

RIFIUTI PLASTICI COME MATERIA PRIMA PER PAVIMENTAZIONI STRADALI INNOVATIVE: UNA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA

Lucia Capuano^{1,*}, Giacomo Magatti¹, Paride Mantecca¹

¹ Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Centro di Ricerca POLARIS.

Sommario – In un'ottica di economia circolare e sostenibile è necessario incentivare il riciclo e il riuso, soprattutto dei materiali plastici, attraverso il consolidamento del mercato delle materie prime seconde. Un settore di riutilizzo dei materiali polimerici è quello delle pavimentazioni stradali; per migliorare le caratteristiche, come aumentare la vita utile e diminuire la frequenza di manutenzione delle strade, vengono utilizzati additivi polimerici al bitume, quali lo stirene butadiene stirene (SBS). Oggetto del presente lavoro è una valutazione comparativa, attraverso la metodologia LCA, tra asfalto convenzionale, asfalto con SBS e asfalto con un nuovo modificante. Questo modificante è sviluppato a partire da plastiche dure di natura poliolefina, provenienti da rifiuti altrimenti inviati a termovalorizzazione, e materiali a base grafenica. I processi considerati nella seguente analisi comprendono tutte le fasi del ciclo di vita della pavimentazione: dall'estrazione delle materie prime al riuso del materiale. Inoltre, per poter effettuare un confronto completo rispetto allo scenario tradizionale, è stata fatta un'estensione del sistema per considerare il processo di incenerimento delle plastiche dure, tenendo conto così del loro fine vita tradizionale. L'unità funzionale dello studio è 1 km di strada extraurbana, larga 15 metri con orizzonte temporale di utilizzo pari a 20 anni. I risultati ottenuti da questa valutazione LCA, hanno mostrato che le pavimentazioni prodotte con il nuovo modificante risultano essere meno impattanti sia rispetto al sistema tradizionale che al sistema con SBS, grazie alle migliori prestazioni fisico-meccaniche e alla conseguente riduzione degli interventi di manutenzione.

Parole chiave: economia circolare, impatti ambientali, pavimentazioni stradali, rifiuti plastici, sostenibilità.

WASTE PLASTICS AS RAW MATERIAL FOR INNOVATIVE ROAD PAVEMENTS: A LIFE CYCLE ASSESSMENT

Abstract – The road pavement sector represents an opportunity to recycle plastic materials. In respect of circular and sustainable economy, it is necessary to encourage recycling and reuse, especially of plastic materials, through the consolidation of the market for secondary raw materials. In fact, plastic polymers are often added to bitumen in order to improve road characteristics, such as increasing service life or decreasing road maintenance frequency. The aim of this study is to carry out a comparative analysis of environmental impacts for different road pavements that contain different mixes of bituminous conglomerate. The bituminous mixture consists of

three types: traditional pavement, pavement with SBS, and pavement with a new modifier. The first one, referred as conventional pavement, is composed of bitumen and aggregates; the second type contains SBS (styrene-butadiene-styrene)-modified bitumen. SBS is the most used polymer in road pavements because it has valuable improving properties. The third type of road pavements is formed by bitumen, aggregates and a new modifier. This one is formed by hard plastics of a polyolefin nature and graphene. Life Cycle Assessment – LCA – is a modelling tool used to quantify, characterize and compare the environmental impacts. The use of LCA tools is especially valuable in the case of innovative materials containing recycled products: it may be important for applications as result of their contribution to the reduction of consumption of raw material and non-renewable resources. The study includes all the processes and activities of road pavements that encompass material production, laying operations, maintenance works during the pavement's lifetime, and end-of-life, according to a cradle to cradle approach. Moreover, in order to make a full comparison with the traditional scenario, an extension of the system has been made to consider the incineration process of hard plastics; in this way it takes into account their traditional end-of-life (as opposed to their reuse as a secondary raw material). The incineration process has been considered in conventional pavement and pavement with SBS; on the other hand, plastic recycle process has been considered in the innovative pavement (with the new modifier). The functional unit is a measure of the performance of the analyzed product system; in this work it is 1 km of road, 15 meters wide and with a service time of 20 years. The results show that recycling plastics as a polymer for bitumen modification has the potential to be environmentally advantageous compared to other two solutions: in fact, the new modifier is less impactful than the traditional system and the SBS system. The results of the analysis show that the phase of material production, including raw material extraction, is relevant to almost all the assessed impact categories. This is mainly due to the production of bitumen, which is a petroleum-based product. The investigated paving solution based on waste hard plastic recycling, produces a high-performance asphalt modifier according to a circular model. This solution shows a potential mitigation of the environmental impacts in all impact categories. This is due to the performance of the mixture of plastic and graphene modified added to the bituminous conglomerate.

Keywords: environmental impacts, circular economy, road pavements, waste plastic, sustainability.

* Per contatti: Piazza della Scienza, 1 20126 Milano (MI)
Tel. 3391427807, lucia.capuano@unimib.it

Ricevuto il 15-4-2021. Modifiche sostanziali richieste il 21-5-2021.
Correzioni richieste il 18-6-2021. Accettazione il 25-6-2021.

1. INTRODUZIONE

Il settore delle infrastrutture stradali è uno dei tre principali motori di utilizzo delle risorse nell'Unione Europea (Steger e Bleischwitz, 2011). Le costruzioni stradali contribuiscono in maniera significativa al riscaldamento globale, proprio a causa delle loro caratteristiche: l'alto consumo di energia per la loro realizzazione, l'utilizzo di materie prime, la superficie occupata, la generazione di una grande quantità di rifiuti e la grande quantità di trasporti collegati (Cass e Mukherjee, 2011). Le infrastrutture stradali giocano un ruolo importante nella sostenibilità dei sistemi urbani (FHWA, 2011). Le tipologie di pavimentazione possono influenzare direttamente il consumo di carburante e le emissioni dei veicoli a motore. Nel 2017, in Italia, i trasporti sono stati responsabili del 23,3% delle emissioni totali di gas serra (ISPRA, 2019). Nei progetti infrastrutturali, quando si valuta la sostenibilità, le emissioni di gas serra sono un indicatore chiave. Ma questo settore presenta ampie possibilità di mitigazione degli impatti, attraverso nuove formulazioni di miscele per pavimentazioni che ne migliorino le prestazioni. Queste formulazioni includono materiali alternativi come: gomma (Chiu et al., 2008), acciaio (Ferreira et al., 2016), polimeri (Araújo et al., 2014; Butt, 2014) e asfalto riciclato (RAP) (Araújo et al., 2014; Aurangzeb et al., 2014; Bloom et al., 2017).

Nel 2018 in Europa sono stati prodotti 298 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso (EAPA, 2020) e questa quantità è in continua crescita soprattutto nei paesi in via di sviluppo. I conglomerati bituminosi sono miscele formate da aggregati e bitume, e possono variare in base alla granulometria dell'inerte e sulla qualità e quantità di bitume. Questa varietà si traduce nella possibile rispondenza a diverse esigenze come la rugosità, l'impermeabilità, la regolarità, e la possibilità di impiego in piccoli spessori. Le infrastrutture stradali rappresentano elementi chiave per caratterizzare il livello di sviluppo (Herranz-Loncàn, 2007; Rietveld, 1994) e di benessere (Knapp e Oosterhaven, 2011) di un dato paese. La modifica di pavimentazioni stradali utilizzando materiali plastici è un modo per migliorarne le proprietà, le prestazioni, aumentarne la vita utile e quindi il loro costo complessivo (Sulyman et al., 2016; Aflaki et al., 2008). I materiali plastici utilizzati nelle pavimentazioni possono essere divisi in due classi a seconda delle modifiche subite dopo l'esposizione al calore: polimeri termoindurenti e polimeri termopla-

stici. Il primo tipo, come ad esempio resine ed elastomeri, vengono induriti durante il riscaldamento e le strutture tridimensionali dei legami di reticolazione che si formano non permettono l'ammorbidimento della matrice polimerica e la facile rilavorazione; il secondo tipo di polimeri, i termoplastici, come ad esempio il polipropilene e il polietilene tereftalato, possono essere modellati in nuove forme usando il calore, e a differenza degli altri polimeri, questo tipo di processo è reversibile (Sulyman et al., 2016).

Riciclare i rifiuti di plastica nelle pavimentazioni stradali può dare un contributo molto grande all'ambiente e all'economia per differenti aspetti. Aiuta infatti a ridurre lo sfruttamento delle risorse naturali, a diminuire il livello di inquinamento ambientale e contribuisce a modificare le proprietà fisiche e ingegneristiche dei materiali da costruzione, come l'asfalto e il calcestruzzo. L'asfalto è ampiamente utilizzato nella costruzione di pavimentazioni stradali come legante di aggregati (Akmal, 1999). Tuttavia, è ben riconosciuto che il conglomerato bituminoso mostra una diversa suscettibilità alla temperatura, come l'ormaiamento ad alta temperatura, la resistenza a fatica a media temperatura e i danni da cracking a bassa temperatura. Per questo motivo spesso i conglomerati bituminosi vengono modificati per migliorare la loro applicazione. L'aggiunta di polimeri incrementa significativamente la qualità dell'asfalto (Yuonne e Yajaira, 2001): migliora le caratteristiche reologiche (Uranga, 2008), le proprietà di adesione e coesione (Kalantar, 2010) e può migliorare con successo le prestazioni delle pavimentazioni, aumentando la resistenza a fatica, alla fessurazione termica, e all'ormaiamento (Aflaki et al., 2008). Tra i polimeri più utilizzati vi è lo stirene-butadiene-stirene (SBS) che in forma di granulato viene aggiunto al bitume. Il vantaggio dell'utilizzo di questi composti, rispetto ad altri risiede nel fatto che hanno la capacità di creare un sistema di equilibrio nel bitume attraverso interazioni molecolari con esso (Isacsson e Zeng, 1998).

L'obiettivo di questa analisi è una valutazione comparativa tra diverse tipologie di pavimentazione: una tradizionale formata solo dal conglomerato bituminoso, una pavimentazione formata con l'aggiunta del co-polimero SBS e una pavimentazione formata da un nuovo modificante creato dal riciclo di plastiche dure e da materiali a base grafenica. Il presente lavoro fa parte di un progetto di ricerca, *Ecopave*, che promuove lo sviluppo di mo-

dificanti per asfalti in grado di migliorare le caratteristiche delle pavimentazioni stradali attraverso un processo produttivo ad alta efficienza e sostenibilità mediante il riciclo di rifiuti plastici e materiali a base grafenica.

I rifiuti plastici, che non possono essere riciclati nella catena di riciclaggio standard e vengono quindi inviati a termovalorizzazione, sono raccolti in piattaforme ecologiche, separati da eventuali parti metalliche e trasferiti in un impianto di riciclaggio della plastica, dove attraverso la flottazione avviene la selezione delle plastiche per avere una specifica frazione di plastica poliolefinica. Tale frazione poliolefinica viene tritata per ottenere dei granuli di dimensione unitaria di circa 3 mm, tali da poter essere utilizzati come additivo per i conglomerati bituminosi. In seguito, questa frazione viene aggiunta al grafene. Il grafene viene prodotto a partire dalla grafite intercalata, ottenuta a sua volta dalla grafite naturale che viene intercalata con degli acidi (Pizza et al., 2014). Una volta ottenuta la frazione di plastica e di grafene si ha la formazione del nuovo modificante in granuli attraverso l'estrusione. La valutazione è stata fatta con la metodologia LCA – Life Cycle Assessment –, che viene utilizzata da oltre due decenni, per stimare gli impatti ambientali associati alle pavimentazioni stradali. Utilizzare questa tecnica è particolarmente importante nel caso dei materiali innovativi a base di prodotti riciclati, che possono essere interessanti per la riduzione del consumo di materie prime e di risorse non rinnovabili (Carpenter et al., 2007; Chiu et al., 2008; Giani et al., 2015). Vi sono diversi studi (Huang et al. 2009; Santos et al. 2019; Wang et al. 2016; Zheng et al., 2019) che mettono in relazione la durabilità del ciclo di vita di progetti di pavimentazione con la sostenibilità delle soluzioni da adottare sul campo. Lo scopo di queste valutazioni è di introdurre la pavimentazione più sostenibile.

2. MATERIALI E METODI

L'analisi degli impatti ambientali è stata fatta attraverso la metodologia LCA secondo le norme UNI EN ISO 14040 (Principi e quadro di riferimento) e 14044 (Requisiti e linee guida). La LCA si svolge in 4 fasi che generalmente sono interconnesse: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi dell'inventario, analisi degli impatti e interpretazione dei risultati (ISO, 2006 a, 2006 b).

2.1. Definizione dell'obiettivo

Questo lavoro è finalizzato a quantificare gli impatti ambientali delle pavimentazioni stradali formate da un nuovo modificante innovativo. Questa opzione innovativa è comparata con una pavimentazione tradizionale (riferita come convenzionale) e una pavimentazione contenente il co-polimero SBS. Questo è uno studio LCA comparativo.

2.1.1. Unità funzionale

Secondo la norma ISO 14040 l'unità funzionale viene definita come la "Prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento" (ISO, 2006 a). L'unità funzionale impiegata nell'analisi e a cui fanno riferimento i risultati è 1 km di strada extraurbana, larga 15 metri con orizzonte temporale di utilizzo di 20 anni.

2.1.2. Confini del sistema

I confini del sistema sono di tipo "cradle to cradle", ovvero comprendono l'intero ciclo di vita della pavimentazione stradale, dall'estrazione delle materie prime, ai cicli di produzione e manutenzione del conglomerato bituminoso, al riutilizzo finale della porzione di fresato, il materiale rimosso dalla pavimentazione e reinserito in un nuovo ciclo produttivo. In dettaglio, i confini del sistema includono queste fasi, Figura 1:

- *estrazione e lavorazione di materie prime*: include aggregati, bitume e la produzione dell'emulsione bituminosa, una miscela che viene spruzzata tra uno strato e l'altro della pavimentazione per migliorarne l'adesione;
- *produzione del conglomerato bituminoso*: prevede l'unione di aggregati e bitume in un impianto previo riscaldamento, include il consumo di energia elettrica e i consumi associati alla pala gommata che serve per spostare i materiali all'interno dell'impianto;
- *trasporto*: include il trasporto delle materie prime all'impianto di produzione, così come il trasporto del conglomerato al sito di stesura e il trasporto del materiale rimosso nuovamente al sito di stoccaggio, dove dopo essere stato opportunamente trattato viene reinserito in un nuovo ciclo produttivo. Gli oneri ambientali associati a questa fase derivano dal consumo di carburante e dalle emissioni dei mezzi utilizzati;
- *stesura*: considera i mezzi necessari alla messa in posa del conglomerato bituminoso, sono coinvolti diversi mezzi per cui per questa fase sono

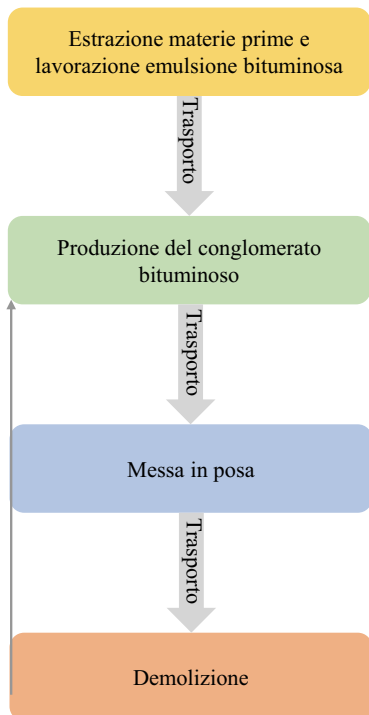


Figura 1 – Confini del sistema considerati nell’analisi

state considerate le emissioni e i consumi relativi a questi mezzi;

- *demolizione*: analogamente al processo di stesura, sono state considerate le attività di rimozione del manto stradale con i diversi mezzi associati.

Oltre a questi processi, per rendere comparabili le pavimentazioni, si è resa necessaria l’estensione del sistema al processo di incenerimento delle plastiche nel conglomerato convenzionale e con SBS. L’estensione si è resa necessaria poiché il nuovo modificante prevede il riciclo delle plastiche altrimenti inviate a termovalorizzazione, Figura 2.

2.1.3. Metodo di calcolo degli impatti

L’analisi è stata fatta con il software OpenLCA, database Ecoinvent 3.6 e il modello di caratteriz-

zazione degli impatti è CML-2001. Le categorie di impatto incluse nell’analisi sono:

- impoverimento delle risorse minerali (Abiotic depletion elements, (ADP) Kg Sb eq.);
- impoverimento delle risorse fossili (Abiotic depletion fossil fuels (ADP) MJ);
- acidificazione (Acidification Potential (AP) Kg SO₂ eq.);
- eutrofizzazione (Eutrophication Potential (EP) Kg PO₄³⁻ eq.);
- ecotossicità delle acque dolci (Freshwater aquatic ecotoxicity (FAETP) Kg 1,4-DB eq.);
- riscaldamento globale (Global Warming Potential (GWP) Kg CO₂ eq.);
- tossicità umana (Human Toxicity (HTTP) Kg 1,4-DB eq.);
- ecotossicità marina (Marine aquatic ecotoxicity (MAETP)Kg 1,4-DB eq.);
- impoverimento dello strato di ozono stratosferico (Ozone layer depletion (ODP) Kg CFC-11 eq.);
- fotossidazione (Photochemical oxidation (POPC) Kg C₂H₄ eq.);
- ecotossicità terrestre (Terrestrial ecotoxicity (TETP) Kg 1,4-DB eq.).

2.2. Analisi di inventario

I dati utilizzati nell’analisi, sono soprattutto dati primari, forniti direttamente dalle aziende coinvolte nel progetto; laddove non si è riusciti a risalire al dato puntuale ci si è riferiti a studi scientifici di settore oppure ai processi selezionati all’interno del database.

Nell’analisi sono stati considerati i 3 strati della pavimentazione stradale: usura, binder e base ognuno con uno spessore e materiale leggermente diverso. Ogni strato ha una durata di vita utile differente, data appunto dalle diverse caratteristiche chimico-fisiche. La durata è dettata dal W18, un fattore che definisce le caratteristiche strutturali del-

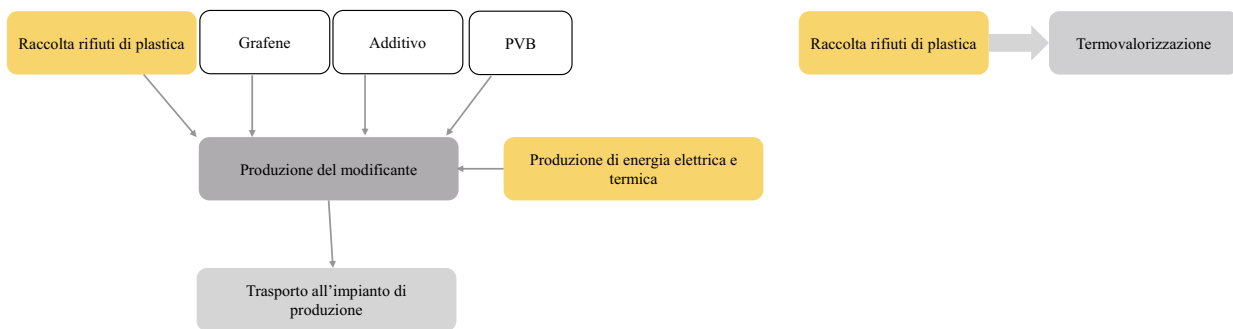


Figura 2 – Estensione del sistema per il destino delle plastiche: a sinistra riciclo delle plastiche per produrre il modificante, a destra processo di termovalorizzazione per convenzionale e SBS

la strada. Il metodo di calcolo è un metodo empirico che permette di ricavare il numero cumulato W18 di assi standard (Equivalent Single Axle Loads) da 80 kN che una pavimentazione riesce a sopportare prima di raggiungere il livello finale accettabile di funzionalità. Questo fattore è calcolato secondo le linee guida dell'AASHTO.

Le attività di manutenzione devono essere pianificate per garantire le prestazioni strutturali e funzionali di una strada. Gli strati principalmente coinvolti nelle attività di manutenzione sono quelli superficiali, poiché sono a diretto contatto con i carichi in movimento e più suscettibili a deterioramento a causa dei flussi di traffico, degli agenti atmosferici e delle azioni esterne. Le attività di manutenzione considerate consistono nella demolizione dello strato danneggiato e nella rimessa in posa di nuovo conglomerato bituminoso, sono ripercorsi quindi tutti i processi riportati in Figura 1 e 2, per un numero di volte pari agli interventi. Il materiale rimosso è in parte riciclato per essere di nuovo utilizzato nella pavimentazione. La quantità di materiale rimosso e riinserta nella pavimentazione varia a seconda dello strato considerato. In questo studio è stato preso in esame una percentuale di rinserto del fresato del 20% nello strato di usura e del 30% nello strato di binder e di base. Durante il periodo di analisi riferito a 20 anni, vi è una diversa frequenza di manutenzione dei 3 strati delle diverse tipologie di pavimentazione, come riportato in Tabella 1. La frequenza di manutenzione, espressa in anni di vita utile, è stata stimata sulla base della valutazione della resistenza a fatica dei vari strati di conglomerato bituminoso e riferita alla tipologia di strada per la destinazione d'uso specificata (intensità utilizzo n. veicoli / anno). La stima della durata è confortata da risultati ottenuti da

prove sperimentali (resistenza a fatica e resistenza a trazione indiretta), svolte per le diverse tipologie di conglomerato bituminoso.

Nei paragrafi sottostanti vengono riportati in dettaglio i processi inclusi nell'analisi.

2.2.1. Estrazione e produzione del conglomerato bituminoso

La lista dettagliata dei materiali necessari e la relativa percentuale per la produzione delle diverse tipologie di conglomerato bituminoso degli strati è stata fornita dall'azienda promotrice del progetto. I dati per il conglomerato bituminoso convenzionale, quello con SBS e quello contenente il modificante presentano un alto grado di precisione perché riguardano prodotti già consolidati e usati quotidianamente dall'azienda. La percentuale di aggregati e bitume rispetto al conglomerato bituminoso sono riportate nella Tabella 2. L'emulsione bituminosa viene preparata nello stesso impianto di produzione del conglomerato bituminoso, ed è composta principalmente da bitume, acqua e una piccola percentuale di acido cloridrico ed etilendiammina.

Il processo di produzione del conglomerato prevede la selezione degli aggregati nelle diverse granulometrie e la loro essiccazione, durante quest'ultima fase è aggiunto anche il fresato. La temperatura per il processo di essiccazione è di 160° C per il conglomerato convenzionale, mentre per quello modificato sia con l'SBS che con il nuovo modificante è 170°. Infine, aggregati e fresato vengono messi in una torre di miscelamento, dove viene aggiunto il bitume precedentemente riscaldato. Il processo prepara 3 tonnellate di conglomerato in cicli di 45 secondi e prevede il consumo di energia elettrica e di energia termica nelle quantità indicate nella Tabella 2. All'interno del sito avvengono an-

Tabella 1 – Frequenza di manutenzione per i diversi strati per le diverse tipologie di pavimentazione

Tipologia di pavimentazione	Strato	Spessore (cm)	Anni Vita Utile	Cicli manutentivi in anni	Anni totali della pavimentazione
Convenzionale	Usura	5	5	4	20
	Binder	6	10	2	
	Base	14	20	1	
SBS	Usura	5	8	3	20
	Binder	6	16	2	
	Base	14	32	1	
Innovativo	Usura	5	15	2	20
	Binder	6	30	1	
	Base	14	90	1	

Tabella 2 – Percentuali dei materiali e consumi legati alla produzione del conglomerato bituminoso

Materiali	Quantità
% di aggregati rispetto al conglomerato bituminoso	96%
% di bitume rispetto al conglomerato bituminoso	4%
Produttività dell'impianto	240 t/h
Consumo di energia elettrica dell'impianto	27 kWh/h
Consumo di metano dell'impianto	24 m ³ /h
Produttività pala gommata	220 t/h

Tabella 3 – Percentuali dei materiali per produrre il bitume con SBS

Materiali	Quantità
Bitume	96,85%
Zolfo	0,15%
Stirene-Butadiene-Stirene	3%

che movimentazioni logistiche tramite pala gommata, con relativo consumo di gasolio; quest'ultimo e le emissioni associate al mezzo provengono dal database svizzero *Nonroad*.

Il co-polimero stirene-butadiene-stirene, nella sua forma granulare, viene aggiunto al bitume in una percentuale del 3%, tramite un apposito macchinario, in cui viene unito anche lo zolfo. Si ottiene quindi un bitume modificato, prodotto nello stesso impianto del conglomerato bituminoso convenzionale. In Tabella 3 si riportano le percentuali per ottenere il bitume modificato con SBS.

2.2.2. Trasporto

Sulla base delle informazioni fornite dalle aziende, la tipologia di mezzi coinvolti nel trasporto sono camion di tipo Euro 4 con capacità di cari-

co da 16 a 32 tonnellate. La Tabella 4 riporta le distanze medie per ogni materiale; nella prima colonna, "Trasporti considerati", vengono raggruppati i vari spostamenti coinvolti durante il ciclo di vita delle pavimentazioni. Il primo modulo, rappresentato in giallo in tabella, considera il trasporto delle materie prime all'impianto di produzione del conglomerato bituminoso; in particolare di seguito vengono esplicitati i vari siti di provenienza. Gli aggregati provengono dalle cave negli Appennini, ed è stata fornita una distanza media di 20 km; il bitume proviene da alcune raffinerie poste tra Mantova, Busalla e Ravenna e la distanza media da queste all'impianto è di 200 km. Il modificante, una volta prodotto viene trasportato dall'azienda situata a 175 km dall'impianto di produzione del conglomerato bituminoso. Per quanto riguarda la provenienza dell'SBS, è stato fatto riferimento alle maggiori aziende produttrici che sono cinesi e statunitensi. Il secondo trasporto, in verde, racchiude sia il trasporto del conglomerato bituminoso che dell'emulsione bituminosa al sito di stesura della pavimentazione. Tale distanza è stabilita dalla consueta pratica per il rifacimento del manto stradale, definita in funzione del vincolo di fluidità del conglomerato bituminoso al momento della posa. Il materiale deve arrivare con una temperatura non inferiore a 20°C in meno rispetto a quando è uscito dal sito di produzione; per questo il luogo di produzione è vicino al sito dove viene utilizzato (Green, 2018). Si è conteggiata così la distanza che il mezzo può percorrere senza abbassare ulteriormente la temperatura. Inoltre, viene utilizzato un camion cisterna per rifornire di carburante i mezzi d'opera direttamente al sito di posa. Il terzo trasporto, in azzurro nella tabella, riguarda il materiale rimosso. La distanza è analoga a quella ne-

Tabella 4 – Mezzi utilizzati per il trasporto dei materiali necessari alla produzione e distanza media percorsa per arrivare all'impianto di produzione

Trasporti considerati	Materiali	Mezzo di trasporto	Distanza percorsa (km)
Primo trasporto: materie prime all'impianto di produzione	Aggregati	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	20
	Bitume	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	200
	Modificante	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	175
	SBS	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	1500
Secondo trasporto: conglomerato bituminoso ed emulsione al sito di stesura	Conglomerato bituminoso	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	50
	Emulsione bituminosa	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	50
	Cisterna	Camion, Euro 4, capacità di carico da 3,5-7,5 t	50
Terzo trasporto: fresato al sito di produzione	Fresato	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	50

cessaria a compiere il tragitto nel senso inverso, quando il conglomerato deve essere portato al sito di stesura. Il materiale rimosso viene portato al sito di stoccaggio per essere lavorato attraverso un processo di vagliatura e frantumazione che richiede il consumo di energia elettrica: deve essere preparato per il riutilizzo in un nuovo conglomerato bituminoso per sostituire la strada demolita. La parte di materiale fresato che non viene riutilizzata, viene lasciata all'impianto di produzione dove sarà poi adibita ad altre funzioni come misti cementati o fondazioni.

2.2.3. Stesura

Il processo di stesura del conglomerato bituminoso e dell'emulsione bituminosa prevede alcuni passaggi con diversi macchinari. I mezzi coinvolti sono: la finitrice, il camion e il rullo compattatore. Tra uno strato e l'altro della pavimentazione viene messa l'emulsione bituminosa attraverso l'emulsionatrice, in modo da favorire la coesione. Sopra l'emulsione viene distribuito il conglomerato e compresso dal rullo compattatore. Quando si stende l'asfalto con il nuovo modificante è necessario distenderlo più volte, per questo motivo il rullo compattatore deve passare sulla pavimentazione più volte rispetto ad una pavimentazione convenzionale o formata con l'aggiunta di SBS e questo si traduce in una minore redditività del mezzo coinvolto.

In Tabella 5 vengono riportati i consumi e la produttività dei macchinari.

2.2.4. Demolizione

Al termine del periodo di vita utile della pavimentazione, avvengono le attività di rimozione che coinvolgono alcuni mezzi quali la fresatrice,

Tabella 5 – Potenza e produttività dei mezzi coinvolti nel processo di stesura

Mezzi	Potenza	Produttività	Consumo carburante
Finitrice	18-37 kW	140 t/h	21 l/h
Rullo compattatore per la pavimentazione convenzionale e con SBS	<18 kW	40m ³ /h	13,93 kg/h
Rullo compattatore per la pavimentazione con il modificante	<18 kW	31 m ³ /h	13,93 kg/h
Camion	< 18 kW	140 t/h	0,6 l/km
Emulsionatrice	-	0,025 km ² /h	8,5 l/h

Tabella 6 – Potenza e produttività dei mezzi coinvolti nel processo di demolizione

Mezzi	Potenza	Produttività	Consumo carburante
Fresatrice	75-130 kW	200 t/h	99,8 l/h
Camion	< 18 kW	140 t/h	0,6 l/km
Moto-spazzola	< 18 kW	0,0038 km ² /m	15 l/h

Tabella 7 – Valori per il processo di incenerimento

Energia	Quantità	Unità di misura
Potere calorifico medio dei rifiuti	10,95	MJ/kg
Potere calorifico plastica	35	MJ/kg
Energia elettrica	2,78	MJ/kg
Energia termica	4,06	MJ/kg

il camion e la moto-spazzola. Anche in questo caso l'azienda ha fornito i dati di produttività delle macchine, mentre i dati per le emissioni derivano dal database *Nonroad*. I valori di produttività e di consumo vengono riportati in Tabella 6. Il materiale fresato viene portato al sito di stoccaggio dove subisce un processo di trattamento in modo da essere pronto per l'aggiunta nel tamburo essiccatore.

2.2.5. Incenerimento

Il processo di incenerimento, presente solo nella pavimentazione convenzionale e con SBS, considera la generazione di energia elettrica e termica e le conseguenti emissioni in ambiente. I valori presi in esame derivano da dati sito-specifici per l'impianto A2A di Brescia pubblicati in un report (Fondra, 2016). È stato fatto riferimento a questo specifico impianto poiché è l'impianto convenzionato con l'azienda che raccoglie i rifiuti plastici per poi produrre il modificante. I dati per questo processo sono riportati in Tabella 7. La quantità di plastica considerata nel processo di incenerimento (14 t) è stata calcolata sulla base della quantità di materiale plastico che entra nel processo produttivo del modificante, considerando i rifacimenti dei diversi strati del manto stradale necessari in 20 anni.

2.2.6. Produzione del modificante

Il modificante, come si vede nella Figura 2, è formato da rifiuti plastici, PVB, grafene e attivante di adesione. Il processo produttivo del modificante prevede una selezione delle plastiche dure

e un trattamento del polivinilbutirale (PVB). Quest'ultimo è un rifiuto proveniente dal processo di recupero dei parabrezza e dei vetri laminati in generale, i quali sono rivestiti con un film sottile di PVB. Le plastiche dure provengono dai centri di raccolta e il loro destino è appunto l'incenerimento, ma grazie a questo nuovo modificante vengono riciclate; la loro selezione è fatta tramite flottazione, con ingresso di acqua nel ciclo produttivo. La maggior parte dell'acqua è trattata in un depuratore interno ed è riutilizzata. Le plastiche scartate durante la selezione sono inviate a recupero energetico. La grafite naturale viene lavorata con l'utilizzo dell'acido solforico e dell'acido nitrico, si forma così la grafite intercalata (questa viene prodotta da un'azienda statunitense). Per ottenere il grafene, la grafite viene sottoposta a diversi processi come l'espansione termica e l'esfoliazione in acqua assistita da ultrasuoni. Gli acidi quando vengono sottoposti ad un trattamento termico, permettono l'espansione e l'allontanamento dei diversi strati che compongono la grafite. Il grafene viene poi trasportato in un packaging di carta e plastica all'impianto di produzione del modificante. L'attivante di adesione permette di migliorare la coesione tra i componenti e in seguito tutti gli ingredienti sono uniti in modo da produrre il composto in granulato. Questi granuli vengono mes-

si in grandi borse di polipropilene (*Flexible Intermediate Bulk Container*) e trasportati all'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, dove poi sarà inserito all'interno dello stesso. Il modificante in granuli viene inserito in una percentuale del 5% sul peso del bitume. I dati per produrre il conglomerato bituminoso con il modificante sono gli stessi della Tabella 2, dove però per il consumo di energia elettrica e di metano è stata stimata una domanda supplementare di 1100 kcal/t ogni 5°C in più, a causa della temperatura di produzione maggiore.

Per ogni materiale sono stati considerati i trasporti coinvolti. I dati per produrre il modificante sono dati riservati dell'azienda, coperti da brevetto industriale (Gipave, Ecopave 2020).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati dei potenziali impatti ambientali riferiti all'unità funzionale vengono riportati in Figura 3. La soluzione migliore risulta essere il conglomerato con l'aggiunta del nuovo modificante, in quanto permette una durata di vita maggiore della pavimentazione e consente di ridurre gli interventi di manutenzione. Infatti, come riportato nella Tabella 1, la frequenza di manutenzione è diversa nelle tre tipologie di pavimentazione. Considerando complessivamente i 3 strati della stra-

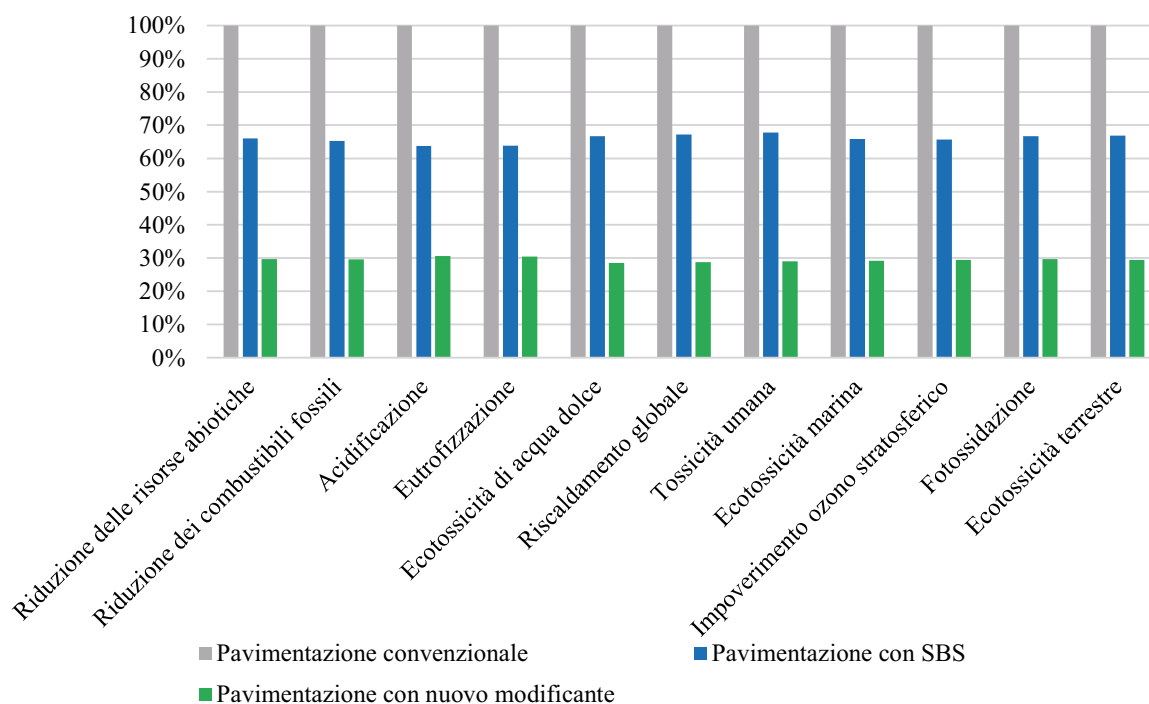


Figura 3 – Confronto dei potenziali impatti ambientali tra pavimentazione convenzionale, con SBS e con il nuovo modificante

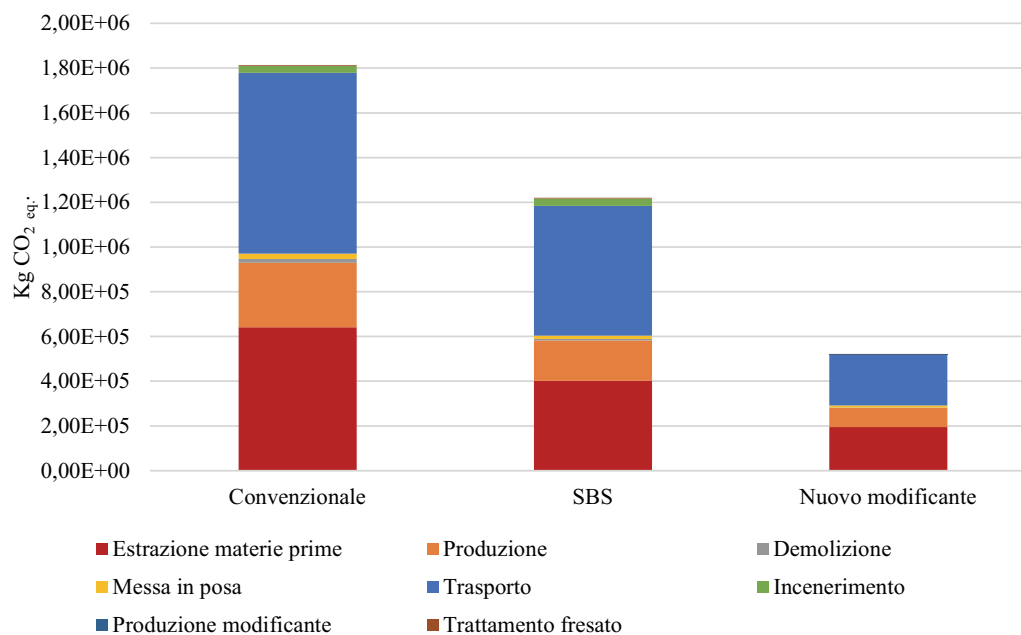


Figura 4 – Analisi dei contributi per ciascuna fase del ciclo di vita per la categoria del GWP(CML-2001)

da: usura, binder e base, il numero di interventi previsti in 20 anni per la pavimentazione convenzionale è 7, per quella con SBS è 6 e per quella con il nuovo modificante è 4. Il nuovo modificante consente alla pavimentazione di avere meno interventi manutentivi, di conseguenza si riducono tutte le attività coinvolte per la manutenzione della strada ed è necessario meno conglomerato bituminoso per la costruzione. Il modificante, infatti, permette alla pavimentazione innovativa di ridurre gli impatti ambientali del 70% in tutte le categorie considerate rispetto ad una pavimentazione convenzionale e del 40% rispetto alla pavimentazione formata dal conglomerato bituminoso con SBS.

Inoltre, al fine di identificare le fonti di impatto maggiore, la Figura 4 mostra il contributo di ogni fase del ciclo di vita delle pavimentazioni, per la categoria del riscaldamento globale. L'impatto del riscaldamento globale è espresso in chilogrammi di CO₂ equivalenti.

La fase più impattante per questa categoria di impatto risulta essere il trasporto con valori percentuali che si attestano rispettivamente del 45%, 48% e 44%. Il consumo di carburante dei mezzi di trasporto dipende dalla distanza percorsa; risulta minore nel nuovo modificante perché sono necessari meno tragitti per fornire al cantiere il materiale necessario.

Seguono poi le fasi di estrazione e di produzione del conglomerato bituminoso, le quali mostrano valori di emissioni che variano dal 15% al 37%.

Hanno un contributo molto alto, in termini di impatto ambientale, per la presenza di bitume, un derivato dal petrolio, il quale ha un elevato impatto durante la sua produzione. Le fasi che comprendono attività di manutenzione e trattamento del fresaio hanno impatti non più alti del 2%. In tutte le fasi del ciclo di vita il nuovo modificante consente di ridurre le emissioni di CO₂ sia rispetto al sistema convenzionale che a quello con SBS.

L'utilizzo di materiali plastici riciclati in aggiunta a bitume e aggregati consente di avere un minor impatto ambientale perché permette di allungare la vita utile della pavimentazione e di conseguenza di ridurre la quantità di materiale necessario per la produzione del conglomerato bituminoso. Così facendo si riducono le emissioni legate alle fasi estrattive e produttive delle materie prime e questo rappresenta una strategia per promuovere un corretto uso delle risorse e dell'efficienza energetica.

4. CONCLUSIONI

Questo lavoro ha analizzato il ciclo di vita di differenti tipologie di pavimentazioni stradali in modo da valutare il diverso contributo in termini di impatti ambientali durante un periodo di analisi di 20 anni, al fine di individuare la soluzione migliore per ridurre il carico ambientale e favorire lo sviluppo di modelli di produzione innovativi nel settore stradale. Sono state considerate tutte le fasi del ciclo di vita delle pavimentazioni, dal-

l'estrazione delle materie prime fino al riutilizzo del materiale fresato. I risultati ottenuti da questa analisi LCA, mostrano che la pavimentazione contenente il nuovo modificante permette una riduzione degli impatti ambientali per tutte le categorie considerate. La formulazione di modificanti, contenenti materiali plastici riciclati (altrimenti destinati a termovalorizzazione) e materiali a base grafenica, contribuisce a ridurre gli impatti ambientali delle pavimentazioni stradali, in quanto allunga la vita utile del conglomerato bituminoso e questo consente nell'arco temporale di 20 anni (durata media di una strada) di ridurre i cicli manutentivi. Di conseguenza in questo tipo di pavimentazioni innovative sono necessarie meno materie prime per la loro realizzazione e la consueta manutenzione.

Considerando che, a livello nazionale, nel 2018 sono state prodotte 26 milioni di tonnellate di asfalto (Asphalt in figures, 2019) e che 3,6 milioni di tonnellate di rifiuti plastici sono state raccolte per essere trattate e di queste il 32,8% è destinato al recupero energetico (Plastic Europe, 2020), sarebbe interessante aumentare la percentuale di bitume additivato con questi materiali di rifiuto. In Italia la percentuale di bitume additivato rappresenta il 17% del totale: aumentare la quantità di conglomerato bituminoso contenente plastiche dure di natura poliolefinica andrebbe nella direzione di incentivare il riciclo dei materiali plastici. Destinare le plastiche poliolefiniche a questa filiera costituirebbe un forte potenziale, anche se, bisognerebbe quantificare nel dettaglio la frazione merceologica di queste plastiche disponibili.

La formulazione di modificante considerata in questo progetto consente di riciclare 14 tonnellate di rifiuti plastici; questo valore è stato ottenuto sulla base della quantità di materiale plastico che serve per produrre il modificante, considerando un arco temporale di 20 anni e i diversi rifacimenti del manto stradale. Per concludere si può affermare che la soluzione proposta dal progetto *Ecopave* risulta in linea con la promozione e l'applicazione di criteri di circolarità per le plastiche dure, per le quali l'immissione come materia prima seconda in un nuovo ciclo produttivo (additivo per conglomerati bituminosi), rappresenta un modello sostenibile di gestione del fine vita. Lo sviluppo di nuovi materiali e la loro applicazione in pavimentazioni stradali che hanno così ridotti impatti ambientali fornisce ai gestori e ai decisori uno strumento per garantire maggiore sostenibili-

tà al territorio, un esempio di efficienza nell'uso delle risorse e nella gestione dei rifiuti. Inoltre, questa applicazione permette di limitare il consumo di suolo (riduzione delle discariche) e di risorse naturali. Dall'analisi LCA effettuata, si evince che il modificante risponde positivamente ai requisiti di maggiore sostenibilità e circolarità, evidenziando una performance ambientale sensibilmente migliorativa rispetto alle tecnologie attualmente più diffuse per la realizzazione di pavimentazioni stradali.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures (1993).
- Asphalt In Figures, 2019 EAPA – European Asphalt Pavement Association, https://096.wpcdnnode.com/eapa.org/wp-content/uploads/2020/12/Asphalt-in-figures_2019.pdf
- Aflaki S. e Tabatabaee N. (2008) Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. *Construction and Building Materials* 23(6): 2141-2150.
- Akmal N. e Usmani A.M. (1999) Application of asphalt-containing materials *Polym News* 24,136-40.
- Araújo J.P.C., Oliveira J.R.M. e Silva H.M.R.D. (2014) The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D* 32(0): 97-110.
- Aurangzeb Q., Al-Qadi I.L., Ozer H. e Yang R. (2014) Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources Conservation and Recycling*. 83 (0): 77-86.
- Bloom E.F., Horstmeier G.J., Pakes Ahlman A., Edil T.B. e Whited G. (2017) Assessing the life cycle benefits of recycled material in road construction. In: *GeoChicago-Conference-Paper-I-94-and-Beltline-LCA*. Chicago.
- Butt A.A. (2014) *Life Cycle Assessment of Asphalt Roads*. KTH Architecture and built environment.
- Carpenter A.C., Gardner K.H., Fopiano J., Benson C.H. e Edil, T.B. (2007) Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction. *Waste Management* 27 (10):1458–1464.
- Cass D. e Mukherjee A. (2011) Calculation of greenhouse gas emissions for highway construction operations using a hybrid life cycle assessment approach: a case study for pavement operations. *Journal of Construction Engineering and Management* 137 (11), 1015-1025.
- Chiu C-T., Hsu T-H. e Yang W-F. (2008) Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources Conservation and Recycling*. 52 (3): 545-556.
- EAPA (European Asphalt Pavement Association), 2020. *Asphalt In Figures*. Disponibile su: *Asphalt in figures_2018.indd* (eapa.org) -
- Ecopave Procedimento per la produzione di un additivo per conglomerati bituminosi con prestazioni meccaniche ele-

- vate. Numero domanda Italia: 102019000006600. Data richiesta 07.05.2019. Stato: pendente.
- Ferreira V.J., Sáez-De-Guinoa Vilaplana A., García-Armingol T., Aranda-Usón A., Lausín-González C., López-Sabirón A.M. e Ferreira G. (2016) Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production* 130 (1): 175-186.
- FHWA, 2011. Highway Statistics Series. Disponibile su: <http://www.fhwa.dot.gov>.
- Fondra G. (2016) Rapporto dell'osservatorio sul funzionamento del termoutilizzatore di Brescia relativo all'anno 2016. Comune di Brescia, settore sostenibilità ambientale e scienze naturali.
- Giani M.I., Dotelli G., Brandini N. e Zampori L. (2015) Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 104, Part A, 224-238.
- Gipave, Composizione di additivo per conglomerati bituminosi con prestazioni meccaniche elevate. Numero domanda Italia: 102017000126622. Data richiesta 07.11.2017. Stato concesso. Data concessione: 24.01.2020.
- Green L. (2018) La produzione del conglomerato bituminoso. Disponibile su: <http://www.sitib.it/wp-content/uploads/2018/06/db11.pdf>
- Herranz-Loncán A. (2007) Infrastructure investment and Spanish economic growth, 1850-1935. *Explorations in Economic History* 44 (3): 452-468.
- Huang Y., Bird R. e Heidrich O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production* 17(2): 283-296.
- Isacsson U. e Zeng H. (1998) Cracking of asphalt at low temperature as related to bitumen rheology. *Journal of Material Science* 33 (8): 2165-2170.
- ISO (2006a), ISO 14040 International Standard in: Environmental Management – Life Cycle Assessment-Principles and Framework.
- ISO (2006b), ISO 14044 International Standard, Environmental Management – Life Cycle Assessment- Requirements and Guidelines.
- ISPRA (2019) Trasporti. Disponibile su: https://www.isprambiente.gov.it/files/2020/pubblicazioni/stato-ambiente/annuario-2020/4_Trasporti_Finale_2019.pdf
- Kalantar Z.N. (2010) Properties of bituminous binder modified with waste polyethylene terephthalate presented at Malaysia Universities Transportation Research Forum and Conferences, December 21, 2010, University Tenaga Nasional.
- Knaap T. e Oosterhaven J. (2011) Measuring the welfare effects of infrastructure: A simple spatial equilibrium evaluation of Dutch railway proposals. *Research in Transportation Economics* 31 (1): 19-28.
- Nonroad database Disponibile su: Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), 2019. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/state/non-road-datenbank.html>
- Pizza A., Metz R., Hassanzadeh M. e Bantignies J.-L. (2014) Life cycle assessment of nanocomposites made of thermally conductive graphite nanoplatelets. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19(6): 1226-1237.
- Plastics Europe, 2020 https://www.plasticseurope.org/download_file/force/4829/181
- Rietveld P. (1994) Spatial economic impacts of transport infrastructure supply. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 28 (4): 329-341.
- Santos J., Bressi S., Cerezo V. e Lo Presti D. (2019) A sustainability-based decision support system for road pavements. *Journal of Cleaner Production* 206(1): 524-540.
- Steger S. e Bleischwitz R. (2011) Drivers for the use of materials across countries. *Journal of Cleaner Production* 19 (8), 816-826.
- Sulyman M., Haponiuk J. e Formela K. (2016) Utilization of recycled polyethylene terephthalate pet in engineering materials: a review. *International Journal of Environmental Science and Development* 7 (2): 100-108.
- Uranga O.G. (2008) Rheological property of bitumen modified with polyethylene and polyethylene-based blends.
- Wang H., Thakkar C., Chen X. e Murrell S. (2016) Life-cycle assessment of airport pavement design alternatives for energy and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production* 133,163-171.
- Yuonne B. e Yajaira M.P.M. (2001) Polymer modified asphalt *Vision Tecnologica* 9(1):39-48.
- Zheng X., Easa S.M., Yang Z., Ji T. e Jiang Z. (2019). Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: methodology and case study. *Journal of Cleaner Production* 213, 659-672.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il progetto *Ecopave* POR-FESR 2014-2020 finanziato da Regione Lombardia sulla call accordi per la ricerca e l'innovazione, le aziende Iterchimica S.r.l., G.ECO S.r.l. e Directa Plus S.p.a. per la collaborazione nel fornire i dati necessari per lo svolgimento dello studio. Ringraziamo anche la Dott. Francesca Rosa e il Dott. Massimo Perucca per la raccolta e l'analisi dei dati.

Il lavoro descritto nell'articolo è stato presentato durante la quinta edizione della Giornata di studio "Rifiuti e Life Cycle Thinking" tenutasi online il 9 marzo 2021 e organizzata e coordinata dal gruppo di ricerca "AWARE" (Assessment on Waste and Resources) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano in collaborazione con il Gruppo di Lavoro "Gestione e Trattamento dei Rifiuti" dell'Associazione Rete Italiana LCA.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2021 è sostenuta da:



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 2/2021



Veolia Water Technologies Italia S.p.A.

