

**Road Pavement: Life Cycle Assessment,
Energy and Environmental Sustainability****PAVIMENTAZIONI STRADALI:
ANALISI DI CICLO DI VITA E SOSTENIBILITÀ
ENERGETICO-AMBIENTALE****Filippo Praticò^a, Marinella Giunta^b, Marina Mistretta^c, Teresa Maria Gulotta^d*^a*Dipartimento DIIES, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Via Graziella, Feo di Vito - 89124, Reggio Calabria, Italia*^b*Dipartimento DICEAM, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Via Graziella, Feo di Vito - 89124, Reggio Calabria, Italia*^c*Dipartimento PAU, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Via dell'Università, 25- 83124, Reggio Calabria, Italia*^d*Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, viale delle Scienze, 90128, Palermo, Italia**filippo.pratico@unirc.it; marinella.giunta@unirc.it; marina.mistretta@unirc.it; teresa.gulotta@deim.unipa.it***Abstract**

Based on the 2030 Agenda for Sustainable Development (25th September 2015), transport systems have to be 1) Sustainable. 2) Quality and resilient. 3) Safe. To this end, note that the Italian Ministry of Research funded the Research Project PRIN USR342 that involves related ideas and focuses on 3 paving solutions (made with recycled materials and sustainable technologies), 4 sets of modules (software), and 2 platforms. The objective of the study here presented deals with the assessment of the best pavement technology based on energy and environmental performance. Consequently, a life cycle assessment, LCA, was applied, considering material production, construction, maintenance, and end of life. The environmental impact of the different pavement technologies was derived. Results demonstrate that the use of warm mix asphalts and of recycled asphalt pavement (RAP) yields the lowest energy consumption and environmental impact. Furthermore, under the hypotheses of the study, the production of mixtures is crucial because it corresponds to a contribution of about 60-70% in the life cycle of the different materials. LCA approach confirms as a methodology able to help decision makers when strategies and actions for the eco-design of road pavements are needed.

KEY WORDS: *Sustainability, Road Infrastructures, Pavements, Life Cycle Assessment.***1. Introduzione**

Nell'ambito delle pavimentazioni stradali è sempre più pressante la necessità di migliorare i materiali e le pratiche di costruzione e manutenzione allo scopo di ridurre al minimo gli oneri per la società e l'ambiente, con particolare riguardo all'impronta di carbonio ed al consumo di energia. Ciò è in linea con gli obiettivi dell'agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, adottata nel corso del vertice delle Nazioni Unite sullo sviluppo sostenibile del 25 settembre 2015. In essa, infatti, con riferimento ai sistemi di trasporto, si ritengono irrinunciabili i requisiti di: Sostenibilità, Qualità e Resilienza, Sicurezza, Convenienza ed Accessibilità. Allo stesso tempo, il progetto di ricerca

PRIN USR342 (vedi Fig. 1) si concentra su concetti simili e gli output previsti sono 3 soluzioni di pavimentazione, 4 set di moduli (software) e 2 piattaforme.

Più in dettaglio, l'attività 7 del progetto di ricerca incentrato sulle pavimentazioni stradali riguarda il metodo basato sull'analisi del ciclo di vita, internazionalmente riconosciuta come Life Cycle Assessment (LCA) e su metodi non distruttivi finalizzati al monitoraggio dello stato strutturale (NDT SHM). Tradizionalmente, le pavimentazioni stradali sono realizzate con conglomerato bituminoso (Hot Mix Asphalt, HMA) prodotto a una temperatura di circa 170° C.

Una temperatura così elevata consuma grandi quantità di energia e produce molti gas di scarico e polveri solide

*Il documento nella sua interezza è frutto del lavoro congiunto dei quattro autori.

[1]. Inoltre, è necessaria una grande quantità di risorse non rinnovabili. Per ridurre e mitigare gli impatti ambientali associati all'uso dell'HMA, sono stati recentemente sviluppati ed applicati diversi materiali [ad es. polverino di gomma, CR, fresato di conglomerato bituminoso, RAP, rifiuti di plastica, WP, rifiuti industriali e prodotti, V] ed apposite tecnologie [ad es. conglomerati bituminosi tiepidi, detti Warm Mix Asphalt, WMA], riconosciuti come maggiormente sostenibili dal punto di vista ambientale [2-5]. Le nuove soluzioni sono sicuramente promettenti, ma la valutazione di quanto contribuiscano alla sostenibilità della pavimentazione è una questione rilevante da indagare, poiché la loro efficacia dipende dal contesto in cui vengono applicati e dal modo in cui la sostenibilità viene misurata e valutata [6].



Fig.1 - La Life Cycle Assessment.

(fonte: Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale USR342)

L'analisi del ciclo di vita, LCA, rappresenta una metodologia adatta a valutare il profilo ecologico di una pavimentazione, dal momento che considera tutte le fasi di produzione e trasporto dei materiali, costruzione, gestione, di manutenzione, rinnovo, dismissione e gestione dei rifiuti [7]. I risultati di uno studio LCA possono fornire informazioni sufficienti per facilitare l'eco-design e la valutazione comparativa di soluzioni alternative basate sulla conoscenza [8-10].

Sulla base di quanto precede, il presente studio è volto all'identificazione della migliore tecnologia di pavimentazione in termini di energia e prestazioni ambientali, in base a presupposti specifici. Viene effettuata la stima

della quota sugli impatti totali di ciascuna fase del ciclo di vita. L'analisi si sviluppa secondo una prospettiva *cradle-to-grave* (dalla culla alla tomba) e considera pertanto tutti i processi caratterizzanti la produzione, la costruzione, la manutenzione e la fine della vita di materiali compositi, con l'obiettivo finale di evidenziare le principali differenze potenziali, in termini di oneri ambientali, dei diversi materiali per pavimentazione.

2. Metodologia

2.1. Definizione degli obiettivi

Gli autori presentano l'analisi degli impatti energetico-ambientali di pavimentazioni stradali urbane.

Gli obiettivi dello studio sono:

- valutare le prestazioni energetiche e ambientali (eco-profilo) della pavimentazione stradale urbana, tramite la metodologia della Life Cycle Assessment (LCA), eseguita in accordo alle norme della serie ISO 14040 [11,12];
- individuare delle fasi a maggiore impatto (hotspot energetici e ambientali) lungo il ciclo di vita della pavimentazione;
- sulla base degli hotspot, definire adeguate opzioni di miglioramento, mettendo a confronto gli ecoprofilo di quattro differenti tipologie di miscele bituminose.

L'analisi di scenario consente di identificare la configurazione tecnologica ottimale in termini di consumo di energia ed impatti ambientali.

La valutazione degli impatti di ciclo di vita è stata eseguita in accordo al metodo ILCD Midpoint 2011 (International Life Cycle Data System, ILCD), [13], attraverso l'analisi delle seguenti categorie di impatto:

- Consumo globale di energia primaria (Global Energy Requirement - GER);
- Cambiamento Climatico (Climate change - CC);
- Assottigliamento dello strato di ozono (Ozone depletion - OD);
- Tossicità umana (Human toxicity - cancer effects HTc, non-cancer effects HTnc);
- Particolato (Particulate matter (PM));
- Radiazione ionizzante (Ionizing radiation - IRhh, IRe);
- Formazione di ozono fotochimico (Photochemical Ozone Formation Potential - POFP);
- Acidificazione (Acidification Potential - AP);
- Eutrofizzazione Terrestre (Terrestrial Eutrophication (EUT);
- Eutrofizzazione delle acque (Freshwater Eutrophica-

tion (EFw);

- Eutrofizzazione marina (Marine Eutrophication (ME);
- Ecotossicità dei sistemi acquatici (Freshwater ecotoxicity - Ftox);
- Uso del suolo (Land Use - LU);
- Esaurimento di risorsa idrica (Water Resource Depletion - WRD);
- Esaurimento di risorse minerali e fossili (Mineral and Fossil resource Depletion - MFD).

2.2. Unità funzionale e definizione dei confini del sistema

Ai fini dell'analisi, è stata considerata una strada a doppia corsia e singola carreggiata, di lunghezza pari a 1 km e larghezza 9,5 m. Con riferimento ad essa, sono state definite quattro tipologie di pavimentazione stradale, con miscele bituminose composte da materiali riciclati e tecnologie di produzione eco-innovative.

L'unità funzionale scelta è 1 m² di pavimentazione, di spessore 320 mm (escluso il sottofondo) e composta da: uno strato bituminoso di usura (spessore 50 mm), uno strato bituminoso di collegamento (spessore 70 mm), e uno strato granulare di base (spessore 200 mm). Al di sotto dello strato di base è prevista la collocazione del sottofondo.

Con riferimento ai confini del sistema, lo studio è stato condotto considerando le seguenti fasi di ciclo di vita, secondo un approccio "dalla culla alla tomba" [14]:

- Produzione delle miscele bituminose, incluse le fasi di estrazione delle materie prime e approvvigionamento energetico.
- Trasporto delle materie prime dai siti di estrazione a quelli di produzione e trasporto delle miscele bituminose al sito di costruzione.
- Fase di costruzione: posa e compattazione.
- Manutenzione: fresatura, conferimento in discarica e ripavimentazione dello strato di usura. Assumendo per la pavimentazione un ciclo di vita pari a 20 anni, si ipotizza il rifacimento dello strato di usura dopo 10 anni dalla costruzione della pavimentazione, come suggerito dalle Regole di Categoria di Prodotto (PCR) [15].
- Fine vita: demolizione della pavimentazione, trasporto e trattamento dei rifiuti.

2.3. Analisi di Inventario

Con riferimento alla fase di Analisi di Inventario (Life Cycle Inventory - LCI), sono stati quantificati i flussi energetici e ambientali in ingresso e in uscita dalle fasi di ciclo di vita

del sistema in studio, mediante bilanci di massa ed energia dell'unità funzionale per ogni scenario esaminato.

I dati primari sono stati raccolti tramite indagini di letteratura e attraverso interviste con imprese locali ed esperti del settore [16-18].

I dati secondari, relativi agli eco-profilo delle fonti energetiche, delle materie prime, dei trasporti, del trattamento dei rifiuti e dell'elettricità sono stati tratti da Ecoinvent 3 [19]. L'eco-profilo dell'elettricità è stato riferito al mix elettrico italiano, mentre gli eco-profilo dei materiali impiegati sono stati riferiti al contest europeo. Lo studio è stato caratterizzato da un'analisi di scenario, mettendo a confronto quattro pavimentazioni stradali, aventi le stesse caratteristiche geometriche, ma realizzate con diversi materiali, miscele e tecnologie [17,18] (vedi Tab. 1).

Sono stati considerati quattro scenari, dei quali tre innovativi ed uno di riferimento (vedi Tab. 1):

- Scenario Base (BS), nel quale lo strato di usura è un drenante con vuoti residui maggiori del 18%. Esso insiste su di uno strato bituminoso di collegamento ed un misto granulare.
- Scenario 1 (S1), nel quale il conglomerato bituminoso è additivato con plastiche di scarto (waste plastics, WP) e polverino di gomma da pneumatico usato (crumb rubber, CR), con percentuali pari a circa 11% per ciascun prodotto di scarto.
- Scenario 2 (S2), nel quale lo strato di usura coincide con quello dello scenario di base, mentre lo strato di collegamento è realizzato impiegando la tecnologia di produzione a temperature "tiepide" (warm mix asphalt, WMA).
- Scenario 3 (S3), che include ancora uno strato di usura realizzato con la tecnologia WMA, ma con addizione del 44% di fresato (RAP). Lo strato di usura corrispondente è qui denominato PWMA. Lo strato sottostante (di collegamento, DWMA) e lo strato in misto granulare di fondazione sono anch'essi confezionati con il 44% di fresato (RAP).

Strato	Scenario base	Scenario 1 (WP)	Scenario 2 (WMA)	Scenario 3 (WMA+RAP)
Usura 50 mm	Drenante	Drenante con WP	Drenante	Drenante con RAP
Binder 70 mm	Binder Chiuso	Binder Chiuso	Binder Chiuso (WMA)	Binder Chiuso (WMA + RAP)
Fondazione 200mm	Misto granulare	Misto granulare	Misto granulare	Misto granulare + RAP

Tab. 1 - Materiali e scenari.
[fonte: propria elaborazione]

2.3. Risultati

La figura (vedi Fig. 2) illustra i risultati ottenuti per gli eco-profilo dei quattro scenari comparati, espresso come variazione percentuale rispetto allo scenario di base.

Si evidenzia che lo Scenario 3 presenta i minori impatti, sia in termini di consumo di energia primaria che di con-

tributo alle categorie di impatto ambientale esaminate.

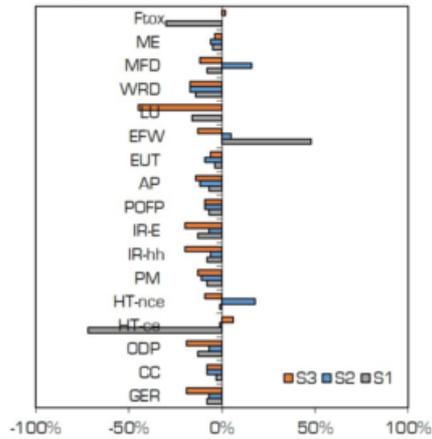


Fig. 2 - Percentuale di variazione degli impatti rispetto allo scenario base. [fonte: propria elaborazione]

In particolare, le riduzioni più significative si verificano per HT-ce nello Scenario 1 [72%]. Altre riduzioni rilevanti si osservano per WRD [14% nello Scenario 1, 17% nello Scenario 2 e 17% nello Scenario 3], PM [8% nello Scenario 1, 11% nello Scenario 2 e 13% nello Scenario 3]. Con riferimento alla categoria di impatto CC, essa registra un range di variazione tra 81,8 kgCO₂eq nello Scenario Base e 75 kgCO₂eq negli Scenario 2 e 3, con un decremento dell'8%. HT-nce, EFW e MFD mostrano, invece, un incremento nello Scenario 2. In particolare, EFW aumentano in modo significativo anche nello Scenario 1. La figura [vedi Fig. 3] illustra i risultati dell'analisi di scenario e consente di individuare il contributo di ogni fase di ciclo di vita della pavimentazione stradale (P, T, C, M, EoL) alle categorie di impatto ambientale, in ognuno degli scenari in esame (BS, S1, S2, ed S3).

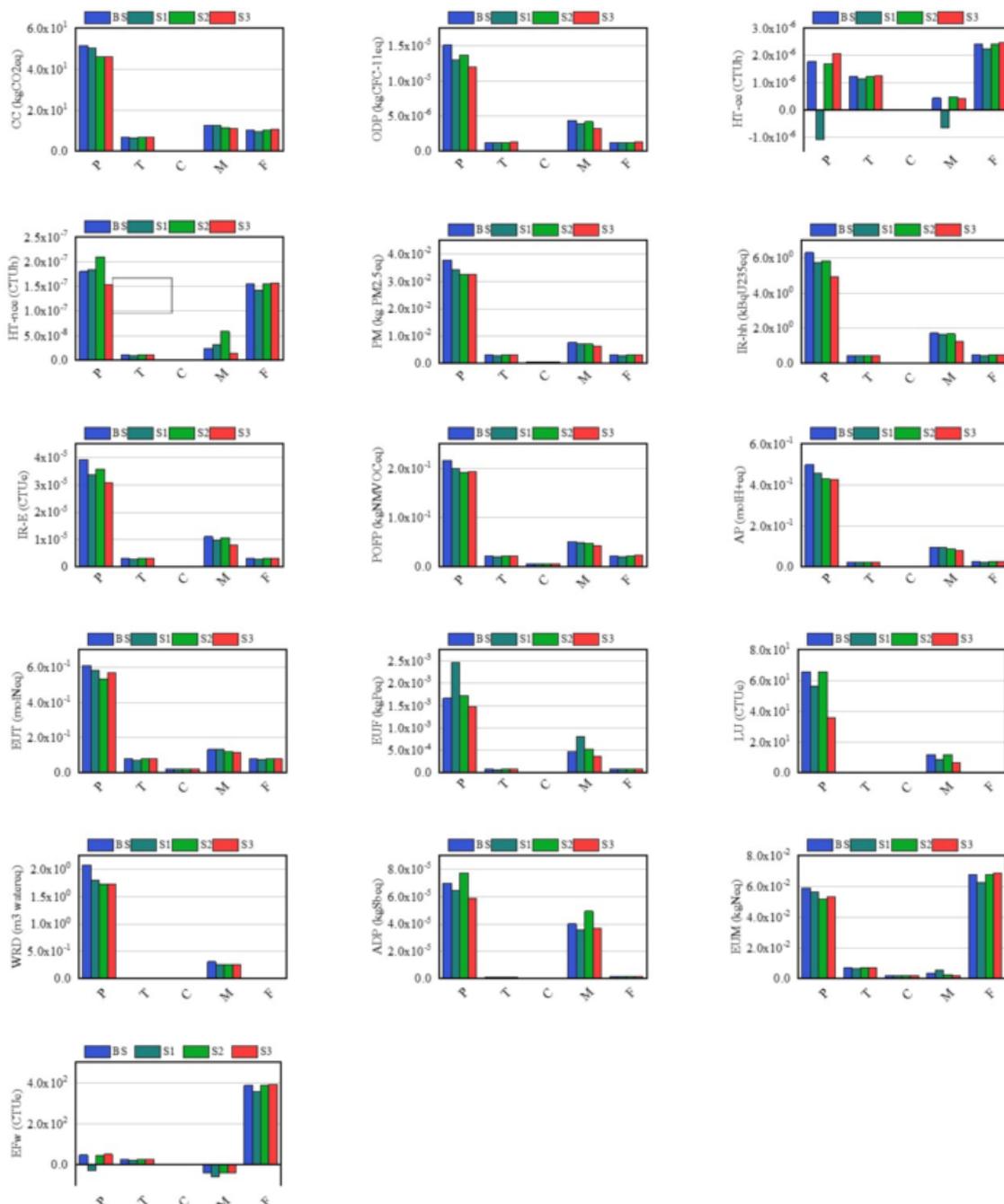


Fig. 3 - Analisi del contributo delle fasi del ciclo di vita alle categorie di impatto. [fonte: propria elaborazione]

Da un'attenta lettura della figura (vedi Fig. 3), si nota che, per tutti gli scenari a confronto, la fase di produzione dell'asfalto (miscela bituminosa) è quella che induce il maggiore impatto in tutte le categorie di impatto esaminate, con un contributo maggiore del 60%.

Il valore negativo dell'indicatore ambientale HT-ce nello Scenario 1, caratterizzato dall'introduzione di plastiche riciclate nella miscela bituminosa, è essenzialmente legato all'impatto evitato, connesso al risparmio di materie plastiche vergini. La figura (vedi Fig.4) mostra il contributo di ogni fase di ciclo di vita al GER, che esprime il consumo di energia primaria durante l'intero ciclo di vita della pavimentazione stradale, per ogni scenario.

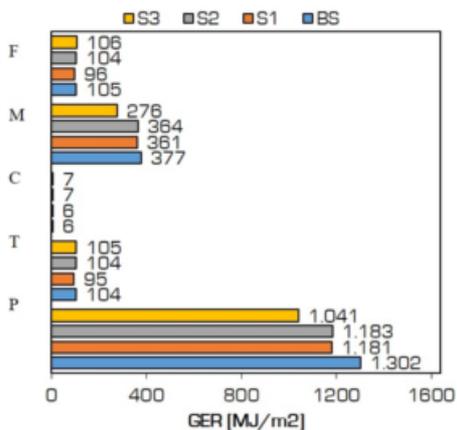


Fig. 4 - Contributo delle varie fasi di vita al consumo globale di energia primaria (GER) per ogni scenario.
(fonte: propria elaborazione)

Anche per questo indicatore, la fase di ciclo di vita più rilevante è la produzione, che incide per circa il 68% del GER complessivo in tutti gli scenari esaminati. Il processo di costruzione presenta il contributo al GER più significativo nello Scenario 3 (circa 7MJ/m²). Il maggiore fabbisogno energetico è dovuto alla fase di fresatura.

La fase di manutenzione incide per circa il 20% sul GER complessivo in tutti gli scenari. Tale incidenza è essenzialmente legata all'assunzione di un processo di sostituzione dello strato di usura durante il ciclo di vita della pavimentazione. Inoltre, le fasi di trasporto e di fine vita contribuiscono per circa 6% in tutti gli scenari in esame.

5. Conclusioni

In questo studio è stata presa in considerazione la sostenibilità ambientale di diversi materiali e tecnologie per le pavimentazioni stradali misurata mediante l'approccio LCA. In particolare, l'attenzione è stata focalizzata su materiali riciclati (pavimentazioni in asfalto rigenerato, polverino di gomma e plastica di scarto) e sulle tecnologie eco-compatibili, quali l'asfalto tiepido, WMA. Sono state esaminate diverse configurazioni di pavimentazione, con l'obiettivo di rilevare la soluzione di pavimentazione ottimale dal punto di vista energetico e ambientale.

Un'ulteriore analisi ha permesso di identificare le fasi e i

processi responsabili degli impatti più elevati.

La pavimentazione realizzata utilizzando WMA (Scenario 2) comporta un minore consumo di energia e minori impatti ambientali rispetto alle pavimentazioni tradizionali in conglomerato bituminoso. Se a questa tecnologia, già di per sé vantaggiosa sotto il profilo ambientale, si associa l'impiego del RAP (Scenario 3), riducendo così il consumo di bitume vergine ed aggregati, i benefici in termini di impatto ambientale e consumo energetico aumentano sensibilmente. I risultati mostrano che la produzione di miscele per pavimentazioni è un passaggio cruciale nel ciclo di vita della pavimentazione.

Un componente critico è il bitume, che è un prodotto a base di petrolio. L'impegno di WP (come sostituto dei polimeri) e RAP (come sostituto di aggregati vergini e bitume) è una soluzione strategica nel perseguimento della sostenibilità nelle costruzioni stradali, mentre, sotto il profilo metodologico, l'LCA si rivela uno strumento efficace per misurare la sostenibilità e fornire informazioni utili per migliorare il profilo ecologico delle pavimentazioni stradali, limitare il consumo di energia e migliorare la qualità dell'ambiente. L'approccio LCA consente di affrontare questioni che si riferiscono sia all'energia, che agli ecosistemi, e ciò permette di identificare soluzioni migliorate, tenendo conto dell'integrazione tra sistemi di produzione, rispettosi dell'ambiente, e fattibilità tecnologica.

Bibliografia

- [1] Capitão S.D., Picado-Santos L.G., Martinho F., *Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt*. In: Construction and Building Materials, n. 36, pp. 1016 - 1024, 2012
- [2] Rodríguez-Alloza A.M., Malik A., Lenzen M., Gallego J., *Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures*. In: Journal of Cleaner Production, n. 90, pp. 171 - 182, 2015
- [3] Santos J., Bryce J., Flintsch G., Ferreira A., Diefenderfer B., *A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices*. In: Structure and Infrastructure Engineering, vol. 11(9), pp. 1199 - 1217, 2015
- [4] Bressi S., Colinas-Armijo N., Di Mino G., *Analytical approach for the mix design optimisation of bituminous mixtures with crumb rubber*. In: Mater Struct, vol. 51(1), p. 26, 2018
- [5] Farina A., Zanetti M.C., Santagata E., Blengini G.A., *Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement*. In: Resour. Conserv. Recycl., n. 117, pp. 204 - 212, 2017
- [6] Santos J., Bressi S., Cerezo V., *Lo Presti D., SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements*. In: Journal of Cleaner Production, n. 206, pp. 524 - 540, 2019
- [7] Santero N.J., Masanet E., Horvath A., *Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review*. In: Resources, Conservation and Recycling, vol. 55(9-10), pp. 801 - 809, Elsevier, 2011
- [8] Bressi S., Santos J., Giunta M., Pistonesi L., Lo Presti D., *A comparative life-cycle assessment of asphalt mixtures for railway sub-ballast containing alternative materials*. In: Resour. Conserv. Recycl., n.137, pp. 76 - 88, 2018
- [9] Gulotta T., Mistretta M., Praticò F., *Life cycle assessment of roads: Material and process related energy savings*. In: Model. Meas. Control., n. C 79, pp. 146 - 153, 2018
- [10] Praticò F.G., Giunta M., Mistretta M., Gulotta M.T., *Energy and En-*

environmental Life Cycle Assessment of sustainable pavement materials and technologies for urban roads. In: Sustainability, n. 12, p. 704, 2020

[11] International Organization for Standardization, ISO 14040-Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, 2006

[12] International Organization for Standardization. ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Environ. Manag. - Life cycle Assess. - Princ. Framew. 46, 2006

[13] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance, Constraints, 2010

[14] Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H., Bauer C., Doka G., Dones R., Hischier R., Hellweg S., Köllner T., Loerincik Y., Margni M., *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. In: Am. Midl. Nat., n. 150, pp. 1 - 151, 2007

[15] The International EPD® System, Product Category Rules (PCR) of the Environmental Product Declaration (EPD): "Highways, streets and roads [except elevated highways]", 2013

[16] Praticò F.G., Vaiana R., Giunta M., *Recycling Pems Back To Innovative, Silent, Permeable Road Surfaces*. In: Proc. 8th Int. Conf. Environ. Eng. ICEE, pp. 1186 - 1192, 2011

[17] Praticò F.G., Vaiana R., Giunta M., *Pavement Sustainability: Permeable Wearing Courses by Recycling Porous European Mixes*. In: J. Archit. Eng., n. 19, pp. 186 - 192, 2013

[18] Del Pizzo A., Teti L., Moro A., Bianco F., Fredianelli L., Licitra G., *Influence of texture on tyre road noise spectra in rubberized pavements*. In: Applied Acoustics, n. 159, art. no. 107080, 2020

[19] Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B., *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology*. In: Int. J. Life Cycle Assess, n. 21, pp. 1218 - 1230, 2016

