

UN APPROCCIO BASATO SULLA MODELLAZIONE 3D E IL LIFE CYCLE ASSESSMENT PER UNA GESTIONE SOSTENIBILE DELLA MANUTENZIONE STRADALE

*Konstantinos Mantalovas, Gaetano Di Mino, Laura Inzerillo, Francesco Graziano, Ronald Roberts
DIING - Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, Viale delle Scienze ed.8, 90128 - Palermo, Italia*

konstantinos.mantalovas@unipa.it; gaetano.dimino@unipa.it; laura.inzerillo@unipa.it; ronaldanthony.roberts@unipa.it

Abstract

Among several goals of the road agencies, one of the most relevant is the maintenance and rehabilitation of the road pavement. The growth of traffic, the longstanding lack of funding and, sometimes, an emergency-based planning of intervention, are common drivers leading to low level of pavement conditions in terms of ride quality and safety. In addition both cost and environmental concerns due to monitoring stage are relevant issues within the management system of local and urban road network, especially. With the purpose of implementing sustainability in the road pavement management, this paper provides an approach based on coupled low- cost 3D image modelling distress identification and Life Cycle Assessment (LCA) tool. A case study in Palermo is considered by comparing current practices to the optimized system to define environmental impacts. The results show the use of this approach is able to achieve both environmental and economic benefits for road agencies by providing crucial savings and furthermore by optimising the Pavement Management System.

KEY WORDS: *Life Cycle Assessment, Pavement Management System, Pavement Distresses, 3d Modelling, Sustainability.*

1. Lo stato dei programmi di manutenzione stradale nel mondo

1.1. La manutenzione stradale

A causa delle limitate risorse, gli enti proprietari e gestori di infrastrutture stradali incontrano serie difficoltà a garantire la costruzione, la manutenzione e il potenziamento del patrimonio secondo criteri di efficienza e sostenibilità. Alcuni, tra questi, adottano lo strumento del *Pavement Management System* (PMS), che consente l'allocazione delle risorse in funzione delle soluzioni di manutenzione più economiche per le pavimentazioni in dotazione. [1]. Il PMS, tuttavia, si fonda su dati accurati ed aggiornati sullo stato della pavimentazione e la loro acquisizione è, in genere, un processo costoso. [2].

Diverse sforzi e tentativi sono stati attuati per definire metodologie innovative ed efficaci, implementando tecniche ed utilizzando strumenti automatici per l'identificazione dei degradi [3].

1.2. L'uso della tecnica Structure-from-motion e modellazione 3D

Un metodo di identificazione dei degradi stradali è la modellazione basata su immagini (image-based modelling). L'uso di tale modellazione per la raccolta e classificazione dei degradi stradali non è nuovo [4], ma alcuni recenti avanzamenti e miglioramenti degli algoritmi di programmazione [5] hanno indotto i ricercatori ad applicare la tecnica dello *Structure-from-Motion* (SfM) per il monitoraggio, l'identificazione e la classificazione dei degradi

delle pavimentazioni stradali [6,7] secondo flussi operativi replicabili su scala industriale [8].

Questo approccio comporta l'uso delle tecniche fotogrammetriche che sfruttano la sovrapposizione di un repertorio di immagini fotografiche per ricavare le misure di interesse tecnico degli oggetti ripresi [9].

Le immagini derivano da una ripresa intorno l'oggetto, compiuta in modo tale da ottenere una sovrapposizione tra il 70% e l'80%. Gli algoritmi per l'allineamento e la regolazione dell'insieme delle immagini seguono quindi una procedura di elaborazione per punti, che conduce alla posizione dell'oggetto nello spazio, alla sua ricostruzione ed infine alla generazione di un modello 3D [10].

I punti da analizzare lungo il tracciato stradale possono essere individuati attraverso modelli fondati sull'Intelligenza Artificiale, in grado di estrapolare gli oggetti da modellare tridimensionalmente. [11].

La Figura (vedi Fig. 1) mostra il data set fotografico eseguito su un breve tratto di pavimentazione stradale con un evidente degrado e la ricostruzione 3D del degrado stesso, eseguita attraverso l'uso del software commerciale Agisoft PhotoScan. I rettangoli azzurri della Figura (vedi Fig. 1) rappresentano la posizione nello spazio della macchina fotografica per ogni scatto realizzato durante il rilievo e, si può osservare che le immagini sono allineate secondo un percorso circolare attorno al degrado.

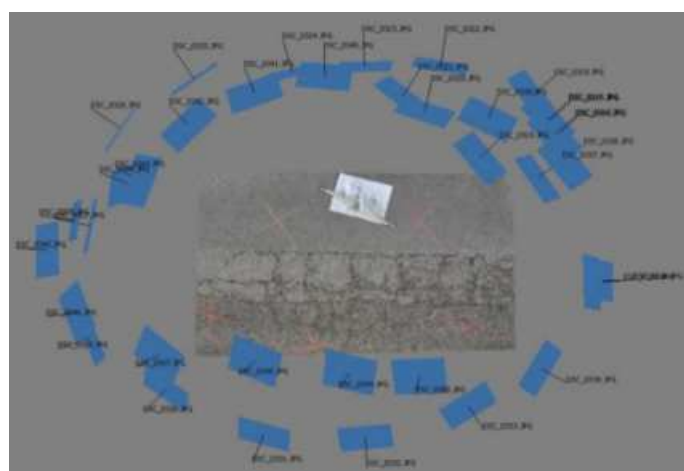


Fig. 1 - Esempio di un dataset fotografico di un degrado sulla pavimentazione di una sezione stradale. (fonte: propria elaborazione)

L'uso di questa tecnologia consente, in un rilievo finalizzato all'analisi delle condizioni del manto stradale, di potere verificare non solo la geometria del degrado, ma di poterne interrogare alcune caratteristiche ben precise. Nella figura (vedi Fig. 2) è riportato il modello 3D di una buca e le sezioni trasversali sia nel senso longitudinale che trasversale, attraverso le quali è possibile ricavare informazioni geometriche e metriche, come ad esempio il volume della depressione, il punto di maggiore depressione, la sezione di maggiore larghezza e quella di maggiore lunghezza, e così via.

Ovviamente, maggiore è il grado di dettaglio, maggiore è

il numero delle informazioni ricavabili e più accurata ed efficace è la scelta di intervento manutentivo da eseguire.

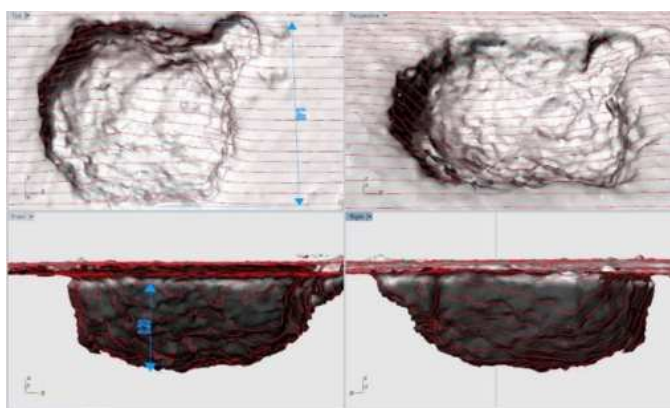


Fig. 2 - Esempio di un modello 3D renderizzato di un degrado di pavimentazione, ottenuto dal workflow utilizzato. (fonte: propria elaborazione)

Modelli analoghi possono essere realizzati utilizzando, al posto di una camera professionale, uno smartphone e questo reduce ulteriormente i costi di esercizio [12].

Nel caso si tratti di pavimentazione più estesa, si può eseguire la stessa indagine fotogrammetrica attraverso l'uso di un drone e di un opportuno equipaggio fotografico di volo. In questo modo si ottiene una visione complessiva dello stato di salute della pavimentazione su quel tratto stradale che aggiorna in tempo reale i dati contenuti nel PMS e stabilisce, altresì, l'ordine e la natura degli interventi di manutenzione.

La pianificazione degli interventi, secondo questo approccio, è sintetizzata nel diagramma di flusso della figura (vedi Fig. 3). In questo caso, pertanto, gli enti proprietari e gestori di infrastrutture stradali avrebbero a disposizione dati facilmente aggiornabili e gestibili, orientando le strategie di manutenzione secondo le reali emergenze, invece di agire secondo piani preordinati ed eventualmente datati.

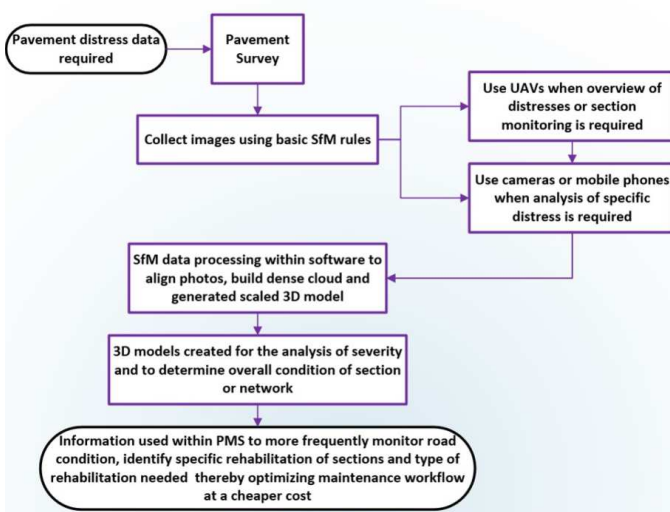


Fig. 3 - Workflow attraverso le tecniche SfM per ottenere dati utili al PMS. (fonte: propria elaborazione)

1.3. La sostenibilità dei nuovi approcci alla manutenzione

Da una parte l'impiego di queste tecniche ridurrebbe i costi legati alle indagini di controllo e soprattutto i costi di manutenzione sul lungo periodo; dall'altra, aumenterebbe la frequenza degli interventi, caratterizzati però, da costi inferiori (approccio proattivo alla manutenzione). In questo modo è raggiungibile l'obiettivo di una manutenzione mirata, in grado di mantenere il patrimonio sovrastrutturale in efficienza e riducendo i costi di gestione durante gli anni di servizio della pavimentazione [13]. Questo approccio è profondamente diverso da quello tipico per il quale gli enti regolano i loro interventi secondo piani preordinati, con assegnazione di risorse deficitarie rispetto alle necessità, che fatalmente porta a ingenti costi legati ad interventi di potenziamento e riabilitazione legati a condizioni di emergenza [14].

Tuttavia, seguendo l'approccio proattivo, appare assai opportuno valutare se un piano di interventi più frequente, seppur a minori costi, può essere dichiaratamente sostenibile anche sotto il profilo ambientale [15]. Pertanto, nel prosieguo della ricerca si è inteso verificare se, cambiando il flusso delle operazioni di manutenzione in chiave proattiva, in un ambito di rete stradale secondaria urbana, tale strategia di gestione è ambientalmente sostenibile.

2. Metodologia

2.1. Uso del Life Cycle Assessment - obiettivi

Il *Life Cycle Assessment* (LCA) è un metodo standardizzato secondo le norme ISO 14040, 14044 [16, 17], che ha per scopo la valutazione degli impatti sull'ambiente che l'esecuzione di un qualunque processo, prodotto, servizio riversa sull'ambiente.

Nel presente studio, la valutazione è stata condotta quantificando e comparando gli impatti ambientali derivati a due differenti strategie di manutenzione stradale, attuate lungo il medesimo tratto di riferimento (valutazione comparativa). Su un arco temporale di 25 anni, quindi, gli impatti ambientali di un programma di manutenzione tradizionale, quindi preordinato e con tecniche di rilievo convenzionali, sono stati posti a confronto, con quelli originati dalla metodologia qui proposta, basata sull'identificazione e modellazione SfM dei degradi stradali per pervenire a un programma mirato e duttile.

L'approccio tradizionale è stato impostato in funzione degli input di esperti locali e di quanto reperito in letteratura [18], mentre l'approccio proposto si avvale dei dati scaturiti da processi di ottimizzazione della manutenzione con algoritmi genetici, e dei risultati di altre valutazioni LCA [19, 20]. Il flusso delle attività correlate alla modellazione 3D [8] all'interno del sistema di gestione, è se-

guito da specifiche attività di manutenzione definite in linea con il lavoro svolto da Y.Qiao et al. [21], comprendenti quelle ordinarie, preventive e correttive tipiche della prassi manutentiva nella città di Palermo.

Le percentuali indicano il livello di pavimentazione che si è ritenuto necessario sottoporre a manutenzione.

I due scenari a confronto sono riassunti nella Tabella (vedi Tab. 1).

Year	Typical current maintenance approach	Optimized Approach
0	0	0
1	0	1 [50%]
2	0	0
3	1	1 [25%]
4	0	0
5	0	1,2
6	3 [50%]	0
7	0	0
8	0	3
9	0	0
10	1,2	0
11	0	1 [50%]
12	0	2 [50%]
13	0	1 [25%]
14	0	2 [50%]
15	1,3	1 [25%]
16	0	0
17	1	1,2
18	0	0
19	0	0
20	1,2	2
21	0	0
22	0	1,3
23	0	0
24	0	1 [50%]
25	4	0

*0	Do nothing	
1	Cracks, rutting, potholes filling and sealing	[Routine]
2	Micro-surfacing - fog seal	[Preventive]
3	Thin Overlay and patching - 2cm Hot Mix Asphalt	[Preventive]
4	Conventional structural mill and replace	[Corrective]

Tab. 1 - Interventi di manutenzione.
(fonte: propria elaborazione)

2.2. Definizione del Sistema di analisi e relative unità funzionale: applicazione dello LCA

I processi costituenti l'ambito di analisi della fase manutentiva sono mostrati nella figura (vedi Fig. 4); e tra questi soltanto (B2, B3 e B4) sono presi in considerazione, poiché il caso di studio segue un criterio comparativo. L'unità funzionale, presa come campione della valutazione, è una strada urbana ad unica carreggiata, nella quale sono previsti interventi di manutenzione nell'arco di 25 anni [22-25].

I confini del sistema sono visibili nella figura (vedi Fig. 4). Come mostrato nella figura (vedi Fig. 4), all'interno dei confini del sistema in esame, vengono prese in considerazione solo le fasi rilevanti per la manutenzione del tratto stradale (B2, B3 e B4), il caso studio ha un obiettivo comparativo ed entrambi gli scenari stanno affrontando gli impatti ambientali dello stesso tratto stradale.

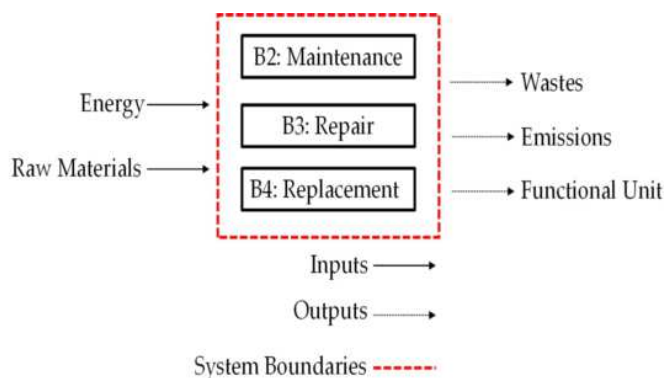


Fig. 4 - Confini di sistema del sistema di prodotto delle due alternative studiate. (fonte: propria elaborazione)

Non è superfluo rimarcare, comunque, che tutte le attività preparatorie agli interventi di manutenzione sono state inserite ed analizzate nella LCA: dall'estrazione degli aggregati e del legante, al loro trasporto nell'impianto di produzione dell'asfalto e al trasporto di quest'ultimo al sito di intervento, fino alla realizzazione dei prodotti necessari alla manutenzione stessa.

L'applicazione LCA è stata eseguita con il software Gabi Professional, avvalendosi quindi del database corredato. Non possedendo dati diretti sulle attività in esame (dati primari), sono stati utilizzati quelli affidabili e riconosciuti, presenti in letteratura scientifica, in report tecnici, nelle normative internazionali, nonché le norme relative alla categoria di prodotto (PCR) e le dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) [22-31]. Nessuna limitazione di analisi, quindi, è stata applicata durante l'esecuzione della LCA. Le metodologie di valutazione dell'impatto prescelte sono state la ReCiPe 2016 e la Hierarchist (H) [31], sia per gli indicatori Midpoint che per quelli Endpoint.

I primi sono correlati ad un ampio set di indicatori di categorie di impatto (cioè risorse fossili), mentre i secondi sono significativi di tre aree tematiche, ristrette e aggregate, da proteggere: la salute umana, gli ecosistemi e la disponibilità delle risorse. Se implementati congiuntamente, gli approcci si completano a vicenda e la loro combinazione fornisce un risultato solido ed esaustivo. Infine, come definito nelle ISO 14040 e 14044, i passaggi logici dello studio LCA sono stati: definizione dell'obiettivo e dell'ambito dello studio, analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI), valutazione dell'impatto del ciclo di vita e interpretazione dei risultati.

2.3. Ipotesi o obiettivo dello studio

Occorre rimarcare che l'obiettivo della ricerca qui presentata è stato valutare due distinte strategie di gestione della manutenzione su uno stesso tratto stradale di riferimento, rese operative in un orizzonte temporale di 25 anni, attraverso un criterio compativo. L'esclusione, dunque, delle fasi A1-A5, B1, B5-B7, C1-C4, e D [17], dal momento che sono comuni ad entrambe le

strategie, è concettualmente ammissibile perché non intacca il confronto tra le due alternative di gestione. Inoltre, nel presente studio, la distanza del trasporto della materia prima aggregati, dalla cava all'impianto di produzione, è stata assunta pari a 10 km; per la materia prima legante, invece, si è assunta la distanza che copre il tragitto tra la località di Priolo e la città di Palermo, pari a 248 km. Infine, la distanza tra impianto di produzione e sito di costruzione è stata assunta pari a 35km, in funzione delle effettive condizioni locali.

3. Risultati ed Analisi

3.1. Analisi degli indicatori intermedi (Midpoint)

Secondo le azioni previste dalle fasi LCIA ed LCI, gli indicatori intermedi (Midpoint) presi in considerazione in accordo con il documento ReCiPe 2016, [31], sono stati calcolati e diagrammati come mostrato nella figura (vedi Fig. 5). Per la strategia proposta, gli indicatori che mostrano valori più alti sono quelli relativi al consumo di acqua, esito comunque atteso alla luce che tale strategia prevede interventi di trattamento superficiale del manto. Invece, tutti gli altri, dall'indicatore rappresentativo del cambiamento climatico a quelli relativi alle risorse minerali e fossili, denunciano valori più bassi rispetto alla strategia convenzionale. Grazie a tali indicatori intermedi, è possibile incominciare a delineare il quadro degli impatti ed avere quindi una visione più chiara degli effetti ambientali conseguenti.

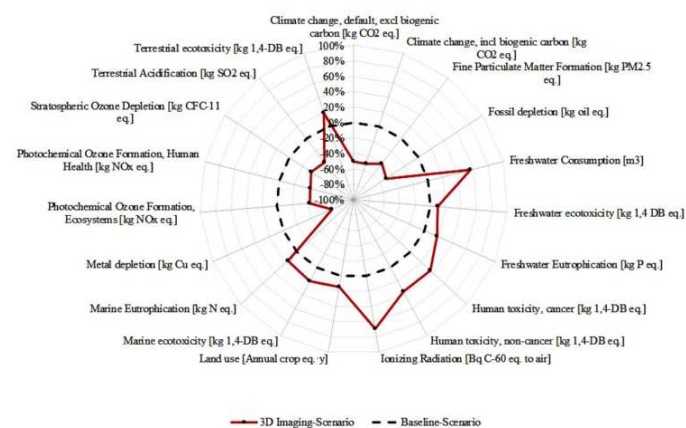


Fig. 5 - Variazione percentuale relativa degli indicatori Midpoint per i due scenari analizzati. (fonte: propria elaborazione)

3.2. Analisi degli indicatori finali (Endpoint)

In osservanza alla metodologia ReCiPe 2016 [31], gli indicatori finali (endpoint) sono stati concepiti per ottenere una prospettiva più ampia sugli impatti complessivi e aggregati delle strategie ottimizzate. I risultati sono riportati nella figura (vedi Fig. 6). Si evidenzia come, per ogni indicatore aggregato finale,

la riduzione degna di nota degli effetti sull'ambiente è degna di nota, così come già segnalato dai decrementi mostrati in figura (vedi Fig. 5). La prestazione ambientale complessiva, da parte della strategia manutentiva proposta, appare dunque superiore.

Si può pertanto affermare che le procedure di manutenzione ottimizzate non provocano danni significativi alla salute umana e all'ecosistema rispetto alle strategie attualmente seguite.

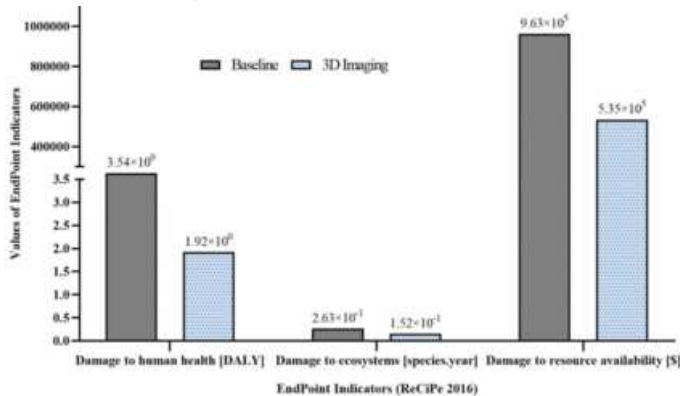


Fig. 6 - Confronto dei valori degli indicatori della categoria Impatto endpoint per i due scenari esaminati. (fonte: propria elaborazione)

4. La dimensione valutativa della Walkability

I risultati mostrano che l'uso congiunto di una tecnologia di rilevamento a basso costo, come quella proposta, e di un programma di manutenzione ottimizzato, può arrecare vantaggi sia ambientali che economici agli enti gestori del patrimonio stradale così come agli utenti. L'analisi qui condotta, ha altresì dimostrato quale sia la criticità legata alla strategia di manutenzione di tipo tradizionale: affidarsi a un piano preordinato e quindi rigido di interventi massivi di manutenzione straordinaria.

Una strategia, come quella proposta, basata invece su un approccio proattivo, consente, grazie anche all'uso della modellazione 3D, un notevole vantaggio per eseguire una manutenzione mirata, grazie alla affidabilità ed economicità delle indagini di controllo e monitoraggio, che conduce, in ultima analisi, all'aumento della vita utile della pavimentazione.

In prospettiva, questa ricerca sarà integrata dall'analisi di sensibilità riguardante alcuni fattori particolarmente rilevanti, quali le distanze di trasporto e le strategie di manutenzione che prevedono l'impiego sempre più massiccio di materiali riciclati e non convenzionali.

Bibliografia

[1] Peterson D.: *Pavement Management Practices*. N. 135, Washington, DC, 1987

[2] Loprencipe G., Pantuso A., Di Mascio P.: *Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs*. In: *Sustainability*, vol. 9, n. 3, 2017

[3] Coenen T.B.J., Golroo A.: *A review on automated pavement di-*

stress detection methods. In: *Cogent Engineering*, vol. 4, n. 1, pp. 1 - 23, 2017

[4] Wang K.C.P.: *Elements of automated survey of pavements and a 3D methodology*. In: *Journal of Modern Transportation*, vol. 19, n. 1, pp. 51 - 57, 2011

[5] Remondino F., Nocerino E., Toschi I., Menna F.: *A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets*. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 42, n. 2W5, pp. 591 - 599, 2017

[6] Ahmed M., Haas C.T., Haas R.: *Toward low-cost 3D automatic pavement distress surveying: The Close-Range Photogrammetry Approach*. In: *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 38, pp. 1301 - 1313, 2011

[7] Inzerillo L., Di Mino G., Di Paola F., Noto S.: *The diagnosis of road surface distresses through image-based modeling techniques. Experimental survey on laboratory-rutted samples*. In: *Life Safety and Security*, vol. 3, pp. 31 - 35, 2015

[8] Inzerillo L., Di Mino G., Roberts R.: *Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress*. In: *Automation in Construction*, vol. 96, 2018

[9] Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M.: *Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology*, 2012

[10] Verhoeven G.: *Taking computer vision aloft - archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photostan*. In: *Archaeological Prospection*, vol. 18, n. 1, pp. 67 - 73, 2011

[11] Roberts R., Giancontieri G., Inzerillo L., Di Mino G.: *Towards Low-Cost Pavement Condition Health Monitoring and Analysis Using Deep Learning*. In: *Appl. Sci.*, vol. 10, n. 319, 2020

[12] Poiesi F., Locher A., Chippendale P., Nocerino E., Remondino F., Van Gool L.: *Cloud-based collaborative 3D reconstruction using smartphones*. In: *14th European Conference on Visual Media Production*, 2017

[13] Babashamsi P., Md Yusoff N.I., Ceylan H., Md Nor N.G., Salarzadeh Jenatabadi H.: *Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis*. In: *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, n. 4, pp. 241 - 254, 2016

[14] Sarsam S.I.: *Pavement Maintenance Management System: A Review*. In: *Trends in Transport Engineering and Applications*, vol. 3, n. 2, 2016

[15] Mantalovas K., Di Mino G.: *The Sustainability of Reclaimed Asphalt as a Resource for Road Pavement Management through a Circular Economic Model*. In: *Sustainability*, vol. 11, 2234, 2019

[16] International Organization for Standardization 14044: *Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines*. Ntc-Iso 14044, vol. 3, n. 571, p. 16, 2007

[17] International organization for standardization: *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. Iso, vol. First Edit, n. 1, pp. 1 - 12, 1997

[18] Di Mino G., De Blasiis M.R., Di Noto F., Noto S.: *An Advanced Pavement Management System based on a Genetic Algorithm for a Motorway Network*. In: *Third International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*, pp. 1 - 17, 2013

[19] Yang C., Remenyte-Prezscott R., Andrews J.D.: *Pavement maintenance scheduling using genetic algorithms*. In: *International Journal of Performability Engineering*, vol. 11, n. 2, pp. 135 - 152, 2015

[20] Santos J., Flintsch G., Ferreira A.: *Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability*. In: *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 116, pp. 15 - 31, 2017

[21] Qiao Y., Dawson A.R., Parry T., Flintsch G.W.: *Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs*. In: *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 2015

[22] EPA: *Guidance Document for preparing Product Category Rules*

- (PCR) and Environmental Product Declarations (EPD) for Asphalt Mixtures by the European Asphalt Pavement Association (EAPA) 2nd November 2016, 2016
- [23] The Norwegian EPD Foundation: Product-Category Rules (PCR) for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for Product Group Asphalt and crushed stone, pp. 1 - 22, 2009
- [24] Bre B.R.E.: *Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products to EN 15804:2012*, p. 43, 2013
- [25] ACCIONA infrastructure: Environmental Product Declaration - 'N-340 road', Alicante, 2013
- [26] Mixtures F.A.: *Product Category Rules (PCR)*, pp. 1 - 25, 2017
- [27] EAPA: *The Use of Warm Mix Asphalt*. In: EAPA - Position paper, p. 23, 2014
- [28] Parliament E., Committee S.: *COMMISSION RECOMMENDATION of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance*. In: Official Journal of the European Union, n. December 2010, pp. 1 - 45, 2013
- [29] Eurobitume: Life cycle inventory: Bitumen. Belgium, 2012
- [30] The International Standards Organisation: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. In: Iso 14044, vol. 2006, n. 7, pp. 652 - 668, 2006
- [31] Huijbregts M.A.J. et al.: *ReCiPe: 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. Bilthoven, 2016

