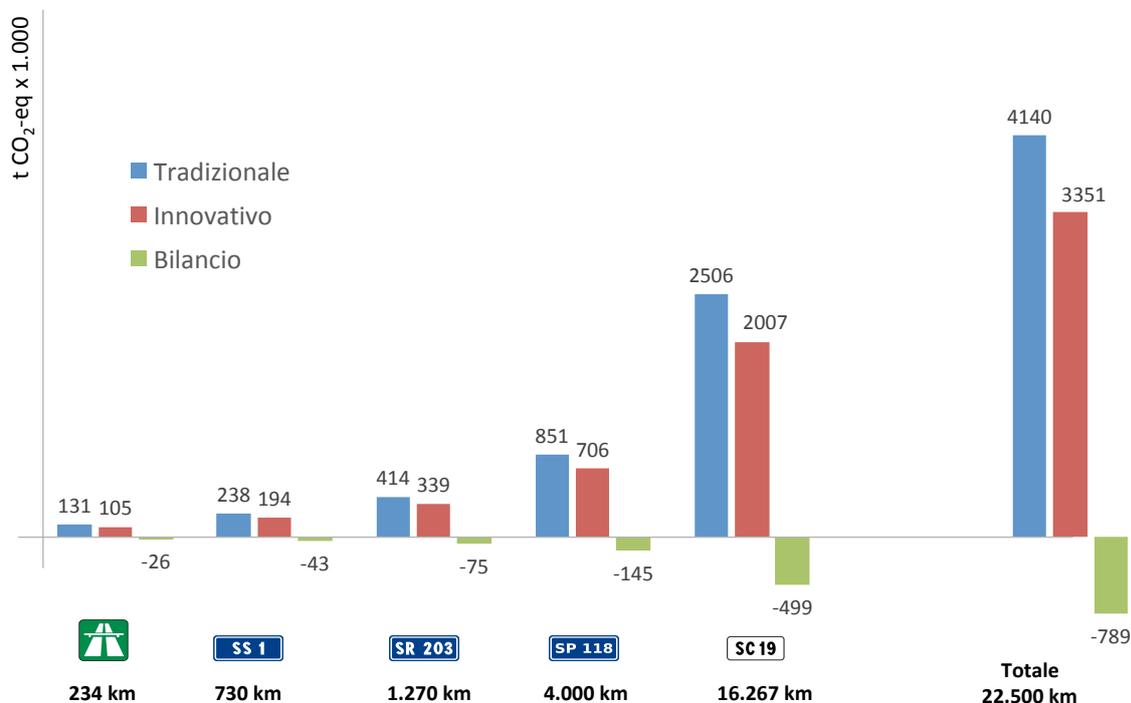
L'indicatore consumo di risorse è stato calcolato, come somma delle materie prime consumate durante il ciclo di vita nel sistema in esame. In dettaglio, sulla base dei dati di inventario relativi alle materie prime, facenti parte dell'eco-profilo del prodotto, sono state sommate tutte le materie prime aventi come unità di misura grammi e chilogrammi, che rappresentano quindi le aliquote principali del consumo totale di risorse.

3.3 I benefici ambientali di un nuovo modello di manutenzione stradale

3.3.1 Il risparmio di emissioni di gas serra

Nello scenario a regime, per 22.500 km di strade mantenute, le emissioni di gas serra di ciclo di vita associate a interventi effettuati con tecnologie tradizionali ammontano a 4,14 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente (CO₂eq), contro 3,35 milioni di tonnellate del caso di interventi effettuati con tecnologie innovative.

Figura 30 - Bilancio delle emissioni di gas serra di ciclo di vita per interventi a tecnologie tradizionali e innovative rispetto a 22.500 km di strade mantenute della rete viaria nazionale



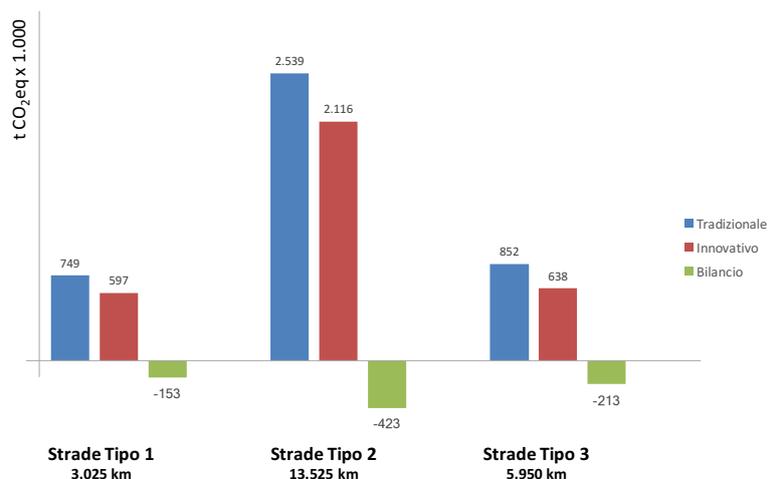
Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo

Il bilancio tra i due approcci, calcolato come differenza delle emissioni risultanti per interventi effettuati con le tecnologie meno impattanti (innovative) rispetto a quelle più impattanti (tradizionali), risulta pari a -789 mila tonnellate di CO₂eq²⁸, pari alle emissioni annuali di circa 450 mila auto del parco veicoli nazionale²⁹ con una percorrenza media di 10.000 km. Considerando il bilancio cumulato nei 30 anni dello scenario, pari a -23 milioni di tonnellate di CO₂eq per 660 mila km di strade mantenute, il numero di veicoli diventa 13 milioni.

Figura 31 - Bilancio delle emissioni di gas serra di ciclo di vita per interventi a tecnologie tradizionali e innovative rispetto a 22.500 km di strade per tipologia

²⁸ Per convenzione, un valore negativo del bilancio tra diversi impatti esprime una potenziale opportunità di risparmio.

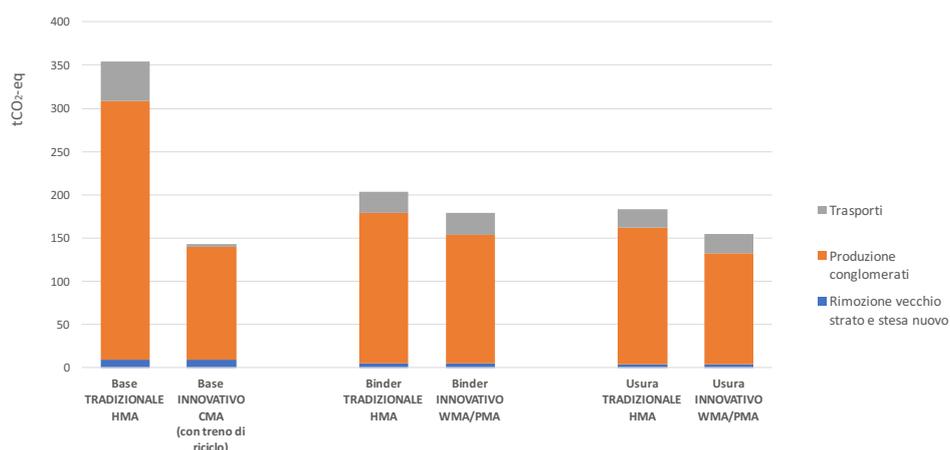
²⁹ Emissioni medie delle auto passeggeri del parco veicoli circolante in Italia al 2016 pari a 176,2 gCO₂/km (Fonte ISPRA).



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo

In tutti i casi considerati, i vantaggi di operare con tecnologie innovative sono prevalentemente associati all'opportunità di preparazione e stesa dei conglomerati riciclati a basse temperature, nonché a freddo e tanto più se effettuati in situ. Rispetto a un intervento di tipo tradizionale a caldo, ad esempio, gli interventi effettuati a freddo con macchina riciclatrice effettuati sullo strato di base consentono fino al 55% di riduzione delle emissioni di gas serra associate alla preparazione e posa dei conglomerati, cui si aggiungono ulteriori risparmi associati ai trasporti evitati dei materiali.

Figura 32 - Confronto delle emissioni di CO₂eq di ciclo di vita per la manutenzione di Base+Binder+Usura effettuati con tecnologie tradizionali e innovative su 1 km di strada statale (rif. Strada di tipo 1, larghezza 18 m, profondità degli strati 26 cm)



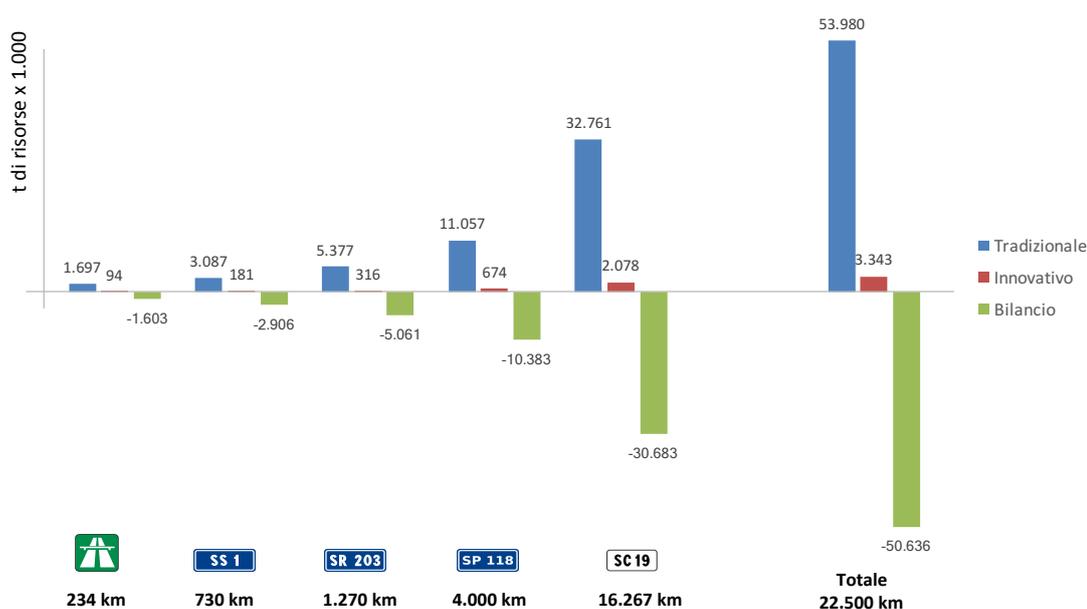
Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo

3.3.2 Il minor consumo di risorse minerali

Nello scenario a regime, per le manutenzioni effettuate ogni anno con tecnologie tradizionali il consumo di ciclo di vita di risorse naturali ammonta a un totale di quasi 54 milioni di tonnellate, contro le appena 3,3 milioni di tonnellate del caso di interventi effettuati con tecnologie innovative.

Il bilancio tra i due approcci risulta pari a -50,6 milioni di tonnellate di risorse vergini potenzialmente non consumate, in favore delle tecnologie innovative, corrispondenti a una fila di poco meno di 1,7 milioni di autocarri da 30 tonnellate a pieno carico, che nel bilancio cumulato al 2050, pari a -1,5 miliardi di tonnellate di risorse vergini, diventano una fila di 50 milioni di veicoli.

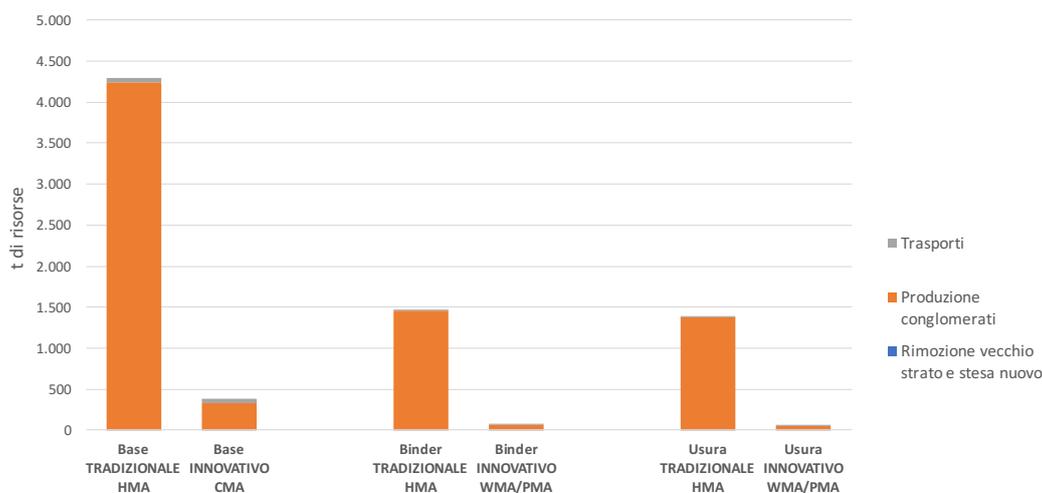
Figura 33 - Bilancio del consumo di risorse minerali di ciclo di vita per interventi a tecnologie tradizionali e innovative rispetto a 22.500 km di strade mantenute della rete viaria nazionale



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo

La grande differenza tra i due approcci è prevalentemente associata all'opportunità offerta dal recupero del fresato d'asfalto, che per il caso degli interventi effettuati con tecnologie innovative riguarda il 100% dei conglomerati, mentre per le tecnologie tradizionali è limitato al 20% negli strati di base e di binder e al 10% negli strati di usura.

Figura 34 - Confronto del consumo di risorse di ciclo di vita nei casi di manutenzione di Base+Binder+Usura effettuati con tecnologie tradizionali e innovative su 1 km di strada provinciale (rif. Strada di tipo 2, larghezza 12 m, profondità degli strati 29 cm)



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo

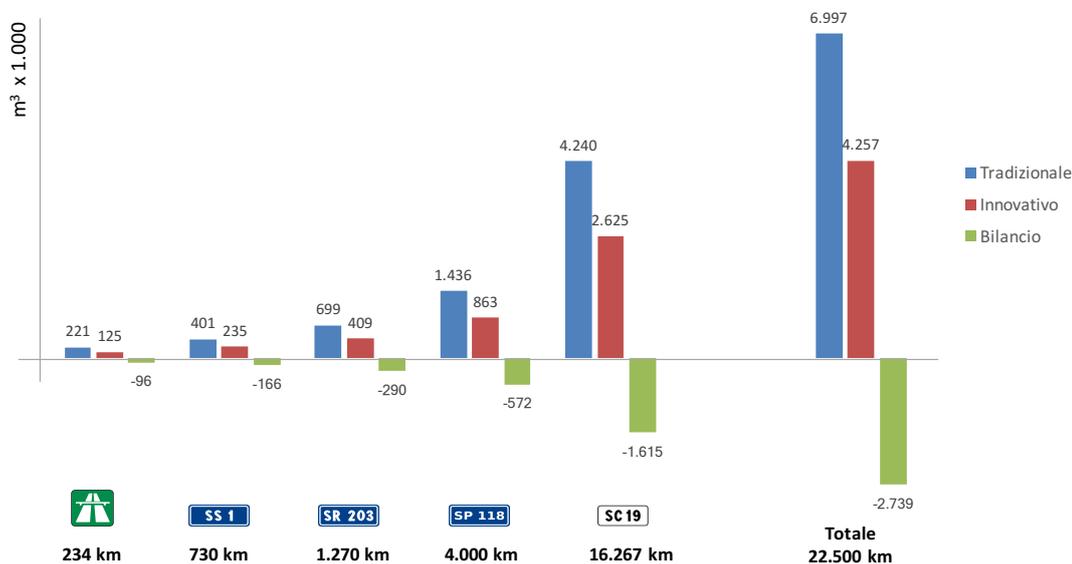
3.3.3 Il risparmio idrico

Nello scenario a regime, il consumo di acqua di ciclo di vita per le manutenzioni effettuate ogni anno con tecnologie tradizionali ammonta a poco meno di 7 milioni di metri cubi, mentre per interventi effettuati con tecnologie innovative si riscontra un consumo di 4,3 milioni di metri cubi.

Il bilancio tra i due approcci è pari a poco più di 2,7 milioni di metri cubi di acqua potenzialmente non consumata in favore delle tecnologie innovative, corrispondenti al volume di 1.100 piscine olimpioniche. Nei 30 anni di scenario, il bilancio risulta pari a oltre 80 milioni di metri cubi di acqua, equivalente a quattro volte la quantità mediamente riversata in mare dal fiume Tevere ogni giorno³⁰.

Figura 35 - Bilancio del consumo di acqua di ciclo di vita per interventi a tecnologie tradizionali e innovative rispetto a 22.500 km di strade mantenute della rete viaria nazionale

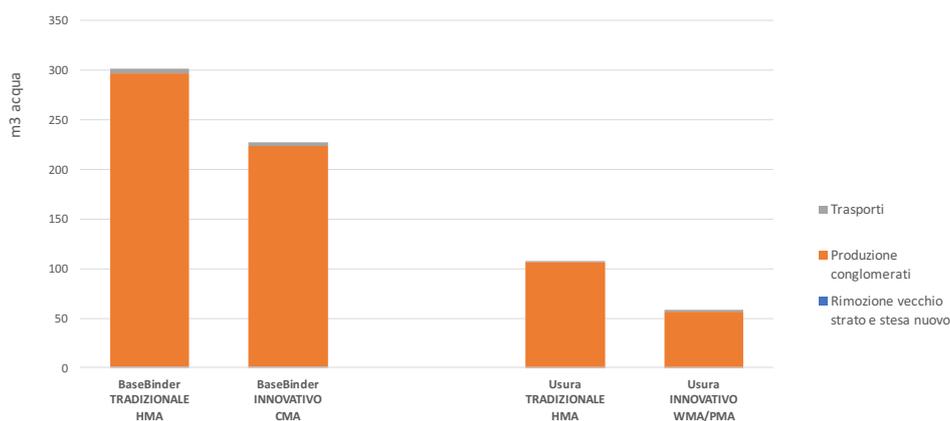
³⁰ Portata media annua alla foce del fiume Tevere, 240 m³/s (fonte Wikipedia)



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo

Anche in questo caso, il vantaggio del riciclo del 100% di fresato d'asfalto, nonché della preparazione dei conglomerati a basse temperature, e a freddo nel caso degli strati di base, sono alla base del maggior beneficio associato alle tecnologie innovative rispetto a quelle tradizionali.

Figura 36 - Confronto del consumo di risorse di ciclo di vita nei casi di manutenzione di Base+Binder+Usura effettuati con tecnologie tradizionali e innovative su 1 km di strada comunale (rif. Strada di tipo 3, larghezza 9 m, profondità degli strati 17 cm)



Fonte: Elaborazione Fondazione su dati Università di Palermo



**Università
degli Studi
di Palermo**

**LCA screening comparativo degli impatti ambientali di ciclo di vita
per la realizzazione di pavimentazioni stradali con tecnologie
innovative ad elevata efficienza delle risorse rispetto a tecnologie
convenzionali**

*Prof. Ing. M. Cellura – Dott. Ing. S. Longo
Università degli Studi di Palermo*

Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM)

Dicembre 2018

Contratto di ricerca applicata tra
Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile

e

Università degli Studi di Palermo

Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM)

INDICE

1. Premessa.....	2
2. Life Cycle Assessment.....	3
3. Life Cycle Assessment applicata ai processi di manutenzione ordinaria di pavimentazioni stradali.....	10
3.1 Obiettivi e campo di applicazione dello studio.....	10
3.1.1 Obiettivi dello studio.....	10
3.1.2 Unità funzionale e confini del sistema.....	11
3.1.3 Regole di allocazione.....	12
3.1.4 Categorie e metodi di impatto energetico - ambientale.....	12
3.2 Analisi di inventario.....	13
3.2.1 Processo di manutenzione degli strati superficiali di asfalto.....	13
3.2.2 Raccolta dati.....	15
3.2.2.1 Conglomerato bituminoso.....	15
3.2.2.2 Emulsione bituminosa.....	16
3.2.2.3 Modificante con polverino di gomma.....	16
3.2.2.4 Macchine da cantiere.....	17
3.2.2.5 Dati di input per l'analisi.....	20
3.2.3 Riciclo del fresato e analisi dei potenziali impatti evitati.....	34
3.2.4 Risultati di inventario.....	35
4. Analisi degli impatti energetico-ambientali e interpretazione dei risultati.....	36
4.1 Impatti energetico-ambientali per la Tipologia di strada 1.....	36
4.2 Impatti energetico-ambientali per la Tipologia di strada 2.....	43
4.3 Impatti energetico-ambientali per la Tipologia di strada 3.....	51
4.4 Il conglomerato bituminoso: analisi di dominanza e analisi di sensibilità.....	59
4.5 Impatti evitati connessi all'utilizzo del fresato all'esterno dei confini del sistema.....	62
5. Conclusioni.....	64
6. Bibliografia.....	65

1. Premessa

Il presente report descrive le attività svolte dal Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) dell'Università degli Studi di Palermo nell'ambito del contratto di ricerca applicata tra Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile e Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM).

In dettaglio, il report descrive l'attività riguardante "LCA screening comparativo degli impatti ambientali di ciclo di vita per la realizzazione di pavimentazioni stradali con tecnologie innovative ad elevata efficienza delle risorse rispetto a tecnologie convenzionali".

Nella prima fase di svolgimento dell'attività è stato definito l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio, in accordo alla struttura della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) descritta dalle norme della serie UNI EN ISO 14040 [1] [2].

Successivamente è stata effettuata una raccolta dati per redigere l'inventario dei materiali e delle fonti energetiche impiegati, dei macchinari utilizzati, dei rifiuti prodotti, dei co-prodotti e sotto-prodotti generati durante il processo di realizzazione delle pavimentazioni stradali.

I dati raccolti sono stati elaborati per la computazione dei consumi di materie prime ed energia e delle emissioni in aria, acqua e suolo, in un'ottica di ciclo di vita. I risultati ottenuti sono riferiti a 1 m² di strada e sono stati sintetizzati in specifici indici energetico-ambientali.

2. Life Cycle Assessment

La maggior parte delle attività antropiche richiede il consumo di materie prime ed energia, nonché il rilascio di rifiuti solidi, liquidi e gassosi nell'ambiente. Tutto questo determina degli effetti negativi sull'uomo e sull'ambiente, dai danni alla salute all'alterazione del paesaggio. Al fine di controllare tali effetti sono stati sviluppati degli strumenti di valutazione degli impatti energetico-ambientali; tra questi uno dei più completi è la Life Cycle Assessment (LCA), che offre una visione complessiva al problema dell'inquinamento. Il suo obiettivo è quello di valutare gli impatti associati ad un determinato processo o prodotto durante l'intero ciclo di vita.

Le origini della LCA risalgono alla fine degli anni '60, quando alcuni ricercatori che si occupavano del problema del consumo di risorse e della generazione di reflui nei processi industriali decisero di studiare i sistemi produttivi da un punto di vista ambientale seguendo il cammino percorso dalle materie prime, a partire dalla loro estrazione, i processi di trasformazione e di trasporto, fino al loro ritorno alla terra sotto forma di rifiuti. Nacque così la metodologia "from cradle to grave" (dalla culla alla tomba), nota anche come "cradle to grave analysis", "resource and environmental profile analysis", "life cycle analysis", "eco balance", "energy and environmental analysis".

Negli anni '70 si ebbero primi esempi di applicazione della LCA, utilizzata come supporto alle decisioni da alcune aziende statunitensi, dall'agenzia per la protezione dell'ambiente americana (EPA, Environmental Protection Agency) e da alcuni produttori inglesi di bottiglie.

Nel caso delle ricerche nordamericane, si trattava di studi svolti sotto il nome di REPA, Resource and Environmental Profile Analysis, che avevano come obiettivo la caratterizzazione del ciclo di vita di alcuni materiali impiegati in produzioni industriali, per effettuare un confronto da un punto di vista ambientale tra diversi materiali. La metodologia REPA introduceva l'energia nel processo di valutazione, concentrando l'attenzione sulla limitatezza delle risorse naturali e sul loro eccessivo sfruttamento.

Negli anni '80 in Europa fu pubblicato il manuale di Analisi Energetica che, a partire dall'esperienza dei produttori inglesi di bottiglie, offriva una descrizione dettagliata del procedimento analitico che oggi costituisce una parte fondamentale della LCA.

Il termine LCA, Life Cycle Assessment (Analisi del Ciclo di Vita), venne coniato nel 1993 durante il Congresso SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) a Smuggler Notch (Vermont, USA).

L'organizzazione originaria della LCA, secondo lo schema proposto dalla SETAC, comprendeva tre fasi: la prima fase di inventario, in cui le informazioni e i dati raccolti erano organizzati e convertiti in forma standard per fornire una descrizione completa delle caratteristiche fisiche del sistema produttivo oggetto dello studio; una successiva fase di interpretazione, dove i dati fisici

dell'inventario erano correlati a problemi di carattere ambientale e infine una fase di miglioramento, in cui il sistema produttivo era oggetto di campagne di simulazione per cercare di migliorare la sua efficienza complessiva.

Nei primi anni '90 hanno iniziato a concretizzarsi delle iniziative per la standardizzazione della metodologia LCA, con la pubblicazione di manuali e testi specifici, di strumenti di calcolo e banche dati.

Oggi la metodologia LCA si è affermata come strumento di calcolo degli impatti energetico-ambientali di prodotti e servizi, consentendo la diffusione dei temi ambientali ad un pubblico sempre più ampio.

L'analisi del ciclo di vita è uno strumento di analisi ambientale e di supporto alle scelte e decisioni nel campo della pianificazione e delle politiche ambientali.

Secondo la definizione proposta dalla SETAC, la LCA “è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”.

La norma UNI EN ISO 14040 definisce la LCA una “compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto (insieme elementare di unità di processo connesse tra loro per quanto riguarda materia ed energia, che perseguono una o più funzioni definite)”

Le fasi della procedura LCA, proposte dalla norma ISO 14040, sono:

- 1) Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio (Goal and Scope Definition): è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.
- 2) Analisi di Inventario (Life Cycle Inventory Analysis, LCI): è la parte dedicata allo studio del ciclo di vita di un processo o di un'attività; lo scopo principale è quello di analizzare tutti i processi di trasformazione e trasporto attraverso cui i flussi di energia e di materiali permettono il funzionamento del sistema produttivo in esame.
- 3) Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): è lo studio dell'impatto energetico-ambientale provocato dal processo o dall'attività ed ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse

calcolati nell'Inventario. È questa la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di Inventario al giudizio di pericolosità ambientale.

- 4) Interpretazione e Miglioramento (Life Cycle Interpretation): è la parte conclusiva di una LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o delle attività considerati, valutandoli in maniera iterativa con la stessa metodologia LCA in modo da non attuare azioni tali da peggiorare lo stato di fatto.

Il primo punto è di fondamentale importanza in quanto lo scopo dello studio e i confini temporali, geografici e tecnici del sistema analizzato, se ben individuati, consentono di non disperdere energie e risorse e di arrivare al risultato finale nel modo ottimale. In questa fase vengono definiti, mediante assunzioni dettate dall'esperienza e/o dallo scopo ultimo del lavoro, tutti quegli elementi che concorrono all'individuazione del sistema da studiare. Viene inoltre definita l'unità funzionale a cui fare riferimento, cioè l'unità base da utilizzare in tutte le fasi successive per la conversione dei valori in un'unica unità.

Il secondo punto costituisce la fase più dispendiosa dell'intero studio in termini di tempo, in quanto comporta la suddivisione del sistema considerato in tante "unità di processo" quante sono le differenti fasi della catena studiata e l'individuazione, per ognuna di queste unità, degli input (risorse energetiche, materiali, mezzi, ecc.) e degli output (prodotti, residui, rifiuti, sottoprodotti, emissioni, ecc.), in modo da pareggiare tutti i bilanci di massa e di energia dell'intero sistema.

Una volta individuati tutti gli elementi del sistema e raccolti i dati corrispondenti, si passa alla loro elaborazione ed aggregazione in modo da poter misurare gli impatti energetico-ambientali: consumo di energia primaria, cambiamento climatico, acidificazione, eutrofizzazione, distruzione dello strato di ozono, ecc.

La fase conclusiva dell'analisi è quella dell'interpretazione dei risultati e degli impatti.

E' questo un passo molto delicato, nel quale si rivela la bontà o meno delle scelte iniziali (impostazione del sistema e dei suoi confini e individuazione degli scopi).

DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI E DEL CAMPO DI APPLICAZIONE DELLO STUDIO

Questa fase dev'essere sviluppata prima di avviare la LCA, per garantire che l'ampiezza e il grado di approfondimento dell'analisi siano compatibili con il raggiungimento degli obiettivi e che i confini, i dati, le ipotesi, le metodologie, siano ben definiti, comprensibili e trasparenti.

La fase di definizione degli obiettivi indica quali siano:

- i propositi dell'indagine, cioè perché viene avviata una LCA e a quali decisioni, azioni o attività contribuirà;
- le motivazioni della scelta di una LCA per raggiungere i propositi;

- le finalità e gli obiettivi più importanti;
- i destinatari a cui è rivolto lo studio.

La fase di definizione del campo di applicazione dello studio precisa:

- l'Unità Funzionale, è l'unità di misura che fornisce un riferimento per correlare i diversi input e output del processo. Questo riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati di una LCA. Oltre all'unità funzionale si definisce il "flusso di riferimento", cioè la quantità di bene o di servizio necessario per ottenere l'unità funzionale scelta;
- i confini territoriali e temporali: le attività coinvolte in un processo produttivo si svolgono in luoghi diversi lontani tra loro e questo dev'essere preso in considerazione nella valutazione degli impatti complessivi del ciclo di vita di un prodotto, scegliendo i limiti del territorio coinvolto nel processo produttivo. Le scelte possibili per quanto riguarda la variabile spaziale sono:
 - Localizzazione di ciascuna attività, di consumo ed emissione nel luogo in cui avviene.
 - Utilizzo di un'area geografica media di riferimento che rispecchi la situazione di approvvigionamento (cioè un'area tale da poter contenere, almeno teoricamente, sia le attività relative alla produzione, sia le attività riguardanti le materie prime e lo smaltimento o il riciclo dei rifiuti).
 - Scelta della peggiore localizzazione geografica (materie prime e punti di smaltimento lontani dal luogo di produzione).
 - Scelta della migliore localizzazione geografica (materie prime e punti di smaltimento vicini ai siti di produzione).
- La variabile temporale non è considerata esplicitamente nella LCA e ciò comporta dei problemi nella valutazione degli effetti a lungo termine con riferimento a prodotti che hanno tempi di vita molto diversi.
- Livello di analisi: sotto il profilo procedurale, bisogna decidere il livello a cui fermare l'analisi e fissare i limiti entro cui svolgere le indagini. I livelli di analisi da prendere in considerazione sono:
 - Analisi del prodotto: si esamina l'oggetto dell'analisi escludendo i processi secondari di produzione.
 - Analisi tecnologica allargata: oltre all'analisi del prodotto, sono esaminati i processi secondari attuati per rendere disponibili i materiali utilizzati nel processo fondamentale.
 - Analisi del ciclo di vita globale: è un modello teorico di analisi, che include tutte le fasi del prodotto principale e di quelli secondari, i processi di estrazione e di trasporto dei

combustibili nel luogo di utilizzo, i processi di produzione dei macchinari e degli edifici utilizzati nei vari processi, gli impatti diretti, indiretti ecc.

ANALISI DI INVENTARIO

L'inventario identifica e quantifica i flussi di materia ed energia in entrata e in uscita dal sistema prodotto studiato. Si esamina il ciclo di vita del prodotto, in cui sono esaminati i differenti stadi del processo di vita dell'oggetto indagato e gli impatti ad essi associabili, al fine di individuare gli aspetti salienti del processo. In particolare viene studiato il sistema prodotto, cioè il prodotto finale, le materie prime che lo costituiscono, l'energia necessaria e i processi produttivi, i prodotti intermedi con i loro consumi e processi e le relazioni esistenti tra il sistema prodotto e l'ambiente.

La realizzazione dell'inventario è articolata secondo le seguenti fasi:

- Creazione di un diagramma di flusso che schematizza le fasi salienti del ciclo di vita e gli input ed output di ciascuna fase. Tale diagramma di flusso è utilizzato come base dei questionari, da sottoporre all'impianto in cui si esegue lo studio, per la raccolta sistematica dei dati. I dati raccolti sul campo grazie alla collaborazione degli operatori dell'impianto sono definiti "dati primari", mentre quelli ricavati dalla letteratura o da apposite banche dati sono detti "dati secondari".
- Raccolta delle informazioni e dei dati inerenti i flussi di energia e di materia in input e in output nei diversi processi. In particolare nella raccolta dei dati sull'energia occorre considerare diversi contributi:
 - Energia di investimento, relativa alla realizzazione dei macchinari e delle infrastrutture necessarie al sistema per ottenere la funzione desiderata. Tuttavia, tale aliquota di energia non è rilevante perché il periodo di utilizzazione dei macchinari e delle infrastrutture è molto lungo e quindi il carico ambientale risulta trascurabile rispetto a quello del prodotto generato all'interno della struttura.
 - Energia diretta e indiretta: la prima rappresenta la quota di energia consumata per il funzionamento del processo, mentre la seconda comprende l'energia necessaria per produrre e trasportare l'energia e i materiali utilizzati nel processo. Per quanto riguarda l'energia indiretta, un contributo fondamentale è dato dall'energia di produzione e trasporto dei combustibili direttamente utilizzati nel processo.
 - Energia di feedstock: è la quota di energia contenuta nei materiali, potenzialmente combustibili, che sono utilizzati come tali e non come combustibili. Essa è definita come il contenuto energetico dei materiali in input che, in linea di principio, può essere eventualmente recuperato dai prodotti in uscita.

- Energia fornita dai lavoratori: comprende l'energia fornita dai lavoratori durante il processo produttivo, che deriva dal cibo con cui si alimentano gli esseri umani, e l'energia spesa per il loro trasporto sul posto di lavoro.
 - Energia legata ai trasporti: riguarda il contenuto energetico dei combustibili consumati direttamente dal mezzo di trasporto, la quota di energia necessaria per produrre il combustibile, la quota di energia necessaria alla costruzione e alla manutenzione del mezzo, la quota di energia necessaria a realizzare le infrastrutture per permettere il viaggio del mezzo stesso.
- Elaborazione dei dati, per produrre un rendiconto di tutte le informazioni raccolte (Inventory Table). In questa fase si deve tenere in considerazione che il sistema industriale può produrre, oltre all'oggetto indagato, altri prodotti che vengono definiti co-prodotti e sotto-prodotti. In tal caso, per assegnare correttamente gli input e gli output ai singoli sotto-sistemi, si effettua la procedura di "allocazione", che associa i carichi energetici ed ambientali ai vari co-prodotti e sotto-prodotti di un processo. L'allocazione può essere effettuata sulla base di grandezze fisiche (massa, volume, energia), economiche o sociali.

I risultati dell'inventario del ciclo di vita sono presentanti generalmente nelle seguenti categorie di parametri:

1. consumo di materia prime;
2. emissioni in aria;
3. emissioni in acqua;
4. emissioni al suolo;
5. produzione di rifiuti.

ANALISI DEGLI IMPATTI

Questa fase identifica, caratterizza e valuta i potenziali effetti sull'ambiente da parte dei carichi ambientali registrati nella fase di inventario. La struttura di analisi sviluppata dall'ISO prevede tre sottofasi :

1. Classificazione: sono definite le diverse categorie di impatto e, successivamente, si organizzano i dati dell'Inventario, cioè i valori di tutte le emissioni, gassose, liquide e solide, provocate direttamente o indirettamente dalle operazioni considerate, distribuendoli nelle varie categorie di impatto. Le categorie di impatto sono raggruppabili in tre grandi aree:
 - Esaurimento delle risorse: esaurimento delle risorse abiotiche e biotiche.
 - Inquinamento: riscaldamento globale, esaurimento della fascia d'ozono, salute umana, ecotossicità, formazione di ossidanti fotochimici, acidificazione, eutrofizzazione.

- Degradazione degli ecosistemi e del territorio: uso del suolo.
2. Caratterizzazione: a ciascuna emissione è associato un effetto e, se è possibile, questo effetto viene quantificato attraverso degli indicatori.
 3. Normalizzazione e pesatura (fase opzionale): in questa sottofase i risultati ottenuti con l'operazione di classificazione vengono normalizzati, ossia elaborati in modo tale da ottenere indici sintetici con cui valutare complessivamente il sistema in esame e pesati, al fine di determinare l'importanza dei singoli effetti ambientali. La definizione dei metodi di normalizzazione e pesatura si basa su aspetti legati alla politica, alla sociologia, alla cultura ambientale o ai valori portati dai decisori.

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Nella fase di interpretazione si confrontano i risultati delle fasi precedenti con gli obiettivi che lo studio si era posto in partenza e si traggono le conclusioni, in più si indicano quali misure potrebbero essere applicate per ridurre gli impatti sull'ambiente in quelle fasi del ciclo di vita del prodotto più impattanti.

3. Life Cycle Assessment applicata ai processi di manutenzione ordinaria di pavimentazioni stradali

Il presente studio ha l'obiettivo di effettuare una comparazione, basata su un approccio LCA, tra gli impatti energetico-ambientali connessi alla manutenzione ordinaria di pavimentazioni stradali effettuata con tecnologie caratterizzate dalla circolarità delle risorse (tecnologie innovative) e quelli causati da interventi di manutenzione realizzati con tecnologie convenzionali.

3.1 Obiettivi e campo di applicazione dello studio

3.1.1 Obiettivi dello studio

Gli obiettivi dello studio sono i seguenti:

- valutare gli impatti energetico-ambientali connessi ai processi di manutenzione ordinaria di tre tipologie di pavimentazioni stradali realizzate con differenti tecnologie (convenzionali e innovative);
- comparare gli impatti associati all'utilizzo di tecnologie innovative rispetto a quelle convenzionali;
- identificare le fasi del processo e i flussi in input/output responsabili dei maggiori impatti energetico-ambientali.

L'analisi è stata svolta applicando la metodologia LCA in accordo alle norme UNI EN ISO 14040 [1] e UNI EN ISO 14044 [2].

In dettaglio, sono state esaminate le seguenti tipologie di strade, per ciascuna delle quali sono stati considerati interventi di manutenzione con tecnologie innovative e convenzionali:

- Tipologia di strada 1: strade con caratteristiche geometriche idonee ad ospitare un treno di riciclo (ad es. strade con almeno due corsie per ogni senso di marcia, tra cui autostrade, strade urbane ad elevata percorrenza, superstrade, ecc.);
- Tipologia di strada 2: strade con caratteristiche geometriche o di traffico non idonee ad ospitare un treno di riciclo (ad es. strade con lunghezza rettilinea inferiore ai 500 m, strade strette, ecc.);
- Tipologia di strada 3: strade urbane di quartiere non soggette a carichi di traffico pesante (ad es. strade urbane di città).

Gli elementi della pavimentazione stradale interessati dall'intervento di manutenzione sono gli strati di asfalto superficiali identificati come base, binder e usura.

3.1.2 Unità funzionale e confini del sistema

L'unità funzionale selezionata per lo studio è 1 m² di pavimentazione stradale superficiale (base, binder e usura) su cui è effettuato l'intervento di manutenzione ordinaria avente una vita utile di 20 anni, in accordo alle indicazioni delle Product Category Rules per strade e autostrade [3].

Tale unità funzionale può consentire di estendere le valutazioni di impatto a qualsiasi tipologia di strada e per qualsiasi lunghezza.

La fase del ciclo di vita della pavimentazione stradale presa in considerazione nell'analisi è quella relativa al modulo B4 "Sostituzione" definito nella norma EN 15804 sulla sostenibilità delle costruzioni [4]. Tale modulo include tutte le azioni connesse alla sostituzione di un elemento della costruzione (nel caso in specie della pavimentazione stradale) in modo da ripristinare le condizioni necessarie affinché il prodotto in esame (nel caso in specie lo strato di asfalto superficiale costituito da base, binder e usura) possa svolgere la sua funzione garantendo specifiche prestazioni funzionali e tecniche.

I confini del sistema per il modulo B4 includono:

- Approvvigionamento, inclusi i trasporti ai siti di produzione, delle materie prime e dei materiali impiegati per la produzione del conglomerato bituminoso e delle emulsioni bituminose;
- Produzione del conglomerato bituminoso e delle emulsioni bituminose utilizzati per il ripristino degli strati di asfalto superficiali;
- Produzione dei macchinari utilizzati in cantiere;
- Trasporto del conglomerato bituminoso e delle emulsioni bituminose dal sito di produzione al cantiere;
- Processo di ripristino degli strati di asfalto superficiali, inclusi i consumi di combustibile per l'utilizzo dei macchinari e i consumi di acqua;
- Trasporto dei rifiuti di processo riutilizzati nello stesso sistema in esame (fresato d'asfalto) e successivo trattamento di riciclo fino al conseguimento dello stato di "end-of-waste".

Gli impatti connessi alla produzione dei fabbricati e degli impianti di produzione dei materiali e dei macchinari utilizzati nel processo in esame sono stati esclusi dall'analisi, poiché, considerato che tali fabbricati e impianti sono utilizzati per molti anni, si è assunto che gli impatti connessi alla loro produzione siano trascurabili con riferimento all'unità funzionale selezionata.

Inoltre, è stato escluso il processo di trasporto dei macchinari dal deposito al cantiere, nonostante fosse nota la distanza percorsa per effettuare tale trasporto. La stima dell'impatto connesso al suddetto processo per l'unità funzionale selezionata necessita di informazioni sulla superficie totale di pavimentazione stradale ripristinata, poiché durante l'allestimento di un cantiere stradale viene

effettuato un unico trasporto dei macchinari per l'intero intervento di manutenzione. Tale informazione è fortemente variabile in base al tipo di intervento specifico da realizzare, pertanto non è stato possibile stimare un dato medio di superficie stradale soggetta a manutenzione ed includere nei confini del sistema il trasporto dei macchinari presso il cantiere.

Gli impatti e i benefici connessi all'utilizzo del materiale riciclato (fresato d'asfalto), che ha raggiunto lo stato di "end-of-waste", come materia prima seconda in sostituzione di materiali vergini all'esterno dei confini del sistema in esame sono stati valutati separatamente.

3.1.3 Regole di allocazione

Il processo di manutenzione degli strati superficiali di asfalto genera un rifiuto speciale, il fresato d'asfalto, classificato con codice CER 170302 – Miscela bituminosa diversa da quelle di cui alla voce 170301. Tale fresato d'asfalto può essere riutilizzato, previo trattamento, nel sistema in esame in sostituzione degli aggregati (materiali lapidei sotto forma di granuli di diversa dimensione) oppure impiegato nei sottofondi stradali in sostituzione di inerti da cava. Pertanto, il processo in esame può essere considerato un processo multi-output.

Nel caso in cui il fresato d'asfalto sia riutilizzato all'interno del processo di manutenzione (riciclo interno) si può affermare che non vi sia una multifunzionalità: tutti gli impatti connessi al trattamento di riciclo del fresato d'asfalto per il suo riutilizzo sono attribuiti al processo di manutenzione in esame, mentre gli impatti evitati connessi alla sostituzione degli aggregati con il fresato d'asfalto sono computati in maniera indiretta poiché all'aumentare della quantità di fresato d'asfalto impiegato si riduce l'input di aggregati nel sistema e, conseguentemente, si riducono gli impatti connessi a tale input.

Nel caso in cui il fresato d'asfalto sia impiegato nei sottofondi stradali, esso può essere considerato una materia prima seconda. Pertanto, al fine di eliminare la multi-funzionalità nel sistema, è stato applicato il metodo dell'impatto evitato, come sarà meglio esplicitato nel paragrafo 3.2.3. I potenziali impatti evitati connessi alla produzione dei materiali primari potenzialmente sostituibili con il fresato d'asfalto, al netto dei carichi causati dai processi di riciclo del fresato, sono stati conteggiati separatamente dagli impatti connessi agli interventi di manutenzione.

3.1.4 Categorie e metodi di impatto energetico - ambientale

Le categorie di impatto energetico – ambientale selezionate per descrivere le prestazioni del sistema sono:

- Consumo di energia primaria (Cumulative Energy Demand - CED);
- Effetto serra potenziale (Global Warming Potential - GWP);

- Consumo della risorsa acqua (Water Resource Depletion - WRD);
- Uso del suolo (Land Use - LU);
- Consumo di risorse (Resource Consumption - RC).

L'analisi degli impatti energetico - ambientali connessi è stata effettuata utilizzando i seguenti metodi di calcolo:

- Cumulative Energy Demand (CED), per il calcolo dei consumi di energia primaria [5];
- ILCD 2011 Midpoint+, per il calcolo degli impatti sul GWP e WRD [6];
- CML-IA non-baseline V3.04 / EU25, per il calcolo dell'impatto su LU [7].

L'indicatore consumo di risorse è stato calcolato, sulla base delle indicazioni fornite dalla committenza, come somma delle materie prime consumate durante il ciclo di vita nel sistema in esame. In dettaglio, sulla base dei dati di inventario relativi alle materie prime, facenti parte dell'eco-profilo del prodotto, sono state sommate tutte le materie prime aventi come unità di misura grammi e chilogrammi, che rappresentano quindi le aliquote principali del consumo totale di risorse.

3.2 Analisi di inventario

3.2.1 Processo di manutenzione degli strati superficiali di asfalto

Il processo di manutenzione in esame prevede, nel periodo di 20 anni, i seguenti interventi:

- N.1 intervento di manutenzione dello strato di base (vita utile del singolo intervento pari a 20 anni);
- N.2 interventi di manutenzione dello strato di binder (vita utile del singolo intervento pari a 10 anni);
- N.4 interventi di manutenzione dello strato di usura (vita utile del singolo intervento pari a 5 anni).

Il processo di manutenzione include le seguenti fasi:

- Scarifica degli strati di usura, binder e base;
- Pulizia della superficie scarificata;
- Realizzazione dello strato di base, che include lo spandimento dell'emulsione per mano d'ancoraggio, la stesa dello strato di conglomerato bituminoso e la compattazione;
- Realizzazione dello strato di binder, che include lo spandimento dell'emulsione per mano d'ancoraggio, la stesa dello strato di conglomerato bituminoso e la compattazione;
- Realizzazione dello strato di usura, che include lo spandimento dell'emulsione per mano d'attacco, la stesa dello strato di conglomerato bituminoso e la compattazione.

Inoltre, il processo in esame include il trasporto del fresato riutilizzato nel sistema in un impianto di riciclo e la produzione e trasporto del conglomerato bituminoso e dell'emulsione bituminosa.

Gli scenari di manutenzione esaminati, identificati dalla committenza per ogni tipologia di strada, sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1: Scenari di manutenzione esaminati

Tipologia di strada	Tipologia di intervento	Specifiche dell'intervento	Spessore strati
Tipologia di strada 1	Tradizionale	<u>Intervento 1A i):</u> Produzione e stesa a caldo con tecnica Hot Mix Asphalt (HMA) di conglomerato bituminoso con bitume tal quale e basse percentuali di fresato (20% base, 20% binder, 10% usura).	Usura: 6 cm; Binder: 7 cm; Base: 13 cm.
	Tradizionale	<u>Intervento 1A ii):</u> Produzione e stesa a tiepido con tecnica Warm Mix Asphalt (WMA) dei conglomerati bituminosi modificati PMB con basse percentuali di fresato (20% base, 20% binder, 10% usura).	
	Innovativo	<u>Intervento 1 B</u> Produzione e stesa a freddo (Cold Mix Asphalt - CMA con emulsione bituminosa) della base con treno di riciclo. Produzione e stesa a tiepido con tecnica WMA di conglomerato bituminoso con 100% fresato modificato PMA per binder ed usura.	
Tipologia di strada 2	Tradizionale	<u>Intervento 2A</u> Rifacimento di tutti gli strati (base, binder e usura). Stesa a caldo con tecnica HMA di conglomerato bituminoso con bitume tal quale e basse percentuali di fresato (20% base, 20% binder, 10% usura).	Usura: 5 cm; Binder: 6 cm; Base: 18 cm.
	Innovativo	<u>Intervento 2B i)</u> Produzione e stesa a freddo (CMA con emulsione bituminosa). Produzione e stesa a tiepido con tecnica WMA di conglomerato bituminoso con 100% fresato modificato PMA per binder e usura.	
	Innovativo	<u>Intervento 2B ii)</u> Produzione e stesa a freddo (CMA con emulsione bituminosa). Produzione e stesa a tiepido con tecnica WMA di conglomerato bituminoso con 100% di fresato modificato PMA con polverino di gomma per binder e usura.	
Tipologia di strada 3	Tradizionale	<u>Intervento 3A</u> Produzione e stesa a caldo con tecnica di uno strato di base-binder e di usura di conglomerato bituminoso con bitume tal quale e basse percentuali di fresato (20% base, 20% binder, 10% usura).	Usura: 4 cm; Binder: 5 cm; Base: 8 cm.
	Innovativo	<u>Intervento 3B i)</u> Produzione e stesa di uno strato di base-binder a freddo (CMA con emulsione bituminosa). Produzione e stesa strato a tiepido con tecnica WMA di conglomerato bituminoso con 100% di fresato modificato PMA per usura.	
	Innovativo	<u>Intervento 3B ii)</u> Produzione e stesa di uno strato di base-binder a freddo (CMA con emulsione bituminosa). Produzione e stesa a tiepido con tecnica WMA di conglomerato bituminoso con 100% fresato modificato PMA con polverino di gomma per usura.	

PMB: Polymer modified bitumen; PMA: Polymer modified asphalt

3.2.2 Raccolta dati

Per ciascuno degli scenari sopra indicati sono state raccolte informazioni relative ai consumi di materiali e di energia, ai relativi processi di trasporto (mezzi di trasporto impiegati e distanze percorse), ai macchinari impiegati in cantiere e ai relativi consumi di combustibile, come di seguito descritto.

3.2.2.1 Conglomerato bituminoso

La quantità di conglomerato bituminoso necessaria per la manutenzione delle diverse tipologie di strade è stata stimata ipotizzando una densità pari a 2.460 kg/m³ per lo strato di base, a 2.400 kg/m³ per lo strato di binder e a 2.350 kg/m³ per lo strato di usura. Il volume di conglomerato bituminoso impiegato è stato calcolato considerando una superficie di 1 m² avente spessore variabile in funzione dello strato e della tipologia di strada (vedi Tabella 1).

Per quanto riguarda i consumi energetici connessi al processo di produzione del conglomerato bituminoso, non sono disponibili dati primari. Pertanto, si è fatto riferimento a dati di letteratura e stime.

In dettaglio, con riferimento alla produzione di conglomerato bituminoso con tecnica HMA sono stati utilizzati i dati riportati in [8], riferiti ad impianti di media potenzialità in Italia, con riscaldamento da 15 °C a 150-160 °C. Il consumo di energia elettrica è circa 10 MJ/ton, mentre il consumo di combustibile è pari a 7-8 Kg/t di olio combustibile BTZ o 9÷10 m³ di metano. Poiché, su indicazione della committenza, si è assunto che la maggior parte degli impianti di produzione di conglomerato bituminoso in Italia è alimentata ad olio combustibile BTZ, è stato ipotizzato il consumo di questa tipologia di combustibile. Al fine di valutare i riflessi energetico-ambientali sugli eco-profilo finali del conglomerato bituminoso connessi all'utilizzo di metano è stata sviluppata un'analisi di sensibilità.

Sulla base delle indicazioni fornite dalla committenza, la stima dei consumi energetici per la produzione di conglomerato bituminoso con tecnica WMA è stata effettuata ipotizzando che il consumo di elettricità rimanga costante e che si abbia una riduzione del consumo di combustibile (olio combustibile o metano) pari al 6,5% rispetto al processo HMA.

Nel caso di produzione a freddo (CMA) si è ipotizzata una riduzione del consumo di elettricità e di combustibile del 23,2% e dell'84,7%, rispettivamente, rispetto al processo di produzione con tecnica HMA.

Il conglomerato bituminoso è trasportato in cantiere con un camion da 30 ton per una distanza di 50 km.

I dati sulle quantità di bitume, fresato, aggregati (calcarei compatti) e rigenerante impiegati per la produzione di 1 ton di conglomerato bituminoso sono stati forniti dalla committenza e sono riportati nei paragrafi successivi per ciascuna tipologia di scenario esaminato.

Il processo di riciclo del fresato avviene con un vaglio frantoio elettrico (produttività 60 ton/h; consumo orario 110 kWh per lo strato di usura, 65 kWh per lo strato di base e binder).

Tutti i materiali utilizzati per la produzione del conglomerato bituminoso sono trasportati dal sito di produzione al sito utilizzo (impianto di produzione del conglomerato bituminoso) con camion da 30 ton, ad eccezione del rigenerante che è trasportato con furgoncino. Le distanze percorse per il trasporto sono le seguenti: 200 km per il bitume, 50 km per il fresato, 15 km per gli aggregati e 175 km per il rigenerante (dati forniti dalla committenza).

3.2.2.2 Emulsione bituminosa

La quantità di emulsione bituminosa impiegata per m² di superficie è stata fornita dalla committenza ed è costante per tutti gli scenari in esame. In dettaglio, si ha un consumo di 0,5 kg/m² per l'emulsione bituminosa per mano d'attacco (usura) e di 1,6 kg/m² per l'emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio (binder e base). Il trasporto in cantiere è effettuato con un camion da 30 ton che percorre una distanza di 175 km.

L'emulsione bituminosa è composta da bitume (55%) (trasportato con un camion da 30 ton per una distanza di 200 km), acido cloridrico (0,25%) (trasportato con un furgoncino per una distanza di 175 km), agente emulsionante (0,3%) (trasportato con un furgoncino per una distanza di 175 km), acqua da acquedotto (44,45%).

Per quanto riguarda i consumi energetici connessi al processo di produzione dell'emulsione bituminosa, non sono disponibili dati primari. Pertanto, si è ipotizzato un consumo di energia elettrica pari a 2,45 MJ/ton e un consumo di metano pari a 1,66 m³/ton [9].

3.2.2.3 Modificante con polverino di gomma

Il processo di produzione del modificante con polverino di gomma è stato modellizzato impiegando dati di input forniti dalla committenza. In dettaglio, con riferimento alla materia prima in input (pneumatici fuori uso), è stata effettuata l'assunzione di "zero burden", ossia si è ipotizzato che il rifiuto in ingresso all'impianto di produzione di polverino di gomma non abbia nessun carico ambientale [10]. I consumi energetici per il trattamento di 1 ton di pneumatici fuori uso per la produzione di polverino di gomma sono i seguenti:

- Gasolio: 74,14 MJ;
- GPL: 14,31 MJ;

- Energia elettrica: 264,8 kWh.

Si ha, inoltre, un consumo di 97,9 kg di acqua da acquedotto.

La raccolta di 1 ton di pneumatici fuori uso viene effettuata percorrendo una distanza di 37 km, mentre per il trasporto di 1 ton di pneumatici fuori uso agli impianti di trattamento si percorre una distanza di 132 km.

Durante il processo di produzione del polverino di gomma si ha la co-produzione di acciaio e di fibre tessili. In dettaglio, il trattamento di 1 ton di pneumatici fuori uso consente di produrre: 0,72 ton di polverino di gomma, 0,2 ton di acciaio e 0,08 ton di fibre tessili. Pertanto, al fine di stimare i consumi di energia e acqua connessi alla sola produzione di polverino di gomma è stata effettuata un'allocazione per massa, assegnando al polverino di gomma il consumo del 72% degli input, come di seguito indicato:

- Gasolio per polverino di gomma: 53,4 MJ/ton;
- GPL per polverino di gomma: 10,3 MJ/ton;
- Energia elettrica per polverino di gomma: 190,65 kWh/ton;
- Acqua: 70,48 kg/ton.

3.2.2.4 Macchine da cantiere

I macchinari utilizzati in cantiere per gli interventi di manutenzione sono i seguenti (dati forniti dalla committenza):

- Fresa a freddo Bomag BM 2000/60 (Figura 1) per la scarifica;
- Motospazzola Dulevo 7500 (Figura 2) per la pulizia della superficie scarificata;
- Spandilegante Wirtgen SW 16 MC (Figura 3) per lo spandimento delle emulsioni bituminose;
- Finitrice Vogele Super 1800-3i (Figura 4) per la stesa del conglomerato bituminoso;
- Rullo vibrante tandem BW 203 AD-4 (Figura 5) per la compattazione del conglomerato bituminoso;
- Riciclatrice a freddo Wirtgen 2200 CR (Figura 6) per il riciclo in situ del fresato.

Le caratteristiche dei macchinari, relative alla produttività, alla potenza del motore e al consumo specifico di combustibile sono riportate in Tabella 2. Tali dati sono stati utilizzati per il calcolo del consumo di combustibile dei macchinari e per la stima dell'aliquota di macchinario impiegata per la manutenzione di 1 m² di pavimentazione stradale, per i diversi scenari e per i tre strati in esame (base, binder e usura).

Tabella 2: Caratteristiche dei macchinari utilizzati in cantiere

Macchinario	Produttività*	Consumo specifico di combustibile (l/h)
Fresa a freddo	129,5 m ³ /h (binder e usura), 133 m ³ /h (base)	107,15

Mospazzola	32400 m ² /h	15
Spandilegante	150 m ³ /h	75
Finitrice	700 ton/h	33,82
Rullo vibrante	230 m ³ /h (binder e usura), 310 m ³ /h (base)	27,65
Riciclatrice a freddo	80 m ³ /h	75
*La produttività può variare in funzione dello spessore		



Figura 1: Fresa a freddo Bomag BM 2000/60



Figura 2: Mospazzola Dulevo 7500



Figura 3: Spandilegante Wirtgen SW 16 MC



Figura 4: Finitrice Vogele Super 1800-3i



Figura 5: Rullo vibrante tandem BW 203 AD-4



Figura 6: Riciclatrice a freddo Wirtgen 2200 CR

3.2.2.5 Dati di input per l'analisi

Nelle Tabelle seguenti si riportano i dati di input impiegati per la modellizzazione di ciascuno scenario in esame, stimati sulla base delle informazioni fornite dalla committenza.

In dettaglio, con riferimento alla Tipologia di strada 1, i dati di input sui materiali e le fonti energetiche per l'intervento 1A i) e 1A ii) sono riportati nelle Tabelle 3 e 4, rispettivamente, mentre la Tabella 5 mostra i dati di input per i macchinari per i due sopra citati interventi. I dati di input sui materiali e le fonti energetiche e i dati di input per i macchinari per l'intervento 1B sono mostrati nelle Tabelle 6 e 7, rispettivamente.

Le Tabelle 8, 9 e 10 riportano, rispettivamente, i dati di input sui materiali e le fonti energetiche per gli interventi 2A, 2B i) e 2B ii) relativi alla Tipologia di strada 2, mentre i dati di input per i macchinari impiegati in tali interventi sono mostrati in Tabella 11.

Con riferimento alla Tipologia di strada 3 i dati di input sui materiali e le fonti energetiche per gli interventi 3A, 3B i) e 3B ii) sono mostrati, rispettivamente, nelle Tabelle 12, 13 e 14. I dati di input per i macchinari utilizzati negli interventi relativi alla Tipologia di strada 3 sono riportati in Tabella 15.

In Tabella 16 si riportano i dati secondari utilizzati per la modellizzazione degli input sopra indicati, tratti dal database ambientale Ecoinvent 3.3 [11], ad eccezione dell'eco-profilo del bitume che è riferito alla versione 2.2 di Ecoinvent (l'eco-profilo del bitume non è disponibile in Ecoinvent 3.3).

Tabella 3: Tipologia di strada 1. Intervento 1A i) – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (10% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	26,51
		Fresato (kg)	56,09
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,37
		Calcarci compatti (kg)	507,63
		Rigenerante (kg)	0,17
		Energia elettrica (MJ)	5,9
		Olio combustibile BTZ (MJ)	181,55
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
		Metano (MJ)	0,12
		Binder (20% fresato)	Conglomerato bituminoso
Fresato (kg)	64,28		
Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,25		
Calcarci compatti (kg)	259,73		
Rigenerante (kg)	0,19		
Energia elettrica (MJ)	3,36		
Olio combustibile BTZ (MJ)	103,32		
Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)		1,76
	Acido cloridrico (kg)		0,008
	Agente emulsionante (kg)		0,009
	Acqua (kg)		1,42
	Energia elettrica (MJ)		0,008
	Metano (MJ)		0,19
	Base (20% fresato)		Conglomerato bituminoso
Fresato (kg)		58,72	
Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)		0,23	
Calcarci compatti (kg)		237,01	
Rigenerante (kg)		0,18	
Energia elettrica (MJ)		3,06	
Olio combustibile BTZ (MJ)		93,94	
Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio		Bitume puro (kg)	0,88
		Acido cloridrico (kg)	0,004
		Agente emulsionante (kg)	0,0048
		Acqua (kg)	0,71
		Energia elettrica (MJ)	0,004

		Metano (MJ)	0,096
--	--	-------------	-------

Tabella 4: Tipologia di strada 1. Intervento 1A ii) – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (10% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	25,37
		Stirene-butadiene-stirene (kg)	1,29
		Zolfo (kg)	0,38
		Fresato (kg)	56,09
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,37
		Calcri compatti (kg)	507,74
		Rigenerante (kg)	0,06
		Energia elettrica (MJ)	5,9
	Olio combustibile BTZ (MJ)	169,75	
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
Metano (MJ)		0,12	
Binder (20% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	11,32
		Stirene-butadiene-stirene (kg)	0,34
		Zolfo (kg)	0,17
		Fresato (kg)	64,31
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,25
		Calcri compatti (kg)	259,83
		Rigenerante (kg)	0,06
		Energia elettrica (MJ)	3,36
	Olio combustibile BTZ (MJ)	96,6	
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	1,76
		Acido cloridrico (kg)	0,008
		Agente emulsionante (kg)	0,009
		Acqua (kg)	1,42
		Energia elettrica (MJ)	0,008
Metano (MJ)		0,19	
Base (20% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	9,18
		Stirene-butadiene-stirene (kg)	0,28
		Zolfo (kg)	0,14
		Fresato (kg)	58,75
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,23
		Calcri compatti (kg)	237,10
		Rigenerante (kg)	0,06
		Energia elettrica (MJ)	3,06
	Olio combustibile BTZ (MJ)	87,84	
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	0,88
		Acido cloridrico (kg)	0,004
		Agente emulsionante (kg)	0,0048
		Acqua (kg)	0,71

		Energia elettrica (MJ)	0,004
		Metano (MJ)	0,096

Tabella 5: Tipologia di strada 1. Intervento 1A i), 1A ii) – Dati di input sui macchinari

Processo	Tipologia macchinario	Consumo diesel (MJ/m ²)	Aliquota di macchinario impiegata (unità)
Rimozione strato usura	Fresa a freddo	7,24	1,8E-07
Rimozione strato binder	Fresa a freddo	4,26	1,1E-07
Rimozione strato base	Fresa a freddo	3,83	9,8E-08
Pulizia	Motospazzola	0,07	3,1E-09
Spandimento emulsione base	Spandilegante	0,03	1,0E-09
Stesa strato base	Finitrice	0,54	4,3E-08
Compattazione base	Rullo vibrante	1,33	5,6E-08
Spandimento emulsione binder	Spandilegante	0,06	2,1E-09
Stesa strato binder	Finitrice	0,59	4,8E-08
Compattazione binder	Rullo vibrante	1,46	6,1E-08
Spandimento emulsione usura	Spandilegante	0,04	1,3E-09
Stesa strato usura	Finitrice	1,03	8,4E-08
Compattazione usura	Rullo vibrante	1,91	7,7E-08

Tabella 6: Tipologia di strada 1. Intervento 1B – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	1,12
		Polimeri per PMA (kg)	1,18
		Fresato (kg)	587,51
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	3,87
		Rigenerante (kg)	0,59
		Energia elettrica (MJ)	5,9
		Olio combustibile BTZ (MJ)	169,75
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
		Metano (MJ)	0,12
Binder (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	0,64
		Polimeri per PMA (kg)	0,57
		Fresato (kg)	334,5
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,25
		Rigenerante (kg)	0,33
		Energia elettrica (MJ)	1,3
		Olio combustibile BTZ (MJ)	96,6
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	1,76
		Acido cloridrico (kg)	0,008
		Agente emulsionante (kg)	0,009
		Acqua (kg)	1,42
		Energia elettrica (MJ)	0,008
		Metano (MJ)	0,19
Base (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Emulsione bituminosa da riciclaggio - Bitume (kg)	19,98
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Sali d'ammonio quaternari (kg)	0,08
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acido cloridrico (kg)	0,01
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acqua (kg)	3,99
		Fresato (kg)	290,96
		Cemento (kg)	4,37
		Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)
	Acido cloridrico (kg)		0,004
	Agente emulsionante (kg)		0,0048
	Acqua (kg)		0,71
	Energia elettrica (MJ)		0,004
	Metano (MJ)		0,096

Tabella 7: Tipologia di strada 1. Intervento 1B – Dati di input sui macchinari

Processo	Tipologia macchinario	Consumo diesel (MJ/m²)	Aliquota di macchinario impiegata (unità)
Rimozione strato usura	Fresa a freddo	7,24	1,8E-07
Rimozione strato binder	Fresa a freddo	4,26	1,1E-07
Rimozione e stesa strato base	Riciclatrice	4,45	1,6E-07
Pulizia	Motospazzola	0,07	3,1E-09
Spandimento emulsione base	Spandilegante	0,03	1,0E-09
Compattazione base	Rullo vibrante	1,33	5,6E-08
Spandimento emulsione binder	Spandilegante	0,06	2,1E-09
Stesa strato binder	Finitrice	0,59	4,8E-08
Compattazione binder	Rullo vibrante	1,46	6,1E-08
Spandimento emulsione usura	Spandilegante	0,04	1,3E-09
Stesa strato usura	Finitrice	1,03	8,4E-08
Compattazione usura	Rullo vibrante	1,91	7,7E-08

Tabella 8: Tipologia di strada 2. Intervento 2A – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (10% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	22,09
		Fresato (kg)	46,74
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,31
		Calcarei compatti (kg)	423,02
		Rigenerante (kg)	0,14
		Energia elettrica (MJ)	4,9
		Olio combustibile BTZ (MJ)	151,3
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
		Metano (MJ)	0,12
Binder (20% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	10,14
		Fresato (kg)	55,09
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,21
		Calcarei compatti (kg)	222,62
		Rigenerante (kg)	0,17
		Energia elettrica (MJ)	2,88
		Olio combustibile BTZ (MJ)	88,56
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	1,76
		Acido cloridrico (kg)	0,008
		Agente emulsionante (kg)	0,009
		Acqua (kg)	1,42
		Energia elettrica (MJ)	0,008
		Metano (MJ)	0,19
Base (20% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	13,28
		Fresato (kg)	81,30
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,32
		Calcarei compatti (kg)	328,16
		Rigenerante (kg)	0,24
		Energia elettrica (MJ)	4,23
		Olio combustibile BTZ (MJ)	130,07
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	0,88
		Acido cloridrico (kg)	0,004
		Agente emulsionante (kg)	0,0048
		Acqua (kg)	0,71
		Energia elettrica (MJ)	0,004
		Metano (MJ)	0,096

Tabella 9: Tipologia di strada 2. Intervento 2B i) – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	0,93
		Fresato (kg)	489,59
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	3,23
		Polimeri per PMA (kg)	0,98
		Rigenerante (kg)	0,49
		Energia elettrica (MJ)	4,92
		Olio combustibile BTZ (MJ)	141,5
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
		Metano (MJ)	0,12
Binder (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	0,55
		Fresato (kg)	286,68
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	1,11
		Polimeri per PMA (kg)	0,49
		Rigenerante (kg)	0,29
		Energia elettrica (MJ)	2,88
		Olio combustibile BTZ (MJ)	82,8
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	1,76
		Acido cloridrico (kg)	0,008
		Agente emulsionante (kg)	0,009
		Acqua (kg)	1,42
		Energia elettrica (MJ)	0,008
		Metano (MJ)	0,19
Base (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Emulsione bituminosa da riciclaggio - Bitume (kg)	8,45
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Sali d'ammonio quaternari (kg)	0,11
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acido cloridrico (kg)	0,01
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acqua (kg)	5,52
		Fresato (kg)	402,87
		Cemento (kg)	6,05
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	1,57
		Energia elettrica (MJ)	3,24
		Olio combustibile BTZ (MJ)	19,9
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	0,88
		Acido cloridrico (kg)	0,004
		Agente emulsionante (kg)	0,0048
		Acqua (kg)	0,71
		Energia elettrica (MJ)	0,004
		Metano (MJ)	0,096

Tabella 10: Tipologia di strada 2. Intervento 2B ii) – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	0,93
		Fresato (kg)	488,26
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	3,23
		Modificante con polverino di gomma (kg)	2,31
		Rigenerante (kg)	0,49
		Energia elettrica (MJ)	4,92
		Olio combustibile BTZ (MJ)	141,5
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
		Metano (MJ)	0,12
Binder (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	0,55
		Fresato (kg)	285,78
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	1,11
		Modificante con polverino di gomma (kg)	1,38
		Rigenerante (kg)	0,29
		Energia elettrica (MJ)	2,88
		Olio combustibile BTZ (MJ)	82,8
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	1,76
		Acido cloridrico (kg)	0,008
		Agente emulsionante (kg)	0,009
		Acqua (kg)	1,42
		Energia elettrica (MJ)	0,008
		Metano (MJ)	0,19
Base (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Emulsione bituminosa da riciclaggio - Bitume (kg)	8,45
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Sali d'ammonio quaternari (kg)	0,11
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acido cloridrico (kg)	0,01
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acqua (kg)	5,52
		Fresato (kg)	402,87
		Cemento (kg)	6,05
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	1,57
		Energia elettrica (MJ)	3,24
		Olio combustibile BTZ (MJ)	19,9
		Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)
	Acido cloridrico (kg)		0,004
	Agente emulsionante (kg)		0,0048
		Acqua (kg)	0,71
	Energia elettrica (MJ)	0,004	

		Metano (MJ)	0,096
--	--	-------------	-------

Tabella 11: Tipologia di strada 2. Intervento 2A, 2B i), 2B ii)– Dati di input sui macchinari

Processo	Tipologia macchinario	Consumo diesel (MJ/m ²)	Aliquota di macchinario impiegata (unità)
Rimozione strato usura	Fresa a freddo	6,04	1,6E-07
Rimozione strato binder	Fresa a freddo	3,66	9,4E-08
Rimozione strato base	Fresa a freddo	5,29	1,4E-07
Pulizia	Motospazzola	0,07	3,1E-09
Spandimento emulsione base	Spandilegante	0,03	1,1E-09
Stesa strato base	Finitrice	0,74	6,0E-08
Compattazione base	Rullo vibrante	1,84	7,8E-08
Spandimento emulsione binder	Spandilegante	0,06	2,1E-09
Stesa strato binder	Finitrice	0,50	4,1E-08
Compattazione binder	Rullo vibrante	1,25	5,2E-08
Spandimento emulsione usura	Spandilegante	0,04	1,3E-09
Stesa strato usura	Finitrice	0,86	7,0E-08
Compattazione usura	Rullo vibrante	1,59	6,5E-08

Tabella 12: Tipologia di strada 3. Intervento 3A – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (10% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	17,67
		Fresato (kg)	37,39
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,25
		Calcari compatti (kg)	338,42
		Rigenerante (kg)	0,11
		Energia elettrica (MJ)	3,9
		Olio combustibile BTZ (MJ)	121,03
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
		Metano (MJ)	0,12
Base-Binder (20% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	10,84
		Fresato (kg)	58,92
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	0,23
		Calcari compatti (kg)	238,08
		Rigenerante (kg)	0,18
		Energia elettrica (MJ)	3,08
		Olio combustibile BTZ (MJ)	94,71
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	0,88
		Acido cloridrico (kg)	0,004
		Agente emulsionante (kg)	0,0048
		Acqua (kg)	0,7112
		Energia elettrica (MJ)	0,004
		Metano (MJ)	0,096

Tabella 13: Tipologia di strada 3. Intervento 3B i) – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	0,75
		Fresato (kg)	391,67
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	2,58
		Polimeri per PMA (kg)	0,79
		Rigenerante (kg)	0,39
		Energia elettrica (MJ)	3,94
		Olio combustibile BTZ (MJ)	113,1
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
		Metano (MJ)	0,12
Base-Binder (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Emulsione bituminosa da riciclaggio - Bitume (kg)	7,85
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Sali d'ammonio quaternari (kg)	0,10
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acido cloridrico (kg)	0,01
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acqua (kg)	5,13
		Fresato (kg)	290,57
		Cemento (kg)	2,72
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	1,13
		Energia elettrica (MJ)	2,36
		Olio combustibile BTZ (MJ)	14,5
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Bitume puro (kg)	0,88
		Acido cloridrico (kg)	0,004
		Agente emulsionante (kg)	0,0048
		Acqua (kg)	0,71
		Energia elettrica (MJ)	0,004
Metano (MJ)		0,096	

Tabella 14: Tipologia di strada 3. Intervento 3B ii) – Dati di input sui materiali e le fonti energetiche

Strato	Componente	Materiale	Quantità
Usura (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Bitume puro (kg)	0,74
		Fresato (kg)	390,61
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	2,58
		Modificante con polverino di gomma (kg)	1,85
		Rigenerante (kg)	0,39
		Energia elettrica (MJ)	3,94
	Emulsione bituminosa per mano d'attacco	Olio combustibile BTZ (MJ)	113,1
		Bitume puro (kg)	1,1
		Acido cloridrico (kg)	0,005
		Agente emulsionante (kg)	0,006
		Acqua (kg)	0,89
		Energia elettrica (MJ)	0,005
Base-Binder (100% fresato)	Conglomerato bituminoso	Metano (MJ)	0,12
		Emulsione bituminosa da riciclaggio - Bitume (kg)	7,85
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Sali d'ammonio quaternari (kg)	0,10
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acido cloridrico (kg)	0,01
		Emulsione bituminosa da riciclaggio – Acqua (kg)	5,13
		Fresato (kg)	290,57
		Cemento (kg)	2,72
		Energia elettrica per la triturazione del fresato (MJ)	1,13
		Energia elettrica (MJ)	2,36
	Emulsione bituminosa per mano d'ancoraggio	Olio combustibile BTZ (MJ)	14,5
		Bitume puro (kg)	0,88
		Acido cloridrico (kg)	0,004
		Agente emulsionante (kg)	0,0048
		Acqua (kg)	0,71
		Energia elettrica (MJ)	0,004
	Metano (MJ)	0,096	

Tabella 15: Tipologia di strada 3. Intervento 3A, 3B i), 3B ii)– Dati di input sui macchinari

Processo	Tipologia macchinario	Consumo diesel (MJ/m ²)	Aliquota di macchinario impiegata (unità)
Rimozione strato usura	Fresa a freddo	4,838	1,244E-07
Rimozione strato base-binder	Fresa a freddo	3,931	1,011E-07
Pulizia	Motospazzola	0,067	3,086E-09
Spandimento emulsione base-binder	Spandilegante	0,029	1,067E-09
Stesa strato base-binder	Finitrice	0,540	4,400E-08
Compattazione base-binder	Rullo vibrante	1,344	5,652E-08
Spandimento emulsione usura	Spandilegante	0,036	1,333E-09
Stesa strato usura	Finitrice	0,690	5,623E-08
Compattazione usura	Rullo vibrante	1,274	5,161E-08

Tabella 16: Dati secondari utilizzati per modellizzare gli input impiegati per la realizzazione degli interventi

Materiale	Dato secondario
Bitume	Bitumen, at refinery
Calcri compatti	Limestone, crushed, washed production
Rigenerante	Ethylenediamine production
Acido cloridrico	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state (RER) hydrochloric acid production, from the reaction of hydrogen with chlorine
Agente emulsionante	Ethylenediamine production
Acqua	Tap water (Europe without Switzerland) tap water production, conventional treatment
Stirene-butadiene-stirene	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (RER) production
Zolfo	Sulphur (Europe without Switzerland) petroleum refinery operation
Polimeri per PMA	Polyethylene, low density, granulate (RER) production
Cemento	Cement, unspecified (Europe without Switzerland) cement, Portland to generic market for cement, unspecified
Energia elettrica	Electricity, low voltage (IT), electricity voltage transformation from medium to low voltage
Olio combustibile	Heat, central or small-scale, other than natural gas (Europe without Switzerland) heat production, light fuel oil, at boiler 100 kW, non-modulating
Diesel	Diesel, burned in building machine (GLO) processing, only diesel combustion
GPL	Heat, central or small-scale, natural gas (GLO) propane extraction, from liquefied petroleum gas
Produzione macchina da cantiere	Building machine (RER) production

3.2.3 Riciclo del fresato e analisi dei potenziali impatti evitati

Come indicato nel paragrafo 2.1.3, il processo di manutenzione delle pavimentazioni stradali produce il fresato d'asfalto, un rifiuto speciale che può essere riutilizzato, previo trattamento, nei sottofondi stradali in sostituzione di inerti da cava.

Al fine di stimare i potenziali impatti evitati netti connessi alla produzione del fresato di asfalto che è riutilizzato all'esterno dei confini del sistema in esame è stato applicato il metodo dell'impatto evitato.

In dettaglio, si è ipotizzato che il fresato sia trasportato con un camion da 30 ton per una distanza di 50 km dal cantiere al sito di trattamento, dove il rifiuto è tritato utilizzando un vaglio frantoio che consuma 1,08 kWh/ton. Pertanto, il processo di riciclo del fresato nei sottofondi stradali causa degli impatti connessi al processo di trasporto e al consumo di elettricità.

Inoltre, poiché il fresato di asfalto sostituisce inerti da cava, si ha un impatto evitato connesso all'impiego di una materia prima seconda in sostituzione di una materia prima vergine.

Nel dettaglio, sulla base delle indicazioni fornite dalla committenza, si è ipotizzato che 1 kg di fresato d'asfalto sia utilizzato in sostituzione di 0,6 kg di calcari compatti.

Alla luce di quanto sopra indicato, la valutazione del potenziale impatto evitato netto è stata effettuata considerando l'impatto causato dal trasporto e dal trattamento di 1 kg di fresato e l'impatto evitato connesso alla sostituzione di 0,6 kg di calcari compatti.

3.2.4 Risultati di inventario

L'analisi di inventario è stata eseguita tramite l'utilizzo del software SimaPro, che ha permesso di stimare l'eco-profilo di 1 m² di pavimentazione stradale sottoposta ad interventi di manutenzione, per i diversi scenari esaminati. I risultati dell'inventario sono stati calcolati considerando cinque categorie di impatto:

- Consumo materie prime;
- Emissioni in aria;
- Emissioni in acqua;
- Rifiuti solidi;
- Emissioni al suolo.

4. Analisi degli impatti energetico-ambientali e interpretazione dei risultati

I risultati di inventario sono stati sintetizzati utilizzando le categorie di impatto energetico-ambientale identificate nel paragrafo 3.1.4. I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

Nell'analisi sono stati esclusi gli impatti connessi alla fase di pulizia della pavimentazione stradale post-scarifica perché, oltre ad essere una fase uguale per tutti gli scenari e le tipologie di strade esaminati, essa determina un contributo agli impatti totali inferiore all'1%, pertanto è stato applicato un cut-off basato su criteri ambientali.

4.1 Impatti energetico-ambientali per la Tipologia di strada 1

Le Tabelle 17, 18 e 19 riportano gli impatti energetici connessi all'unità funzionale per la Tipologia di strada 1, rispettivamente per i tre scenari in esame, mentre le Figure 7 e 8 mostrano, rispettivamente, una comparazione degli impatti per tali scenari e l'incidenza percentuale di ciascuno strato di pavimentazione stradale sul totale per ogni singolo scenario.

Dall'analisi dei dati si osserva che lo scenario tradizionale 1Aii tradizionale, in cui si utilizza bitume modificato prodotto con tecnica WMA, ha un impatto minore di circa lo 0,78% rispetto allo scenario 1Ai, mentre lo scenario innovativo 1B consente di ridurre i consumi di energia primaria di circa il 56,6% e il 56,2% rispetto agli scenari 1Ai e 1Aii, rispettivamente.

L'aliquota di energia primaria non rinnovabile rappresenta circa il 99,4% nei due scenari tradizionali e circa il 98,6% in quello innovativo.

Tabella 17: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Ai-tradizionale: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base 1Ai-trad	Manutenzione binder 1Ai-trad	Manutenzione usura 1Ai-trad	Totale 1Ai-trad
Non rinnovabile	MJ	787,70	975,50	1.881,97	3.645,17
Rinnovabile	MJ	5,91	6,74	11,48	24,13
Totale	MJ	793,61	982,24	1.893,45	3.669,31

Tabella 18: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Aii-tradizionale: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base 1Aii-trad	Manutenzione binder 1Aii-trad	Manutenzione usura 1Aii-trad	Totale 1Aii-trad
Non rinnovabile	MJ	775,46	962,73	1.879,46	3.617,65
Rinnovabile	MJ	5,46	6,27	11,24	22,97
Totale	MJ	780,92	969,00	1.890,70	3.640,62

Tabella 19: Tipologia di strada 1 – Scenario 1B-innovativo: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base 1B-inn	Manutenzione binder 1B-inn	Manutenzione usura 1B-inn	Totale 1B-inn
Non rinnovabile	MJ	396,48	459,34	715,59	1.571,42
Rinnovabile	MJ	2,00	6,92	12,89	21,82
Totale	MJ	398,48	466,27	728,49	1.593,24

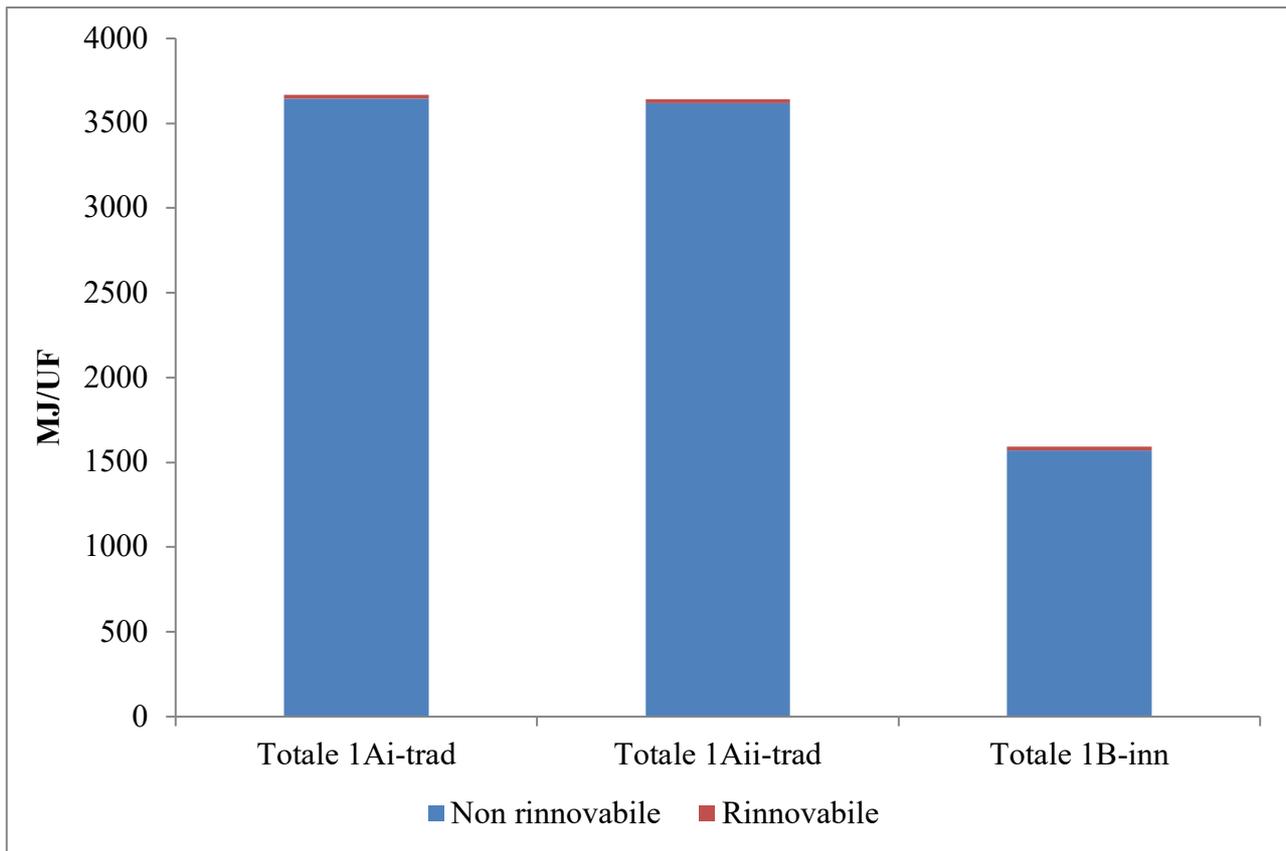


Figura 7: Tipologia di strada 1 – Consumo di energia primaria per i tre scenari

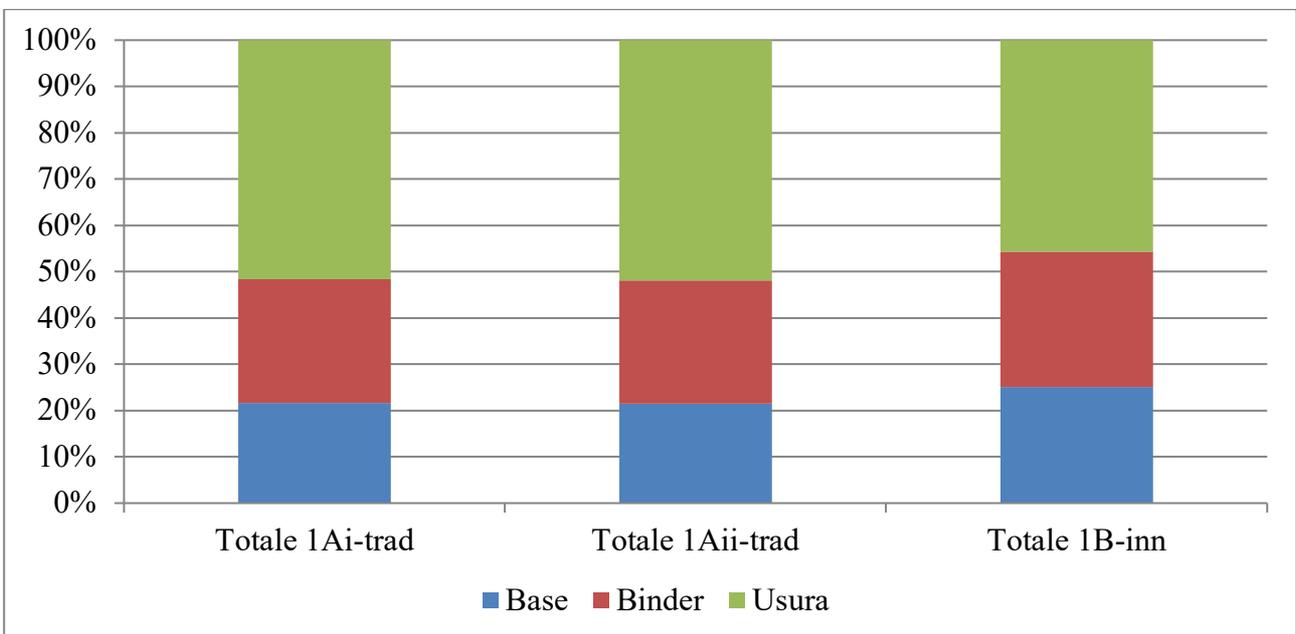


Figura 8: Tipologia di strada 1 – Consumo di energia primaria - Incidenza percentuale dei tre strati su ciascuno scenario

Un'analisi di dominanza per ciascuno scenario consente di stimare l'incidenza degli strati di base, binder e usura sul totale. Si osserva che:

- Lo strato di usura è quello caratterizzato dal maggiore impatto, pari a circa il 51,6% per lo scenario 1Ai, a circa il 51,9% per lo scenario 1Aii e a circa il 45,7% per lo scenario 1B;
- Per entrambi gli scenari tradizionali l'incidenza percentuale degli strati di binder e usura è pari a circa il 26,7% e il 21,5%, rispettivamente;
- L'impatto energetico della base e del binder per lo scenario innovativo rappresenta, rispettivamente, il 25% e il 29,3% del totale.

Analizzando nel dettaglio ciascuno strato (Tabelle 20, 21 e 22) si osserva che i processi caratterizzati dai maggiori impatti energetici sono la produzione del conglomerato bituminoso, il suo trasporto e la produzione dell'emulsione bituminosa. Nello scenario innovativo, con riferimento allo strato di base per il quale si ha il riciclo in situ, il trasporto del conglomerato bituminoso in cantiere ha un impatto trascurabile.

Tabella 20: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Ai-tradizionale: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base	87,8%	5,2%	5,9%	1,1%
Binder	84,8%	4,6%	9,6%	1%
Usura	91,9%	4,2%	3,1%	0,8%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 21: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Aii-tradizionale: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base	87,6%	5,3%	6%	1,1%
Binder	84,5%	4,7%	9,7%	1,1%
Usura	91,9%	4,2%	3,1%	0,8%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 22: Tipologia di strada 1 – Scenario 1B-innovativo: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base	85,5%	0,5%	11,8%	2,2%
Binder	67,9%	9,7%	20,2%	2,2%
Usura	78,9%	10,9%	8,1%	2,1%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Gli impatti ambientali per i tre scenari in esame sono riportati nelle Tabelle 23, 24 e 25, mentre le Figure 9, 10 e 11 riportano una comparazione di tali impatti.

Una comparazione dei due scenari tradizionali evidenzia che:

- L'impatto sull'effetto serra e sul consumo della risorsa acqua è maggiore, rispettivamente, di circa l'1,7% e il 2,6% nello scenario 1Aii rispetto allo scenario 1Ai;

- Lo scenario 1Aii presenta impatti minori rispetto allo scenario 1Ai per le categorie di impatti consumo di risorse (-0,16%) e uso del suolo (-3,4%).

Lo scenario innovativo consente di ottenere una riduzione degli impatti come di seguito dettagliato:

- L'impatto sull'effetto serra si riduce di circa il 25,9% rispetto allo scenario 1Ai e di circa il 24,6% rispetto allo scenario 1Aii;
- Si ha una riduzione del consumo di risorse di circa il 94,7%;
- Il consumo della risorsa acqua risulta inferiore di quello degli scenari 1Ai e 1Aii rispettivamente di circa il 47,3% e 45,9%;
- L'impatto sull'uso del suolo si riduce di circa l'11,7% rispetto a quello dello scenario 1Ai e di circa il 14,7% rispetto a quello dello scenario 1Aii.

Tabella 23: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Ai-tradizionale: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione base 1Ai-trad	Manutenzione binder 1Ai-trad	Manutenzione usura 1Ai-trad	Totale 1Ai-trad
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	19,69	22,64	40,14	82,47
Consumo di risorse	kg materia prima	258,85	286,28	557,41	1.102,53
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	3,12E-02	3,82E-02	7,10E-02	0,14
Uso del suolo	m ² a	0,47	0,53	0,91	1,91

Tabella 24: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Aii-tradizionale: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione base 1Aii-trad	Manutenzione binder 1Aii-trad	Manutenzione usura 1Aii-trad	Totale 1Aii-trad
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	19,63	22,70	41,56	83,89
Consumo di risorse	kg materia prima	258,29	285,65	556,85	1.100,79
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	3,13E-02	3,85E-02	7,43E-02	0,14
Uso del suolo	m ² a	0,45	0,51	0,89	1,85

Tabella 25: Tipologia di strada 1 – Scenario 1B-innovativo: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione base 1B-inn	Manutenzione binder 1B-inn	Manutenzione usura 1B-inn	Totale 1B-inn
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	7,95	19,87	34,35	62,17
Consumo di risorse	kg materia prima	16,62	15,87	25,55	58,04
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	1,60E-02	2,21E-02	3,79E-02	0,08
Uso del suolo	m ² a	0,13	0,55	0,95	1,63

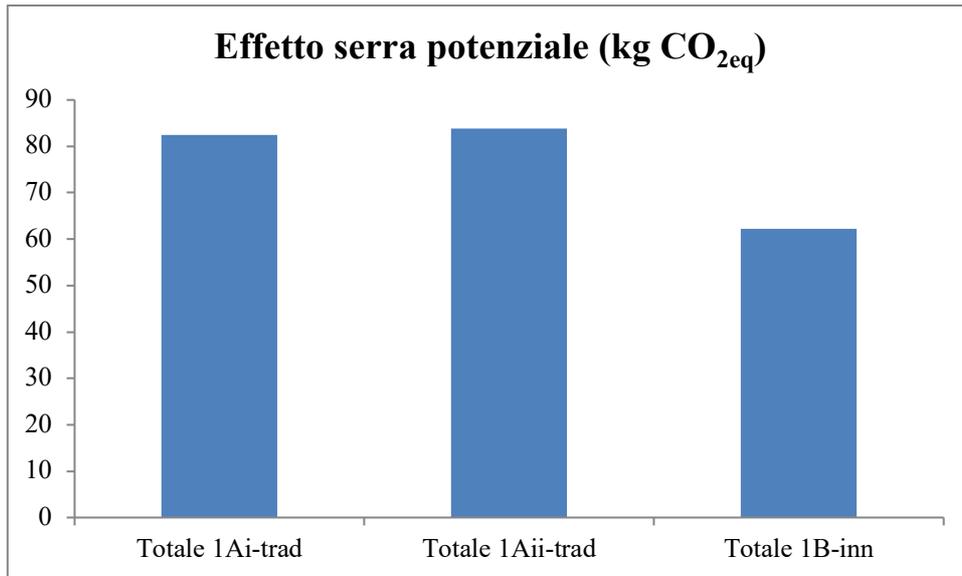


Figura 9: Tipologia di strada 1 – Effetto serra potenziale per i tre scenari

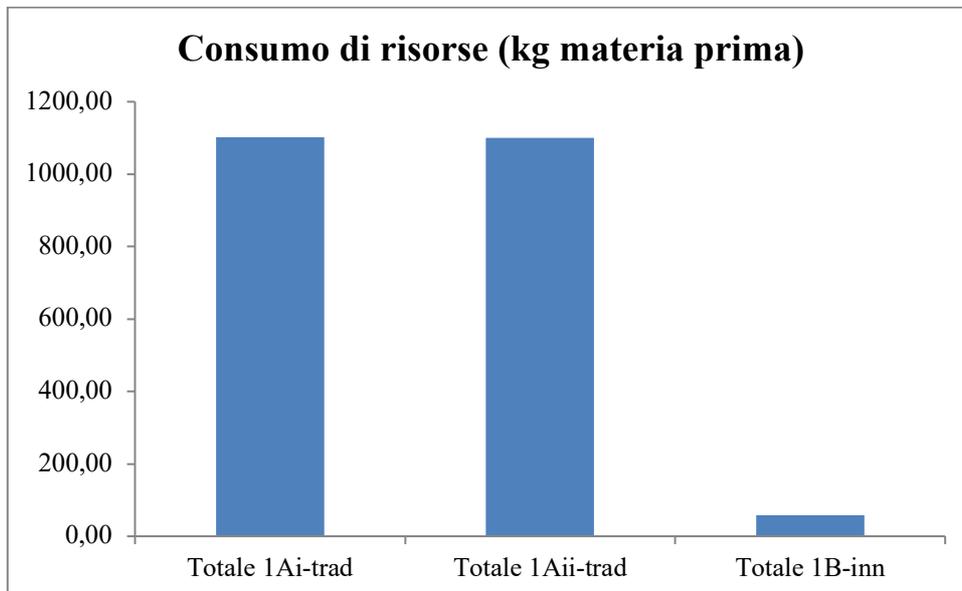


Figura 10: Tipologia di strada 1 – Consumo di risorse per i tre scenari

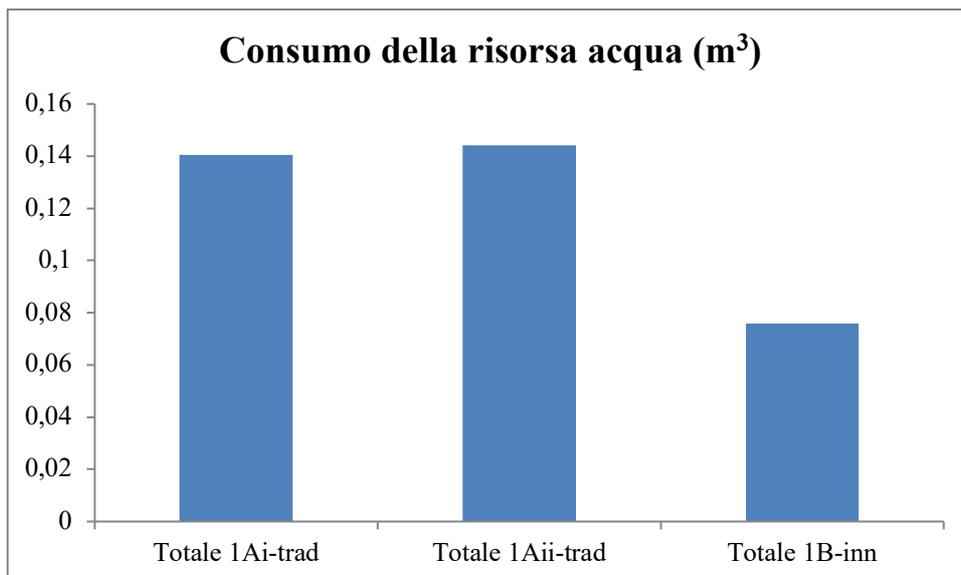


Figura 11: Tipologia di strada 1 – Consumo della risorsa acqua per i tre scenari

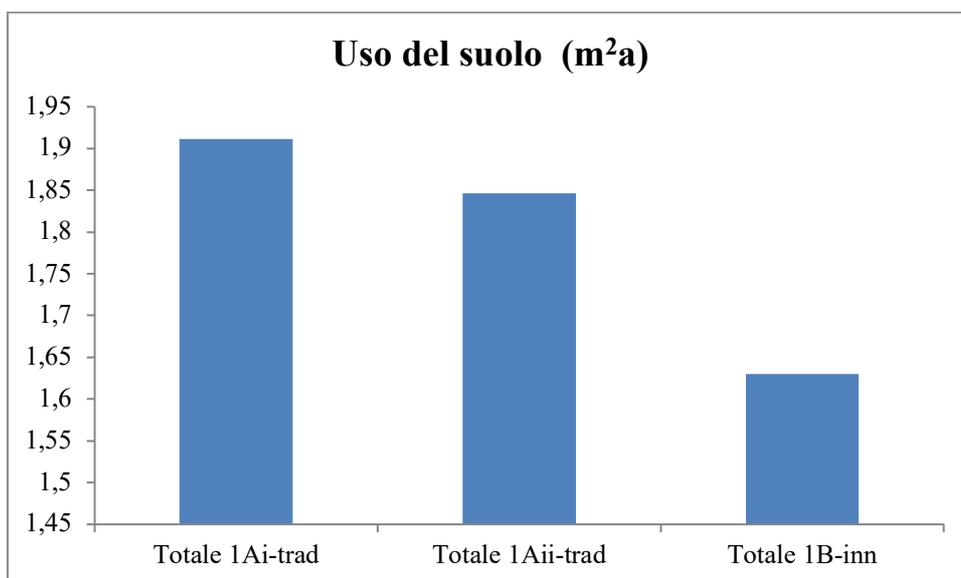


Figura 12: Tipologia di strada 1 – Uso del suolo per i tre scenari

Un'analisi di dettaglio di ciascuno scenario mostra che lo strato di usura ha un'incidenza sui vari impatti variabile dal 47,5% al 51,5% per i due scenari tradizionali, mentre circa il 26-28% è causato dallo strato di binder e circa il 22-24% dallo strato di usura.

Per lo scenario innovativo lo strato di usura contribuisce a circa 55% dell'impatto sull'effetto serra, a circa il 50% del consumo di acqua, a circa il 44% del consumo di risorse, a circa il 58,6% dell'impatto sull'uso del suolo.

Lo strato di binder è responsabile di circa il 32% dell'impatto sull'effetto serra, di circa il 33,5% dell'impatto sull'uso del suolo, di circa il 29% del consumo di acqua e di circa il 27,3% del consumo

di risorse. Tali percentuali sono pari, rispettivamente, a circa 13%, 7,9%, 21% e 28,7% per lo strato di base.

Le Tabelle 26, 27 e 28 mostrano un'analisi di dettaglio dei processi che determinano i maggiori impatti ambientali per ciascuno strato. Con riferimento agli scenari tradizionali la produzione del conglomerato bituminoso è responsabile dei maggiori impatti sul consumo di risorse (circa il 98%), mentre il contributo degli altri processi in esame è trascurabile. Con riferimento all'impatto sull'effetto serra e sull'uso del suolo un contributo pari, rispettivamente, a circa il 12% e a circa il 34% è imputabile al trasporto del conglomerato bituminoso, mentre con riferimento al consumo di acqua vi è un contributo variabile dal 3% a 9,5% connesso alla produzione dell'emulsione bituminosa. Nello scenario innovativo si osserva un andamento simile a quello sopra descritto, con qualche eccezione:

- Per lo strato di base, per il quale si effettua il riciclo del fresato in situ, rispetto agli scenari tradizionali si riduce notevolmente l'impatto del trasporto del conglomerato bituminoso sull'effetto serra (incidenza percentuale di circa l'1,5%) e quello sull'uso del suolo (incidenza percentuale di circa il 6%);
- Il trasporto del conglomerato bituminoso ha un'incidenza di circa il 22-24% sul consumo di risorse per gli strati da binder e usura, mentre il contributo della produzione del conglomerato bituminoso è di circa il 62-70%;
- Aumenta il contributo all'impatto sul consumo d'acqua della produzione di emulsione bituminosa mentre diminuisce quello della produzione di conglomerato bituminoso.

Tabella 26: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Ai-tradizionale: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Effetto serra	Base	82,44%	12,51%	2,27%	2,78%
	Binder	81,23%	11,96%	3,94%	2,87%
	Usura	84,38%	11,86%	1,39%	2,37%
Consumo di risorse	Base	98,25%	1,24%	0,42%	0,09%
	Binder	97,90%	1,23%	0,76%	0,11%
	Usura	98,58%	1,11%	0,24%	0,07%
Consumo di acqua	Base	92,34%	1,50%	5,81%	0,35%
	Binder	88,81%	1,35%	9,50%	0,34%
	Usura	95,26%	1,27%	3,19%	0,28%
Uso del suolo	Base	62,53%	34,62%	1,83%	1,02%
	Binder	61,87%	33,45%	3,18%	1,5%
	Usura	63,55%	34,51%	1,17%	0,77%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 27: Tipologia di strada 1 – Scenario 1Aii-tradizionale: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Effetto serra	Base	82,38%	12,55%	2,28%	2,79%
	Binder	81,28%	11,93%	3,93%	2,86%
	Usura	84,91%	11,45%	1,34%	2,30%
Consumo di risorse	Base	98,25%	1,24%	0,42%	0,09%
	Binder	97,90%	1,23%	0,76%	0,11%
	Usura	98,57%	1,11%	0,24%	0,08%
Consumo di acqua	Base	92,43%	1,49%	5,79%	0,29%
	Binder	88,96%	1,34%	9,42%	0,28%
	Usura	95,53%	1,22%	3,05%	0,20%
Uso del suolo	Base	60,63%	36,38%	1,92%	1,07%
	Binder	60,03%	35,08%	3,33%	1,56%
	Usura	62,84%	35,19%	1,19%	0,78%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 28: Tipologia di strada 1 – Scenario 1B-innovativo: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Effetto serra	Base	85,89%	1,48%	5,64%	6,99%
	Binder	78,61%	13,63%	4,49%	3,27%
	Usura	81,74%	13,86%	1,63%	2,77%
Consumo di risorse	Base	91,06%	0,92%	6,57%	1,45%
	Binder	62,10%	22,16%	13,73%	2,01%
	Usura	68,93%	24,19%	5,33%	1,55%
Consumo di acqua	Base	87,99%	0,14%	11,36%	0,51%
	Binder	80,86%	2,32%	16,37%	0,45%
	Usura	91,26%	2,38%	5,98%	0,38%
Uso del suolo	Base	83,55%	6,04%	6,68%	3,73%
	Binder	62,79%	32,65%	3,10%	1,46%
	Usura	65,30%	32,86%	1,11%	0,73%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

4.2 Impatti energetico-ambientali per la Tipologia di strada 2

Gli impatti energetici relativi alla Tipologia di strada 2 sono riportati nelle Tabelle 29 (scenario 2A tradizionale), 30 (scenario 2Bi innovativo) e 31 (scenario 2Bii innovativo).

Inoltre, la Figura 13 mostra una comparazione dei consumi di energia primaria per i tre scenari in esame e la Figura 14 mostra, per ciascuno scenario, il contributo di ciascuno strato di pavimentazione stradale sul totale.

I risultati dell'analisi energetica evidenziano che l'applicazione di tecnologie innovative di manutenzione stradale, ed in particolare il riciclo del 100% del fresato e la produzione del conglomerato bituminoso con tecniche WMA o CMA, consente di ridurre gli impatti energetici del 51,3% nello scenario 2Bi (utilizzo di bitume modificato PMA) e del 54,4% nello scenario 2Bii (utilizzo di bitume modificato con polverino di gomma). Un confronto tra i due scenari innovativi evidenzia una riduzione del consumo di energia primaria di circa il 6,3% nell'ultimo scenario.

L'aliquota di energia primaria non rinnovabile varia dal 99,3% nello scenario tradizionale al 98,6% in quello innovativo.

Con riferimento al contributo degli strati di base, binder e usura sull'impatto totale per lo scenario tradizionale, esso è pari, rispettivamente, al 30,6%, 24,3% e 45,1%.

Negli scenari innovativi, il maggior contributo all'impatto è imputabile alla realizzazione dello strato di base (39,8% scenario 2Bi; 42,5% scenario 2Bii). Lo strato binder e di usura causano, rispettivamente, circa il 24,2% e il 36% dell'impatto nello scenario 2Bi e circa il 23,6% e 33,9% dell'impatto nello scenario 2Bii.

Tabella 29: Tipologia di strada 2 – Scenario 2A-tradizionale: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base 2A-trad	Manutenzione binder 2A-trad	Manutenzione usura 2A-trad	Totale 2A-trad
Non rinnovabile	MJ	1071,18	850,74	1.577,45	3.499,37
Rinnovabile	MJ	8,08	5,85	9,59	23,52
Totale	MJ	1079,25	856,59	1.587,04	3.522,89

Tabella 30: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bi-innovativo: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base 2B i-inn	Manutenzione binder 2B i-inn	Manutenzione usura 2B i-inn	Totale 2Bi-inn
Non rinnovabile	MJ	676,24	408,35	605,87	1.690,46
Rinnovabile	MJ	6,83	6,01	10,77	23,61
Totale	MJ	683,07	414,36	616,64	1.714,07

Tabella 31: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bii-innovativo: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base 2B ii-inn	Manutenzione binder 2B ii-inn	Manutenzione usura 2B ii-inn	Totale 2Bii-inn
Non rinnovabile	MJ	676,24	372,97	534,08	1.583,29
Rinnovabile	MJ	6,83	5,86	10,30	22,99
Totale	MJ	683,07	378,83	544,38	1.606,28

Analizzando nel dettaglio ciascuno strato (Tabelle 32, 33 e 34) si osserva che i processi caratterizzati dai maggiori impatti energetici sono la produzione del conglomerato bituminoso, il suo trasporto e la produzione dell'emulsione bituminosa. Negli scenari innovativi, con riferimento agli strati di binder e usura si riduce il contributo percentuale della produzione del conglomerato bituminoso e cresce quello relativo al suo trasporto e alla produzione dell'emulsione bituminosa.

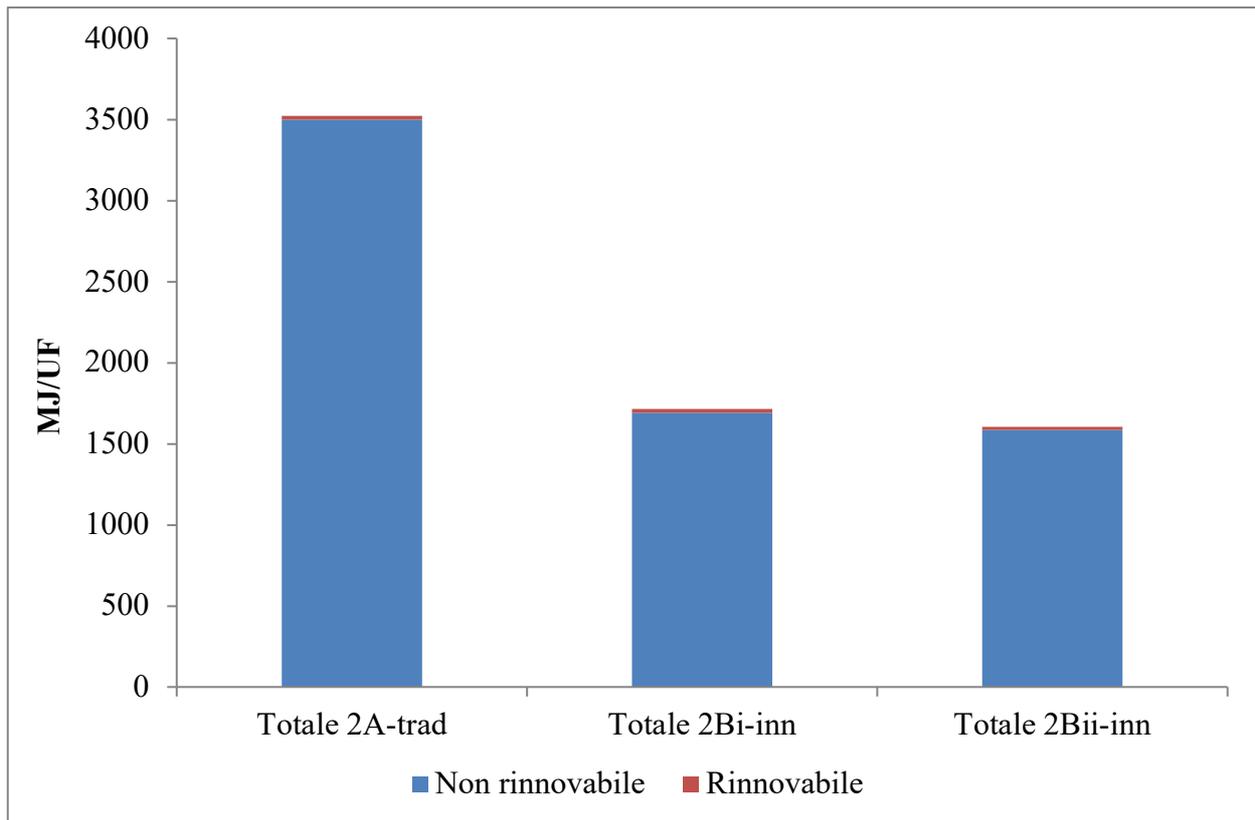


Figura 13: Tipologia di strada 2 – Consumo di energia primaria per i tre scenari

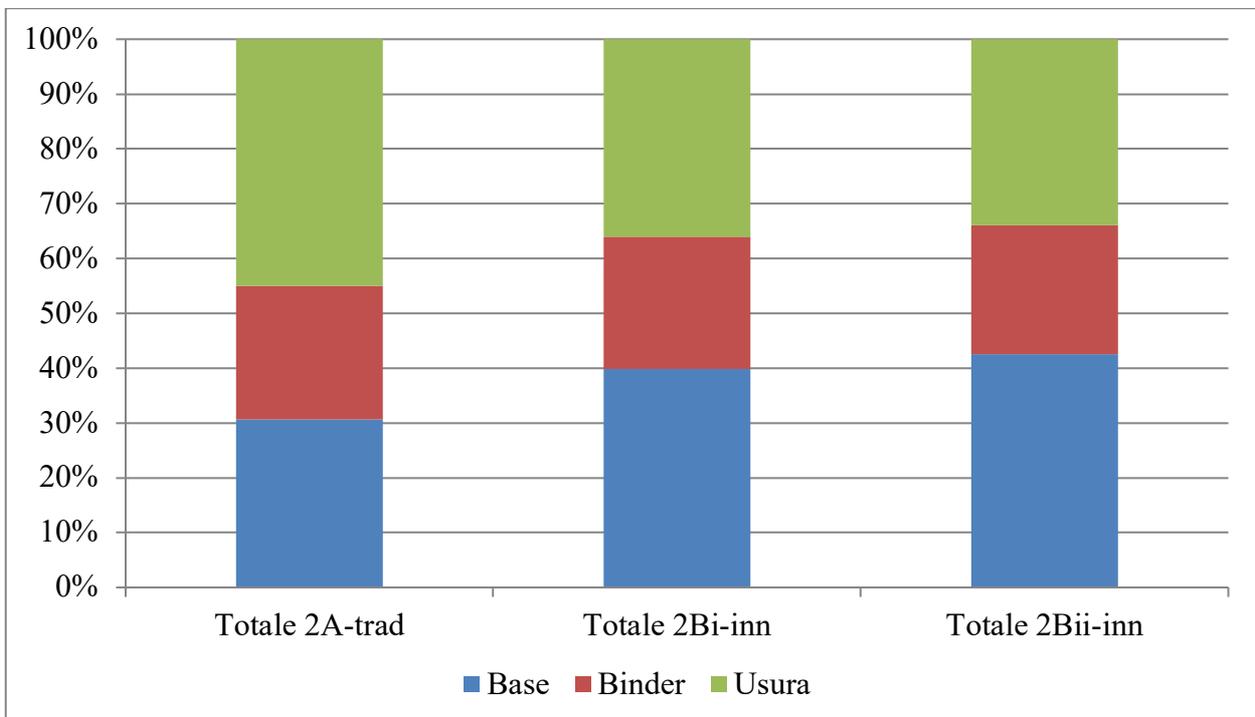


Figura 14: Tipologia di strada 2 – Consumo di energia primaria - Incidenza percentuale dei tre strati su ciascuno scenario

Tabella 32: Tipologia di strada 2 – Scenario 2A-tradizionale: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base	89,3%	5,3%	4,4%	1%
Binder	83,4%	4,5%	11%	1,1%
Usura	91,3%	4,2%	3,7%	0,8%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 33: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bi-innovativo: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base	83,1%	8,3%	6,9%	1,7%
Binder	65,7%	9,4%	22,7%	2,2%
Usura	77,6%	10,7%	9,5%	2,2%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 34: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bii-innovativo: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base	83,1%	8,3%	6,9%	1,7%
Binder	62,5%	10,2%	24,9%	2,4%
Usura	74,7%	12,2%	10,8%	2,3%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Le Tabelle 35, 36 e 37 mostrano gli impatti ambientali per gli scenari esaminati. Inoltre, nelle Figure 15, 16 e 17 è effettuata una comparazione di tali impatti.

Tabella 35: Tipologia di strada 2 – Scenario 2A-tradizionale: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione			Totale
		base 1Ai-trad	binder 1Ai-trad	usura 1Ai-trad	
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	27,02	19,59	33,53	80,15
Consumo di risorse	kg materia prima	357,91	245,74	464,72	1.068,37
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	4,24E-02	3,33E-02	5,95E-02	0,14
Uso del suolo	m ² a	0,64	0,46	0,76	1,86

Tabella 36: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bi-innovativo: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione			Totale
		base 1Aii-trad	binder 1Aii-trad	usura 1Aii-trad	
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	19,82	17,21	28,72	65,75
Consumo di risorse	kg materia prima	31,95	13,96	21,53	67,43
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	3,08E-02	1,96E-02	3,19E-02	0,08
Uso del suolo	m ² a	0,67	0,47	0,80	1,94

Tabella 37: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bii-innovativo: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione base 1B-inn	Manutenzione binder 1B-inn	Manutenzione usura 1B-inn	Totale 1B-inn
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	19,82	16,37	26,97	63,15
Consumo di risorse	kg materia prima	31,95	13,60	20,76	66,31
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	3,08E-02	1,97E-02	3,16E-02	0,08
Uso del suolo	m ² a	0,67	0,49	0,82	1,98

L'utilizzo di soluzioni innovative di manutenzione in sostituzione di soluzioni convenzionali così come l'utilizzo di conglomerato bituminoso modificato con polverino di gomma rispetto a quello modificato con polimeri PMA consente di ottenere una riduzione degli impatti ambientali esaminati, ad eccezione della categoria di impatto relativa all'uso del suolo, che risulta superiore del 4% per lo scenario 2Bi e del 6,1% per lo scenario 2Bii rispetto allo scenario 2A. Un incremento dell'impatto sull'uso del suolo, pari al 2%, si verifica se si confronta lo scenario 2Bii con lo scenario 2Bi.

Con riferimento all'impatto sull'effetto serra, esso si riduce del 18% e del 21,2% comparando lo scenario 2A con gli scenari 2Bi e 2Bii, rispettivamente, mentre il secondo scenario innovativo consente di ottenere una riduzione dell'impatto del 4% rispetto al primo scenario innovativo.

Il consumo di risorse e dell'acqua si riducono, rispettivamente, di circa il 93,7% e il 39,1% negli scenari innovativi, mentre una riduzione dell'1,7% e dello 0,2% si osserva per lo scenario 2Bii rispetto allo scenario 2Bi.

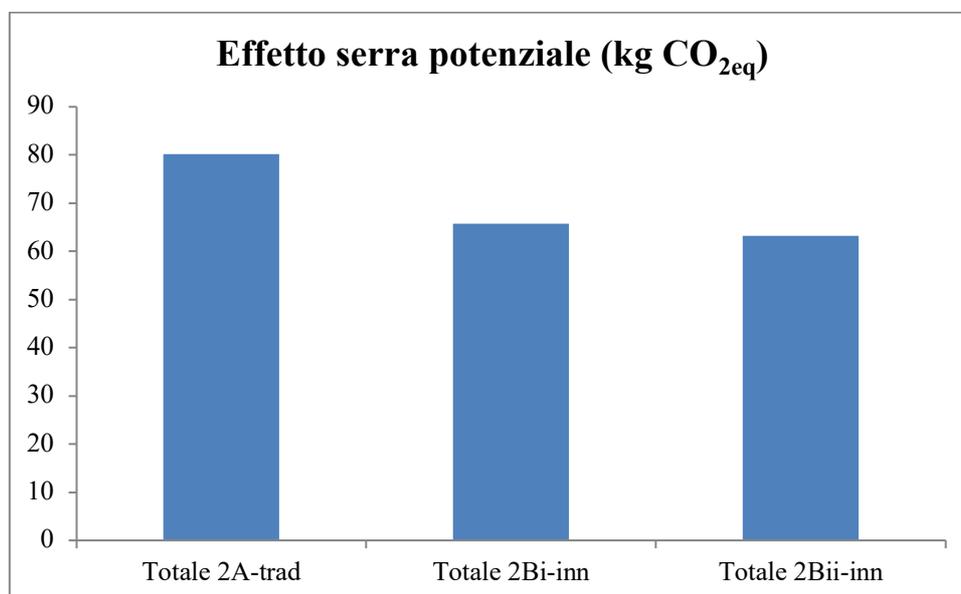


Figura 15: Tipologia di strada 2 – Effetto serra potenziale per i tre scenari

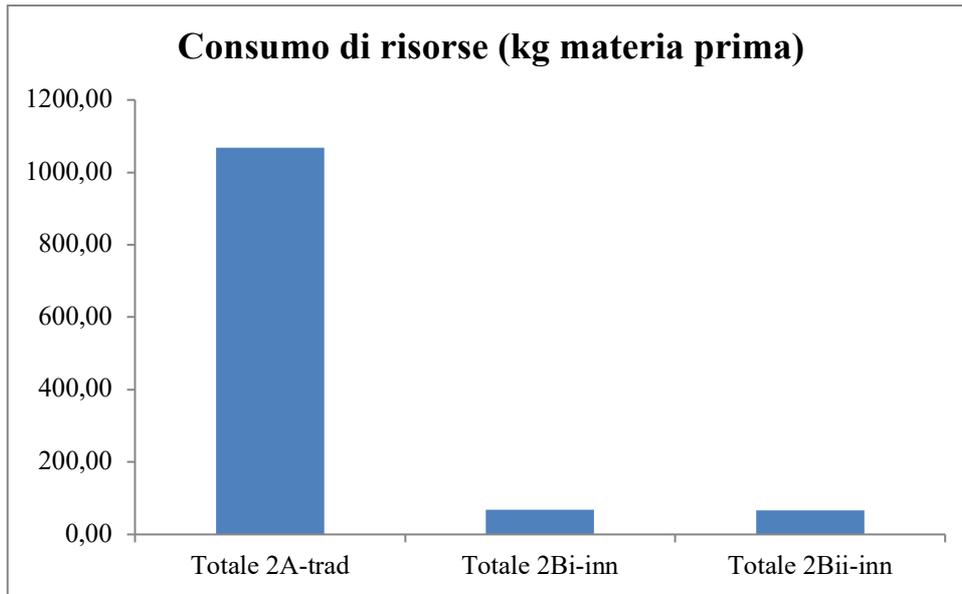


Figura 16: Tipologia di strada 2 – Consumo di risorse per i tre scenari

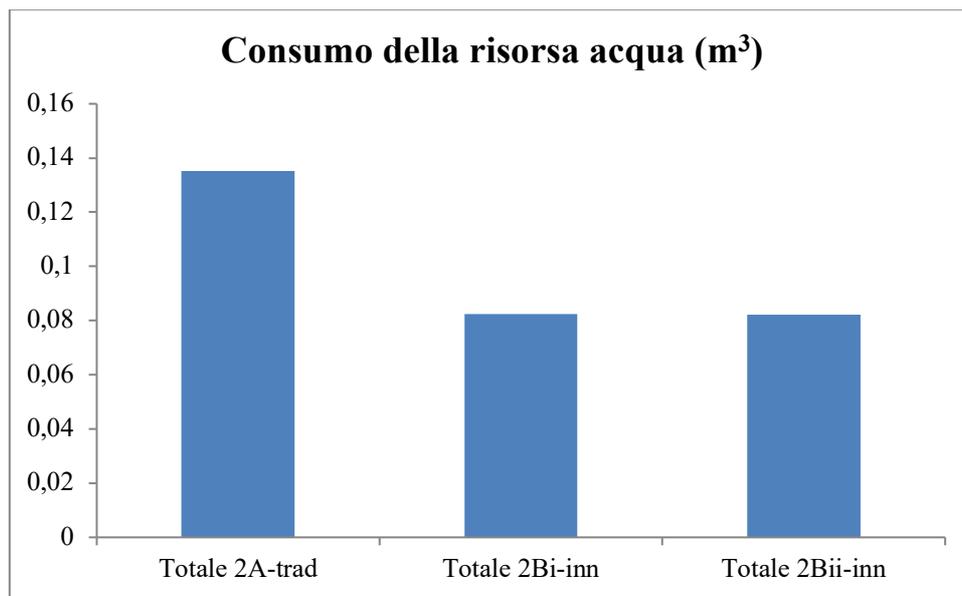


Figura 17: Tipologia di strada 2 – Consumo della risorsa acqua per i tre scenari

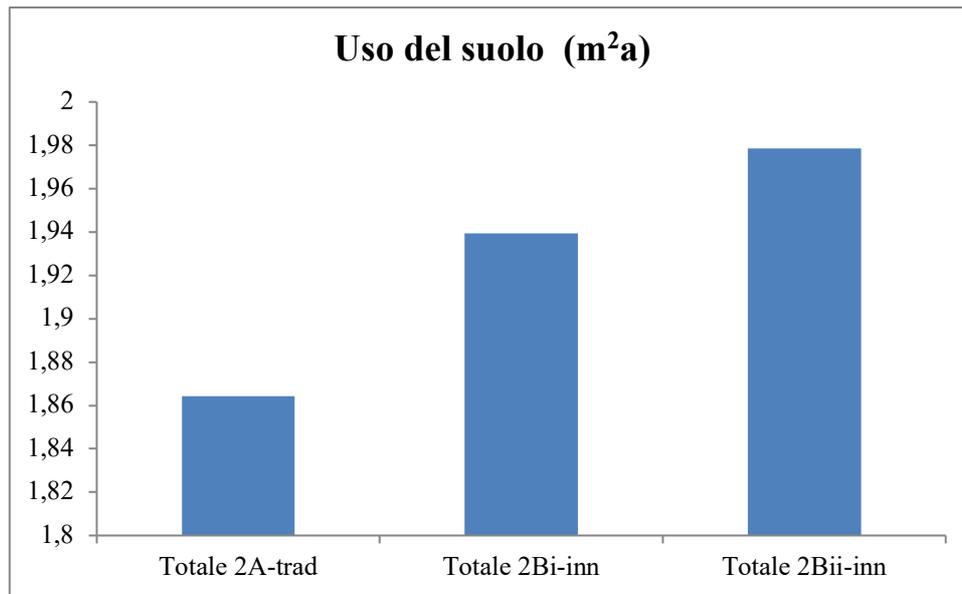


Figura 18: Tipologia di strada 2 – Uso del suolo per i tre scenari

Un'analisi di dominanza sviluppata per valutare il contributo di ciascuno strato di pavimentazione stradale sul singolo scenario evidenzia che:

- Nello scenario 2A i maggiori impatti (41-44% del totale) sono causati dallo strato di usura; lo strato di base ha un'incidenza percentuale sul totale degli impatti di circa il 31-34,5%, mentre il rimanente 23-25% è imputabile allo strato di binder;
- Nello scenario 2Bi lo strato di usura causa i maggiori impatti sull'effetto serra (43,7%) e sull'uso del suolo (41,1%); inoltre esso incide per il 31,9% sul consumo di risorse e per il 38,7% sul consumo di acqua. Lo strato di binder incide per il 26,2% sull'effetto serra, per il 24,4% sull'uso del suolo, per il 20,7% sul consumo di risorse e per il 23,8% sul consumo di acqua. Circa il 30,1% dell'impatto sull'effetto serra è imputabile allo strato di base, che è inoltre responsabile del 34,5% dell'impatto sull'uso del suolo, del 47,4% dell'impatto sul consumo di risorse e del 37,5% dell'impatto sul consumo di acqua.
- Nello scenario 2Bii lo strato di base ha un'incidenza di circa il 31,4% sull'effetto serra, il 33,7% sull'uso del suolo, il 48,2% sul consumo di risorse e il 37,5% sul consumo di acqua. Circa il 25,9% dell'impatto sull'effetto serra è causato dallo strato di binder, che è inoltre responsabile del 24,6% dell'impatto sull'uso del suolo e, rispettivamente, del 20,5% e del 24% degli impatti sul consumo di risorse e di acqua. Lo strato di usura causa circa il 42,7% dell'impatto sull'effetto serra, il 41,7% dell'impatto sull'uso del suolo, il 31,3% dell'impatto sul consumo di risorse e il 38,5% dell'impatto sul consumo di acqua.

Le Tabelle 38, 39 e 40 riportano un'analisi di dominanza per l'identificazione dei processi che causano i maggiori impatti ambientali per ciascuno strato. Nello scenario tradizionale la produzione del conglomerato bituminoso è responsabile dei maggiori impatti sul consumo di risorse (circa il 98%), mentre il contributo degli altri processi in esame è trascurabile. Con riferimento all'impatto sull'effetto serra e sull'uso del suolo un contributo pari, rispettivamente, a circa il 12% e a circa il 34% è imputabile al trasporto del conglomerato bituminoso, mentre con riferimento al consumo di acqua vi è un contributo del trasporto di circa l'1,5%. La produzione dell'emulsione bituminosa ha un'incidenza sugli impatti variabile dallo 0,3% al 4,6%, ad eccezione dell'impatto sul consumo di acqua per lo strato di binder che è di circa il 10,9%. Negli scenari innovativi si osserva che, rispetto allo scenario tradizionale:

- Il trasporto del conglomerato bituminoso ha un'incidenza sul consumo di risorse di circa il 22-25% per gli strati di binder e usura e di circa il 14% per lo strato di base, mentre il contributo della produzione del conglomerato bituminoso è, rispettivamente, di circa il 60-68% e l'82%;
- Aumenta il contributo all'impatto sull'effetto serra del trasporto di conglomerato bituminoso e sul consumo d'acqua della produzione di emulsione bituminosa mentre diminuisce quello della produzione di conglomerato bituminoso.

Tabella 38: Tipologia di strada 2 – Scenario 2A-tradizionale: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Effetto serra	Base	82,99%	12,62%	1,66%	2,73%
	Binder	80,68%	11,85%	4,56%	2,91%
	Usura	84,11%	11,83%	1,66%	2,40%
Consumo di risorse	Base	98,37%	1,24%	0,30%	0,09%
	Binder	97,77%	1,23%	0,89%	0,11%
	Usura	98,53%	1,11%	0,29%	0,07%
Consumo di acqua	Base	93,93%	1,53%	4,28%	0,26%
	Binder	87,53%	1,32%	10,89%	0,26%
	Usura	94,72%	1,27%	3,81%	0,20%
Uso del suolo	Base	62,86%	34,96%	1,33%	0,85%
	Binder	61,57%	33,10%	3,67%	1,66%
	Usura	63,33%	34,43%	1,40%	0,84%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 39: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bi-innovativo: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Effetto serra	Base	76,80%	17,21%	2,26%	3,73%
	Binder	78,01%	13,49%	5,18%	3,32%
	Usura	81,45%	13,81%	1,94%	2,80%
Consumo di risorse	Base	81,76%	13,86%	3,42%	0,96%
	Binder	60,72%	21,59%	15,61%	2,08%
	Usura	68,15%	23,93%	6,33%	1,59%
Consumo di acqua	Base	91,66%	2,10%	5,88%	0,36%
	Binder	78,82%	2,25%	18,49%	0,44%
	Usura	90,17%	2,36%	7,10%	0,37%
Uso del suolo	Base	64,27%	33,63%	1,28%	0,82%
	Binder	62,45%	32,34%	3,59%	1,62%
	Usura	65,12%	32,75%	1,33%	0,80%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 40: Tipologia di strada 2 – Scenario 2Bii-innovativo: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Effetto serra	Base	76,80%	17,21%	2,26%	3,73%
	Binder	76,88%	14,18%	5,45%	3,49%
	Usura	80,24%	14,71%	2,07%	2,98%
Consumo di risorse	Base	81,76%	13,86%	3,42%	0,96%
	Binder	59,69%	22,16%	16,02%	2,13%
	Usura	66,98%	24,81%	6,56%	1,65%
Consumo di acqua	Base	91,66%	2,10%	5,88%	0,36%
	Binder	78,93%	2,23%	18,39%	0,45%
	Usura	90,08%	2,38%	7,16%	0,38%
Uso del suolo	Base	64,27%	33,63%	1,28%	0,81%
	Binder	63,59%	31,36%	3,48%	1,57%
	Usura	66,15%	31,78%	1,29%	0,77%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

4.3 Impatti energetico-ambientali per la Tipologia di strada 3

Il consumo di energia primaria per i tre scenari relativi alla Tipologia di strada 3 sono riportati nelle Tabelle 41, 42 e 43. Le Figure 19 e 20 illustrano, rispettivamente, una comparazione degli impatti energetici per i tre scenari e un'analisi di dominanza che evidenzia il contributo sul totale degli strati di base, binder e usura.

Confrontando lo scenario tradizionale con i due innovativi si osserva che vi è una riduzione dell'impatto di circa il 48,7% (3Bi) e il 51,5% (3Bii), mentre il secondo scenario innovativo consente di ridurre il consumo di energia primaria del 5,3% rispetto al primo.

L'aliquota di energia primaria non rinnovabile varia dal 99,3% nello scenario tradizionale al 98,7% in quello innovativo.

Tabella 41: Tipologia di strada 3 – Scenario 3A-tradizionale: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base-binder 3A-trad	Manutenzione usura 3A-trad	Totale 3A-trad
Non rinnovabile	MJ	855,00	1.273,69	2.128,68
Rinnovabile	MJ	6,08	7,71	13,79
Totale	MJ	861,07	1.281,39	2.142,47

Tabella 42: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bi-innovativo: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base-binder 3Bi-inn	Manutenzione usura 3Bi-inn	Totale 3Bi-inn
Non rinnovabile	MJ	587,35	497,13	1.084,48
Rinnovabile	MJ	4,82	8,65	13,47
Totale	MJ	592,17	505,79	1.097,96

Tabella 43: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bii-innovativo: Consumo di energia primaria

Categoria d'impatto	U.M.	Manutenzione base-binder 3Bii-inn	Manutenzione usura 3Bii-inn	Totale 3Bii-inn
Non rinnovabile	MJ	587,35	438,72	1.026,07
Rinnovabile	MJ	4,82	8,27	13,09
Totale	MJ	592,17	446,99	1.039,16

L'analisi di dominanza sull'incidenza percentuale dei tre strati di pavimentazione stradale (base, binder e usura) sull'impatto totale indica che nello scenario tradizionale circa il 40,2% dell'impatto è imputabile allo strato di base - binder e circa il 59,8% allo strato di usura. Le sopra indicate percentuali sono pari a 53,9% e 46,1% per lo scenario 3Bi e a 57% e 43% per lo scenario 3Bii.

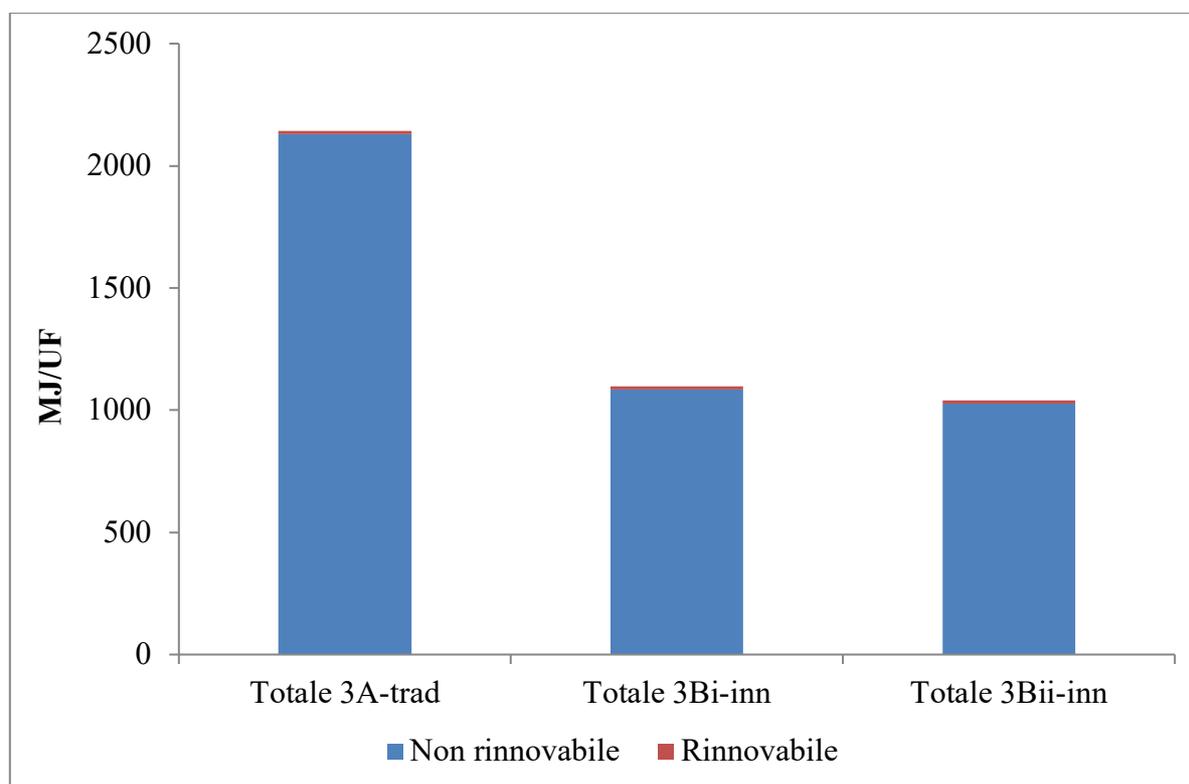


Figura 19: Tipologia di strada 3 – Consumo di energia primaria per i tre scenari

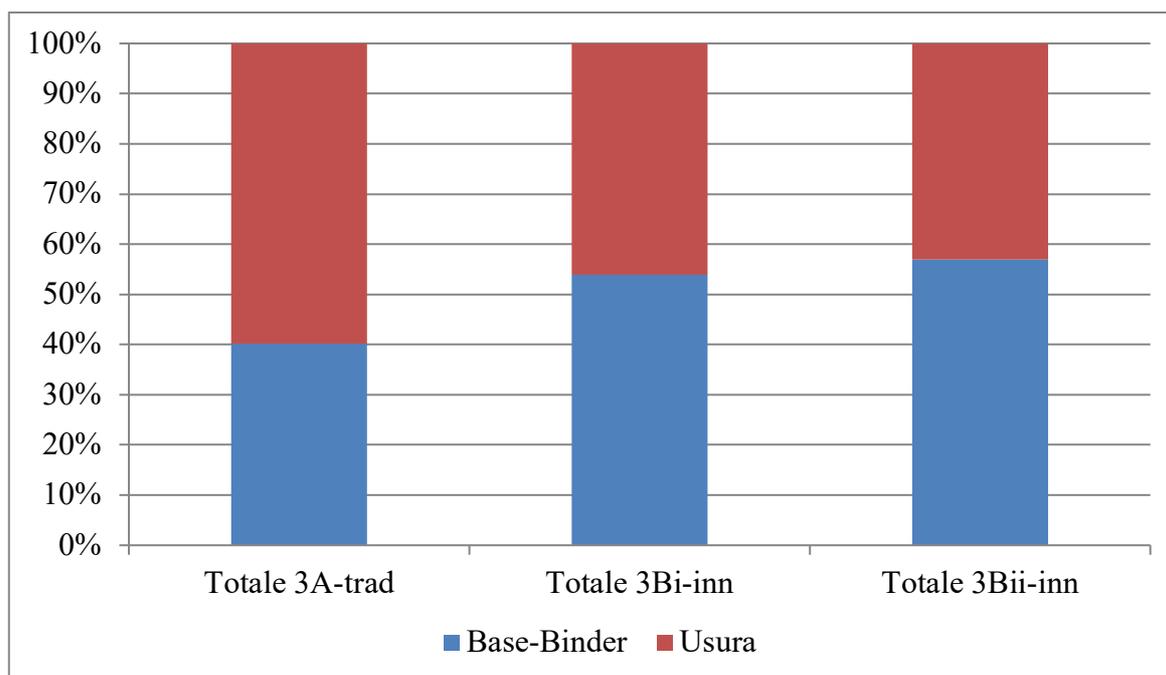


Figura 20: Tipologia di strada 3 – Consumo di energia primaria - Incidenza percentuale dei tre strati su ciascuno scenario

Le Tabelle 44, 45 e 46 consentono di evidenziare che, con riferimento al consumo di energia primaria per ciascuno strato, la produzione del conglomerato bituminoso, il suo trasporto e la produzione dell'emulsione bituminosa sono i processi che causano i maggiori impatti energetici per tutti gli scenari esaminati. Si osserva inoltre che negli scenari innovativi si riduce il contributo percentuale della produzione di conglomerato bituminoso sull'impatto energetico e cresce quella del trasporto e della produzione di emulsione bituminosa.

Tabella 44: Tipologia di strada 3 – Scenario 3A-tradizionale: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base-Binder	88,7%	4,8%	5,5%	1%
Usura	90,5%	4,1%	4,6%	0,8%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 45: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bi-innovativo: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base-Binder	83,5%	7,0%	7,9%	1,6%
Usura	75,8%	10,5%	11,6%	2,1%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 46: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bii-innovativo: Analisi di dominanza del consumo di energia primaria per ciascuno strato

Strato	Produzione C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	Trasporto E.B. e processi in cantiere
Base-Binder	83,5%	7,0%	7,9%	1,6%
Usura	72,6%	11,9%	13,2%	2,3%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Gli impatti ambientali per la Tipologia di strada 3 sono riportati nelle Tabelle 47, 48 e 49, mentre le Figure 15, 16 e 17 mostrano una comparazione di tali impatti.

Tabella 47: Tipologia di strada 3 – Scenario 3A-tradizionale: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione base-binder	Manutenzione usura	Totale
		3A-trad	3A-trad	3A-trad
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	20,38	26,95	47,33
Consumo di risorse	kg materia prima	261,48	372,06	633,54
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	3,35E-02	4,80E-02	0,08
Uso del suolo	m ² a	0,48	0,61	1,09

Tabella 48: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bi-innovativo: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione base-binder	Manutenzione usura	Totale
		3Bi-inn	3Bi-inn	3Bi-inn
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	13,81	23,10	36,92
Consumo di risorse	kg materia prima	22,61	17,51	40,12
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	2,53E-02	2,60E-02	0,05
Uso del suolo	m ² a	0,48	0,64	1,12

Tabella 49: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bii-innovativo: Impatti ambientali

Categoria d'impatto	U.M	Manutenzione base-binder	Manutenzione usura	Totale
		3Bii-inn	3Bii-inn	3Bii-inn
Effetto serra potenziale	kg CO _{2eq}	13,81	21,68	35,49
Consumo di risorse	kg materia prima	22,61	16,88	39,49
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	2,53E-02	2,57E-02	0,05
Uso del suolo	m ² a	0,48	0,66	1,14

Gli scenari innovativi consentono di ottenere una riduzione degli impatti rispetto allo scenario tradizionale per le seguenti categorie:

- Effetto serra potenziale: -22% per lo scenario 3Bi e -25% per lo scenario 3Bii;
- Consumo di risorse: -93,6% per lo scenario 3Bi e -93,7% per lo scenario 3Bii;
- Consumo di acqua: -37% per lo scenario 3Bi e -37,4% per lo scenario 3Bii.

Minori impatti si hanno anche per lo scenario 3Bii rispetto allo scenario 3Bi. In dettaglio: -3,8% per l'effetto serra potenziale, 1,6% per il consumo di risorse e 0,5% per il consumo di acqua.

Con riferimento all'impatto sull'uso del suolo si osserva un incremento del 2,7% e 4,5% confrontando lo scenario tradizionale con gli scenari 3Bi e 3Bii, rispettivamente, e dell'1,7% confrontando lo scenario 3Bii con lo scenario 3Bi.

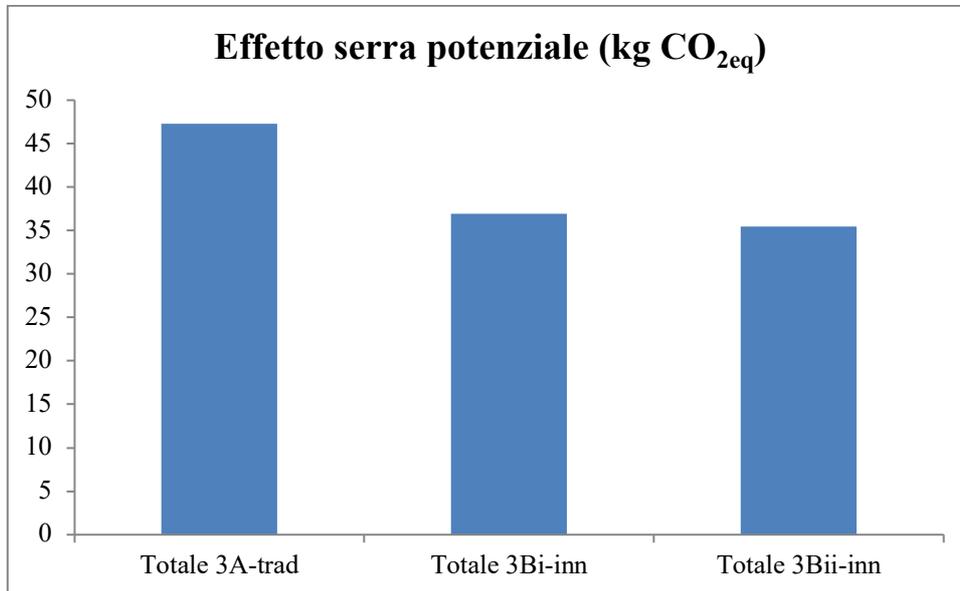


Figura 21: Tipologia di strada 3 – Effetto serra potenziale per i tre scenari

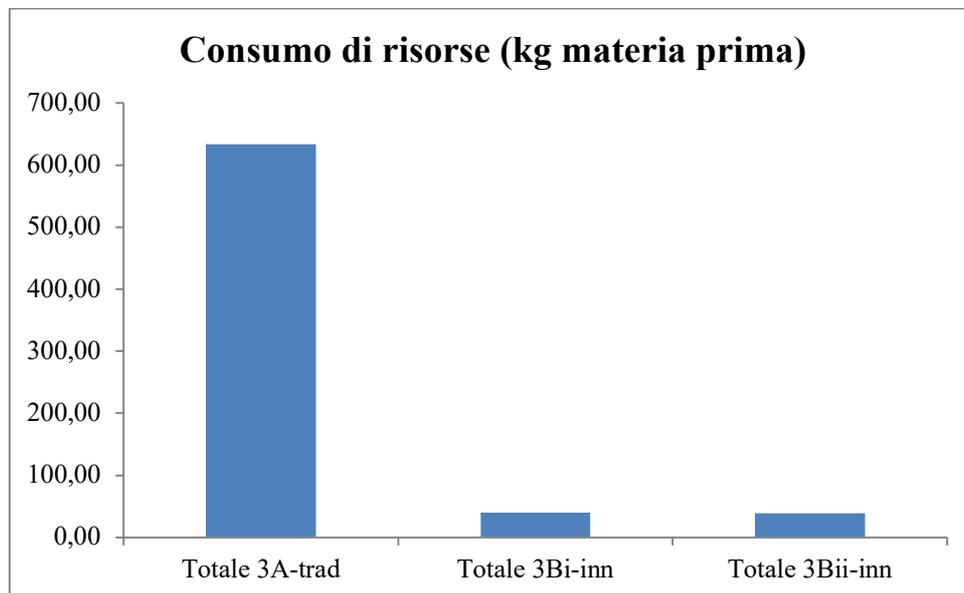


Figura 22: Tipologia di strada 3 – Consumo di risorse per i tre scenari

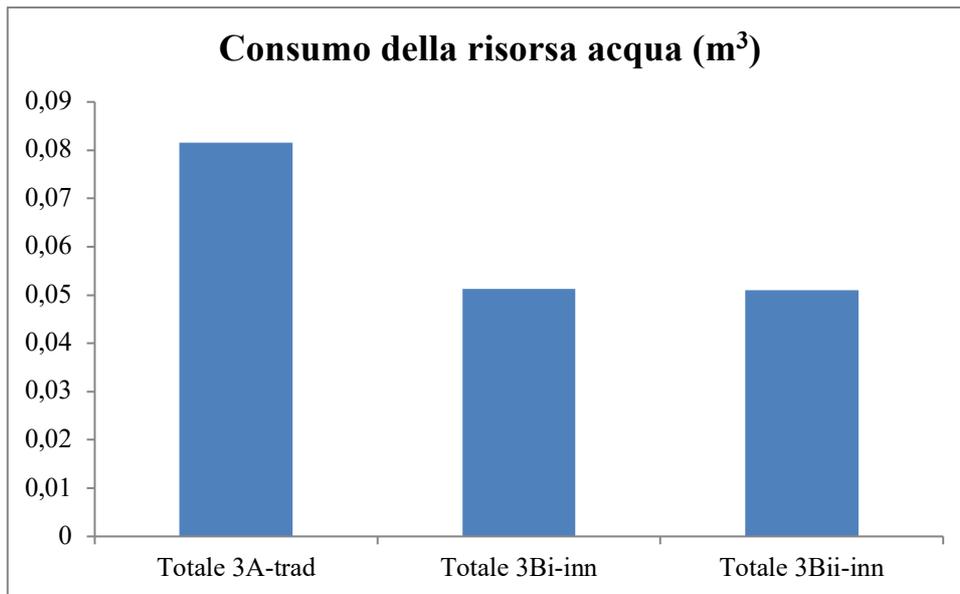


Figura 23: Tipologia di strada 3 – Consumo della risorsa acqua per i tre scenari

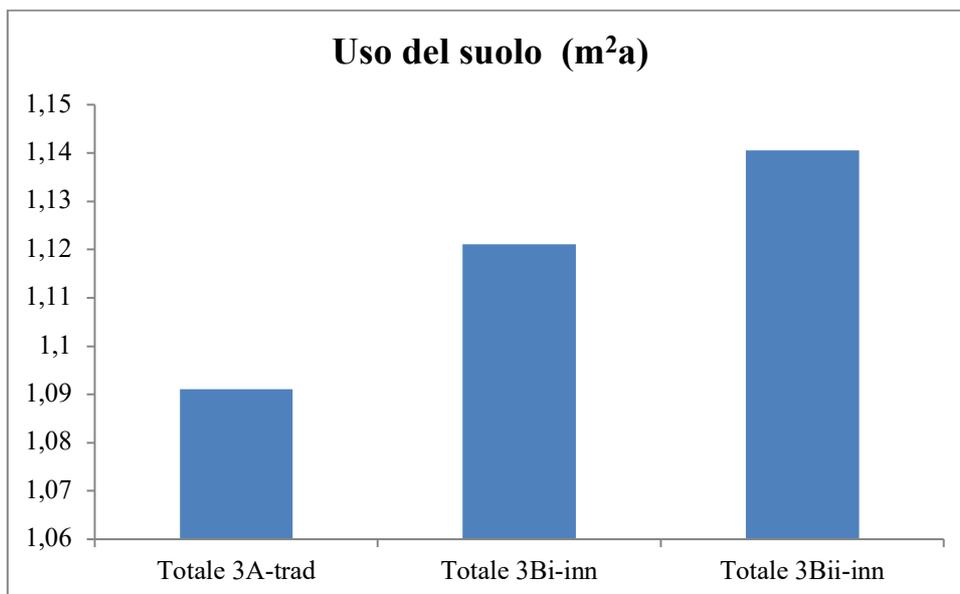


Figura 24: Tipologia di strada 3 – Uso del suolo per i tre scenari

La valutazione dell'incidenza dell'impatto di ciascuno strato di pavimentazione stradale sull'impatto totale consente di rilevare che:

- Nello scenario 3A lo strato di usura causa circa il 56-59% degli impatti mentre il rimanente 41-44% è causato dallo strato di base-binder;
- Nello scenario 3Bi lo strato di usura e di base –binder sono responsabili, rispettivamente, del 62,6% e del 37,4% dell'impatto sull'effetto serra, del 43,6% e del 56,4% del consumo di risorse, del 50,7% e del 49,3% del consumo di acqua, del 57,2% e del 42,8% dell'impatto sull'uso del suolo;

- Nello scenario 3Bii lo strato di usura è responsabile dei maggiori impatti sull'effetto serra (61%), sul consumo di acqua (50,4%) e sull'uso del suolo (57,9%); inoltre esso incide per il 42,7% sul consumo di risorse. Lo strato di base-binder causa il 39% dell'impatto sull'effetto serra, il 57,3% del consumo di risorse, il 49,6% del consumo di acqua e il 42,1% dell'impatto sull'uso del suolo.

Nelle Tabelle 50, 51 e 52 sono mostrati i risultati dell'analisi di dominanza che consente di evidenziare quali processi siano responsabili dei maggiori impatti ambientali per gli strati di base-binder e di usura.

Nello scenario tradizionale la produzione del conglomerato bituminoso è responsabile di circa il 98% del consumo di risorse e di circa il 93% del consumo di acqua, mentre il suo contributo all'impatto sull'effetto serra e sull'uso del suolo è di circa l'83% e il 63%, rispettivamente. Il trasporto del conglomerato bituminoso causa circa il 12% dell'impatto sull'effetto serra e circa il 34% dell'impatto sull'uso del suolo, mentre contribuisce alle due rimanenti categorie di impatto per meno dell'1,5%. Impatti inferiori al 5,5% sono attribuibili alla produzione dell'emulsione bituminosa.

Tabella 50: Tipologia di strada 3 – Scenario 3A-tradizionale: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione			Trasporto E.B. e processi in cantiere
		C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	
Effetto serra	Base-Binder	82,88%	12,18%	2,20%	2,74%
	Usura	83,72%	11,78%	2,07%	2,44%
Consumo di risorse	Base-Binder	98,26%	1,23%	0,42%	0,09%
	Usura	98,45%	1,11%	0,37%	0,08%
Consumo di acqua	Base-Binder	92,93%	1,41%	5,41%	0,25%
	Usura	93,82%	1,25%	4,72%	0,21%
Uso del suolo	Base-Binder	63,19%	34,03%	1,78%	1,00%
	Usura	63,03%	34,27%	1,74%	0,96%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 51: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bi-innovativo: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione			Trasporto E.B. e processi in cantiere
		C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	
Effetto serra	Base-Binder	74,74%	17,98%	3,24%	4,04%
	Usura	81,01%	13,73%	2,42%	2,84%
Consumo di risorse	Base-Binder	79,84%	14,25%	4,83%	1,07%
	Usura	67,04%	23,53%	7,78%	1,65%
Consumo di acqua	Base-Binder	90,64%	1,86%	7,17%	0,33%
	Usura	88,59%	2,32%	8,72%	0,38%
Uso del suolo	Base-Binder	63,13%	34,08%	1,79%	1,00%
	Usura	64,80%	32,63%	1,66%	0,91%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Tabella 52: Tipologia di strada 3 – Scenario 3Bii-innovativo: Analisi di dominanza impatti ambientali per ciascuno strato

Categoria d'impatto	Strato	Produzione			Trasporto E.B. e processi in cantiere
		C.B.	Trasporto C.B.	Produzione E.B.	
Effetto serra	Base-Binder	74,74%	17,98%	3,24%	4,04%
	Usura	79,76%	14,63%	2,57%	3,03%
Consumo di risorse	Base-Binder	79,84%	14,25%	4,83%	1,07%
	Usura	65,81%	24,41%	8,07%	1,71%
Consumo di acqua	Base-Binder	90,64%	1,86%	7,17%	0,33%
	Usura	88,47%	2,34%	8,80%	0,38%
Uso del suolo	Base-Binder	63,13%	34,08%	1,79%	1,00%
	Usura	65,84%	31,67%	1,61%	0,88%

C.B.= Conglomerato bituminoso; E.B.=Emulsione bituminosa

Negli scenari innovativi si osserva che, rispetto allo scenario tradizionale:

- Il trasporto del conglomerato bituminoso ha un'incidenza sul consumo di risorse di circa il 24% per lo strato di usura e di circa il 14% per lo strato di base-binder, mentre il contributo della produzione del conglomerato bituminoso è, rispettivamente, di circa il 66-67% e l'80%;
- Aumenta il contributo all'impatto sull'effetto serra del trasporto di conglomerato bituminoso e sul consumo di risorse e di acqua della produzione di emulsione bituminosa mentre diminuisce quello della produzione di conglomerato bituminoso.

4.4 Il conglomerato bituminoso: analisi di dominanza e analisi di sensibilità

Un'analisi di dettaglio della produzione del conglomerato bituminoso consente di identificare i componenti responsabili dei maggiori impatti energetici (Tabella 53) e ambientali per ciascuna tipologia di strada esaminata e per ciascuno strato. In dettaglio:

- Negli scenari tradizionali i maggiori impatti energetici (circa il 70-80%) sono imputabili alla produzione del bitume e circa il 14-20% alla produzione di energia termica da olio combustibile.
- Per la Tipologia di strada 1, con riferimento allo strato di base dello scenario innovativo, in cui si effettua un riciclo in situ del fresato, circa il 93% dell'impatto energetico è causato dalla produzione del bitume utilizzato nell'emulsione bituminosa da riciclaggio e non vi è utilizzo di olio combustibile.
- Per la Tipologia di strada 1 circa il 43-44% del consumo di energia primaria per gli strati di binder e usura dello scenario innovativo è imputabile all'olio combustibile mentre la produzione di bitume, il cui utilizzo si riduce nello scenario innovativo rispetto agli scenari tradizionali, incide per circa il 10%. In questo scenario la produzione di polimeri per PMA, del rigenerante e il trasporto del fresato nel sito di produzione del conglomerato bituminoso hanno un'incidenza, rispettivamente, del 14,3%, del 12,5% e del 14,2% per lo strato di binder e del 16,3%, del 12,2% e del 13,8% per lo strato di usura.
- Per i due scenari innovativi esaminati per la Tipologia di strada 2, con riferimento alla base si ha un contributo del 9,6% sul consumo di energia primaria totale connesso al trasporto del fresato presso il sito di produzione del conglomerato bituminoso e del 4,5% connesso alla produzione di cemento. L'impatto energetico causato dall'olio combustibile si riduce grazie all'utilizzo della tecnica a freddo per la produzione del conglomerato bituminoso.

Per gli strati di binder e usura nello scenario 2Bi valgono le stesse considerazioni fatte per i relativi strati della Tipologia di strada 1.

Con riferimento allo scenario 2Bii la produzione del rigenerante e il trasporto del fresato nel sito di produzione del conglomerato bituminoso hanno un'incidenza, rispettivamente, del 14,6% e 16,3% per lo strato di binder e del 14,4%, e 16,2% per lo strato di usura. Il modificante con polverino di gomma ha un'incidenza per entrambi gli strati di circa l'1,3%.

- Per la Tipologia di strada 3 con riferimento allo strato di base-binder per i due scenari innovativi il 7,9% dell'impatto energetico è imputabile al trasporto fresato presso il sito di produzione del conglomerato bituminoso mentre il consumo di olio combustibile è responsabile del 4,3% dell'impatto, considerato che il conglomerato bituminoso è prodotto con tecnica CMA. Per lo strato di usura il trasporto del fresato e il rigenerante incidono

rispettivamente per il 13,8% e il 12,1% nello scenario 3Bi e per il 16,2% e il 14,3% nello scenario 3Bii. Nello scenario 3Bi si ha un contributo del 16,4% all'impatto connesso alla produzione dei polimeri per PMA, mentre nello scenario 3Bii il modificante con polverino di gomma incide per circa l'1,3%.

Tabella 53: Consumo di energia primaria per la produzione di conglomerato bituminoso: analisi di dominanza

Scenario	Strato	Produzione bitume	Olio combustibile per energia termica	Altro
1Ai	Base	71,6%	19,5%	8,9%
	Binder	73,9%	17,9%	8,2%
	Usura	79,3%	15,1%	5,6%
1Aii	Base	69,8%	18,6%	11,6%
	Binder	71,9%	17,0%	11,1%
	Usura	76,0%	14,0%	10,0%
1B	Base	93,2%	-	6,8%
	Binder	10,5%	44,0%	45,5%
	Usura	10,1%	42,6%	47,3%
2A	Base	71,7%	19,5%	8,8%
	Binder	73,8%	17,9%	8,3%
	Usura	79,3%	15,1%	5,6%
2Bi	Base	77,5%	5,2%	17,3%
	Binder	10,5%	43,9%	45,6%
	Usura	10,1%	42,7%	47,2%
2Bii	Base	77,5%	5,2%	17,3%
	Binder	12,1%	50,5%	37,4%
	Usura	11,9%	50,3%	37,8%
3A	Base-Binder	73,9%	17,9%	8,2%
	Usura	79,3%	15,1%	5,6%
3Bi	Base-Binder	82,5%	4,3%	13,2%
	Usura	10,2%	42,6%	47,2%
3Bii	Base-Binder	82,6%	4,3%	13,1%
	Usura	11,8%	50,3%	37,9%

Con riferimento agli impatti ambientali si evidenzia che:

- Negli scenari tradizionali l'olio combustibile è responsabile dei maggiori impatti sull'effetto serra (dal 45% al 54%), i calcari compatti causano circa il 93% del consumo di risorse, i maggiori impatti sul consumo di acqua sono causati dalla produzione del bitume (57-70%), che è inoltre responsabile di circa il 20-26% dell'impatto sull'uso del suolo e di circa il 24-33% dell'impatto sull'effetto serra.
- Nello scenario 1B, con riferimento alla base, la produzione di bitume causa circa il 38,4% dell'impatto sull'effetto serra, il 46,8% del consumo di risorse, il 78,0% del consumo di acqua e il 32,1% dell'impatto sull'uso del suolo; tali percentuali sono pari al 57,7%, 51,0%, 16,3% e 51,4% per la produzione di cemento.

- Negli strati di binder e usura dello scenario 1B il trasporto del fresato al sito di produzione del conglomerato bituminoso contribuisce a circa il 17% dell'impatto sull'effetto serra, a circa il 35% del consumo di risorse e a circa il 51% dell'impatto sull'uso del suolo. L'olio combustibile è responsabile di circa il 57% dell'impatto sull'effetto serra e di circa il 32% del consumo di risorse mentre circa il 40-44% del consumo di acqua è causato dalla produzione di elettricità. La produzione del rigenerante causa circa il 24-26% del consumo di acqua e circa il 17,5% dell'impatto sull'uso del suolo.
- Negli scenari 2Bi e 2Bii, con riferimento alla base la produzione di bitume incide per circa il 23,8% sull'impatto relativo all'effetto serra, per circa il 37,5% sul consumo di risorse e per circa il 53,7% sul consumo di acqua; la produzione di cemento è responsabile di circa il 35,8% dell'impatto sull'effetto serra e di circa il 40,9% del consumo di risorse; l'elettricità causa circa il 26,6% del consumo di acqua. Il trasporto del fresato ha un'incidenza del 21,3% sull'impatto relativo all'effetto serra e del 49,8% sull'impatto relativo all'uso del suolo. Negli strati di binder e usura l'olio combustibile causa circa il 56-61% dell'impatto sull'effetto serra e circa il 32-34% del consumo di risorse; il trasporto del fresato incide sul consumo di risorse e sull'uso del suolo rispettivamente per il 35-37% e il 48-51%, mentre il 40-44% del consumo di acqua è causato dalla produzione di elettricità.
- Con riferimento agli scenari 3Bi e 3Bii, nello strato di base-binder il bitume causa circa il 33%, 50,5% e 61,5% degli impatti sull'effetto serra, sul consumo di risorse e sul consumo di acqua, rispettivamente, mentre il maggiore impatto sull'uso del suolo (51%) è imputabile al trasporto del fresato. Con riferimento allo strato di usura i maggiori impatti sull'effetto serra sono attribuibili all'olio combustibile (56-61%), che è inoltre responsabile di circa il 32-34% del consumo di risorse; il trasporto del fresato causa circa il 35-37% del consumo di risorse e circa il 48-50% dell'impatto sull'uso del suolo; la produzione di elettricità è responsabile di circa il 44-45% del consumo di acqua.

Nelle Tabelle 54, 55 e 56 si riportano i risultati dell'analisi di sensibilità effettuata per il conglomerato bituminoso, in cui si è ipotizzato di sostituire l'olio combustibile impiegato nel processo di produzione di tale conglomerato con il gas naturale. Si precisa che i valori riportati in tabella sono riferiti alle quantità totali di conglomerato bituminoso impiegate con riferimento all'unità funzionale. Si osserva una riduzione degli impatti nel caso di impiego di gas naturale in sostituzione dell'olio combustibile per quasi tutte le categorie di impatto esaminate. In dettaglio:

- L'impatto sull'effetto serra si riduce di una percentuale variabile dal 7,5% al 9,3%;
- L'impatto sul consumo della risorse acqua si riduce di una percentuale variabile dal 4,8% al 7,2%;

- L'impatto sul consumo di risorse si riduce di una percentuale variabile dallo 0,9% al 17%;
- L'impatto sul consumo di energia primaria si riduce di una percentuale variabile dall'1,9% al 3,7%.

L'unica eccezione è costituita dall'impatto sull'uso del suolo che aumenta con una percentuale variabile dallo 0,1% allo 0,7%.

Tabella 54: Tipologia di strada 1 – Produzione del conglomerato bituminoso: Analisi di sensibilità

Categoria d'impatto	U.M.	1Ai	1Ai - AS	1Aii	1Aii - AS	1B	1B - AS
Effetto serra	kg CO _{2eq}	68,49	62,09	69,91	63,93	50,53	47,15
Uso del suolo	m ² a	1,20	1,21	1,14	1,14	1,07	1,10
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	0,13	0,12	0,13	0,13	0,07	0,06
Consumo di risorse	kg materia prima	1.084,06	1.073,68	1.082,31	1.072,61	42,60	36,79
Consumo di energia primaria	MJ	3.269,39	3.203,92	3.240,71	3.179,50	1.232,46	1.244,19

Tabella 55: Tipologia di strada 2 – Produzione del conglomerato bituminoso: Analisi di sensibilità

Categoria d'impatto	U.M.	2A	2A - AS	2Bi	2Bi - AS	2Bii	2Bii - AS
Effetto serra	kg CO _{2eq}	66,44	60,19	52,04	47,89	49,44	45,29
Uso del suolo	m ² a	1,17	1,18	1,24	1,25	1,28	1,29
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	0,13	0,12	0,07	0,07	0,07	0,07
Consumo di risorse	kg materia prima	1.050,21	1.040,08	49,27	42,55	48,15	41,43
Consumo di energia primaria	MJ	3.127,45	3.063,53	1.318,63	1.275,84	1.210,83	1.168,04

Tabella 56: Tipologia di strada 3 – Produzione del conglomerato bituminoso: Analisi di sensibilità

Categoria d'impatto	U.M.	3A	3A - AS	3Bi	3Bi - AS	3Bii	3Bii - AS
Effetto serra	kg CO _{2eq}	39,45	35,81	29,04	26,86	27,62	25,44
Uso del suolo	m ² a	0,69	0,69	0,72	0,72	0,74	0,74
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	0,08	0,07	0,05	0,04	0,05	0,04
Consumo di risorse	kg materia prima	623,22	617,31	29,79	26,27	29,16	25,64
Consumo di energia primaria	MJ	1.922,91	1.885,62	878,40	855,91	819,60	797,11

4.5 Impatti evitati connessi all'utilizzo del fresato all'esterno dei confini del sistema

In Tabella 57 sono riportati gli impatti connessi al trattamento di 1 kg di fresato per l'utilizzo in sottofondi stradali e gli impatti evitati connessi all'uso di tale fresato in sostituzione di aggregati vergini. Si osserva che, per le diverse categorie di impatto esaminate, gli impatti connessi al trasporto del fresato (prima colonna della Tabella 57) e all'impiego di elettricità per la sua triturazione (seconda colonna della Tabella 57) prima di essere impiegato nei sottofondi stradali sono superiori agli impatti evitati connessi all'utilizzo di materia prima seconda in sostituzione di aggregati vergini (terza colonna della Tabella 57). Pertanto, non vi è un impatto evitato netto connesso al riutilizzo del fresato nei sottofondi stradali. L'unica eccezione è connessa all'impatto sul consumo di risorse per il quale si ha un impatto evitato pari a -5,91 kg di materia prima per kg di fresato riciclato.

Tabella 57: Utilizzo del fresato in sottofondi stradali: Impatto generato e impatto evitato (dati riferiti a 1 kg)

Categoria d'impatto	U.M.	Totale	Trasporto	Consumo di elettricità	Aggregati vergini - Impatto evitato
Effetto serra	kg CO _{2eq}	7,06E-03	8,06E-03	5,05E-04	-1,51E-03
Uso del suolo	m ² a	4,82E-04	5,31E-04	4,52E-05	-9,48E-05
Consumo della risorsa acqua	m ³ acqua _{eq}	4,91E-06	1,53E-06	6,07E-06	-2,69E-06
Consumo di risorse	kg materia prima	-5,91E-01	9,75E-03	4,61E-05	-6,00E-01
Consumo di energia primaria	MJ	1,22E-01	1,35E-01	9,43E-03	-2,22E-02

5. Conclusioni

I risultati sopra discussi, intimamente connessi alla qualità dei dati impiegati e alle assunzioni effettuate, sia con riferimento al singolo sistema in esame che al confronto fra le tre tipologie di interventi, consentono di trarre alcune conclusioni di carattere generale, di seguito riportate.

- La maggior parte degli impatti energetico-ambientali relativi alla manutenzione della pavimentazione stradale è causata dalla produzione del conglomerato bituminoso.
- Uno degli elementi più impattanti impiegato durante la produzione del conglomerato bituminoso è l'olio combustibile. I risultati ottenuti per i vari scenari hanno evidenziato che l'utilizzo di tecniche a freddo di produzione del conglomerato bituminoso possono consentire di ridurre gli impatti connessi all'unità funzionale in esame. Ridotte variazioni degli impatti si hanno invece con l'utilizzo di tecniche WMA in sostituzione di quelle HMA.
- L'applicazione di tecniche di produzione innovative rispetto a quelle tradizionali consente di ottenere una riduzione del consumo di risorse superiore al 90%, grazie principalmente all'utilizzo del fresato in sostituzione dei calcari compatti. Si ha inoltre una riduzione del consumo di energia primaria di circa il 50%, dell'impatto sull'effetto serra di circa il 20-25% e del consumo di acqua di circa il 37-47%.
- L'utilizzo delle tecniche innovative rispetto a quelle convenzionali causa un incremento dell'impatto sull'uso del suolo (incremento inferiore al 7%), ad eccezione dello scenario in cui si ha un riciclo del fresato in situ (riduzione dell'impatto di circa il 12%).
- Con riferimento agli scenari innovativi in cui il fresato d'asfalto è riciclato nel sito di produzione del conglomerato bituminoso si osserva che il trasporto del fresato dal cantiere al sito di produzione è uno degli elementi critici del sistema in termini di impatti, soprattutto con riferimento all'impatto sull'uso del suolo. Pertanto, una riduzione degli impatti può essere ottenuta attraverso il riciclo in situ o in aree limitrofe al cantiere. Tuttavia, la fattibilità di ciò va valutata in funzione della tipologia di strada (possibilità di ospitare un treno di riciclo), della disponibilità di aree limitrofe al cantiere in cui installare i macchinari da impiegare il processo di riciclo (vaghi frantoi), della disponibilità di macchinari per la produzione del conglomerato bituminoso che siano facilmente trasportabili in prossimità del cantiere.
- L'utilizzo di conglomerato bituminoso modificato con polverino di gomma rispetto a quello modificato con polimeri PMA consente di ottenere una riduzione degli impatti ambientali esaminati, ad eccezione della categoria di impatto relativa all'uso del suolo, per il quale si ha un incremento, che è comunque inferiore del 3%.

6. Bibliografia

- [1] International Organization for Standardization, ISO 14040 - Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, 2006.
- [2] International Organization for Standardization, ISO 14044 - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006.
- [3] International EPD System, Product Category Rules (PCR) Highways, Streets and Roads (except Elevated Highways), Product Category Classification: UN CPC 53211, 2013:20, Version 2.0, 2018.
- [4] EN 15804:2012+A1:2013, Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products, 2013.
- [5] Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus HJ, Bauer C, Doka G, Dones R, Hischier R, Hellweg S, Humbert S, Köllner T, Loerincik Y, Margni M, Nemecek T. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf; 2007.
- [6] European Commission, DG Joint Research Centre e Institute for Environment and Sustainability. Characterization Factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment Methods. Database and Supporting Information, first ed. Luxembourg Publications Office of the European Union. EUR 25167; 2012.
- [7] Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 pp.
- [8] Giavarini, C., Eco-profilo dell'asfalto – Hot mix production: energy consumption and CO₂ emissions, Rassegna del bitume 58-08.
- [9] Goyer, S., Dauvergne, M., Wendling, L., Gaudefroy, V., Roper, C., Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials, ISAP 2012: France, 2012.
- [10] Rigamonti, L., Grosso, M., Biganzoli, L., Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel Co-Combustion in a Coal-Fired Power Plant, J. Ind. Ecol., vol. 16, no. 5, pp. 748–760, 2012.
- [11] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, Int. J. Life Cycle Assess., vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, 2016.