Giuseppe Cantisani[1]
Antonio D'Andrea[2]
Paola di Mascio[3]
Nicola Fiore[4]
Laura Moretti[3]
Carlo Polidori[5]
Loretta Venturini[6]



ASFALTI TAPPABUCHE E GREEN DEAL

IL PROGETTO INFRAROB PER PAVIMENTAZIONI SICURE E SOSTENIBILI

I principali obiettivi dell'UE inerenti alla sostenibilità sono la riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 55% entro il 2030, rispetto ai valori del 1990, e il raggiungimento delle "zero emissioni" entro il 2050.
Con riferimento alle sovrastrutture stradali, quando si parla di sostenibilità, normalmente si pensa a come costruire le nuove pavimentazioni e come produrre i nuovi conglomerati bituminosi. Essendo la sicurezza e la vita utile elementi chiave della sostenibilità, in realtà è fondamentale riuscire a preservare prima di tutto il patrimonio già esistente.
Gli ammaloramenti stradali sono sempre più diffusi per effetto della vetustà delle pavimentazioni e in particolare la severità delle buche sta aumentando anche a causa delle condizioni ambientali connesse al cambiamento climatico, soprattutto nel caso di forti piogge. Le buche sono uno dei fattori più critici rispetto all'aggravamento del degrado della pavimentazione, rappresentando anche il maggior pericolo per gli utenti (soprattutto con veicoli a due ruote) e la causa di potenziali danni ai veicoli. La manutenzione delle buche è una delle sfide che gli Enti gestori stanno cercando di affrontare da diversi anni, attraverso strategie che prevedono il rilevamento dello stato degli ammaloramenti e il relativo ripristino.
I lavori di manutenzione stradale sono correlati a importanti problematiche relative alla congestione del traffico e alla sicurezza sia degli utenti stradali che dei lavoratori del cantiere. Questi aspetti costituiscono l'oggetto del progetto InfraROB, finanziato dal programma di ricerca della Commissione Europea Horizon 2020, che ha come obiettivo la riduzione dell'esposizione al traffico veicolare dei lavoratori e l'esposizione all'azione delle macchine di cantiere, anche nel campo della manutenzione delle buche, e la riduzione del costo delle attività ripetitive, aumentando allo stesso tempo la sicurezza degli utenti stradali.

ASPHALT FOR POTHOLE PATCHING AND GREEN DEAL

INFRAROB PROJECT FOR SAFE AND SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENTS

Compared to 1990 values, the main EU sustainability targets are to reduce greenhouse gas emissions by at least 55 per cent by 2030 and to achieve "zero emissions" by 2050. With reference to road superstructures, when talking about sustainability, one normally thinks about how to build new pavements and how to produce new asphalt mixes. Since safety and service life are key elements of sustainability, it is actually crucial to preserve the existing assets first.
Asphalt pavement distresses are becoming increasingly common due to the ageing of pavements and, in particular, the severity of potholes is also increasing due to the environmental conditions related to climate change, especially in the case of heavy rainfalls. Considering the aggravation of pavement deterioration, potholes are one of the most critical factors, also representing the greatest danger to road users (especially those with two-wheeled vehicles) and the cause of potential damage to vehicles. The maintenance of potholes is one of the challenges that Managing Authorities have been trying to face for several years, through strategies that include the detection of the state of deterioration and its repair.
Road maintenance works are related to important issues concerning traffic congestion and safety of both road users and site

LE BUCHE DELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI E I METODI TRADIZIONALI DI RIPRISTINO

Con il termine "buca" si indica generalmente un ammaloramento localizzato della pavimentazione stradale, in cui il materiale si scompone e si perde, provocando una forte depressione di forma più o meno circolare. In funzione delle cause prevalenti che le producono o ne determinano l'evoluzione (velocità e intensità del traffico, tipo di veicoli transitanti e condizioni ambientali), le buche hanno tipicamente una profondità di almeno 30 mm e diametro compreso tra 100 mm e 1 m. La dimensione può aumentare anche repentinamente e/o ne possono nascere delle altre nelle vicinanze subito dopo l'insorgenza della prima [1].
Oltre ad accelerare il processo degenerativo che conduce alla fine della vita utile della pavimentazione, le buche possono causare danni alle ruote, urti e danni alla parte inferiore dei veicoli, frenate improvvise e svii, che possono di conseguenza implicare collisioni e incidenti gravi. La manutenzione delle buche richiede in genere la riparazione temporanea e di emergenza, per poi eseguire, in teoria, quella permanente e/o definitiva (compreso l'eventuale rifacimento) nei mesi più caldi. In pratica, se una riparazione è fatta correttamente, si può aspettare anche un tempo maggiore prima di rifare la pavimentazione.
Il rilevamento e la valutazione degli ammaloramenti sono due delle azioni più importanti per determinare le corrette strategie manutentive di un'infrastruttura stradale.
Il rilevamento "manuale" richiede molto tempo ed è costoso dal punto di vista dei Tecnici coinvolti. Pertanto, negli ultimi anni, sono stati sviluppati numerosi sistemi per rilevare e riconoscere in modo automatico i dissesti stradali (per esempio, basati sulle accelerazioni a bordo dei veicoli, sulla ricostruzione 3D e sulla ripresa fotografica), contribuendo al miglioramento dell'efficienza del rilevamento e della qualità della pavimentazione attraverso un'indagine preliminare [2]. Esistono molti manuali che indicano le operazioni da compiere durante le riparazioni, ad esempio, molto interessante è quello del Ministero delle Infrastrutture della Cambogia: Guidelines for Repairing Defects of Roads [3].
La durata del ripristino delle buche dipende sostanzialmente dai materiali usati e dalla compattazione apportata. I metodi più utilizzati in tutto il mondo sono i seguenti [4]:

1. Throw-and-Go: si riempie la buca con il materiale di ripristino, eventualmente si addensa leggermente con la pala e poi si lascia la compattazione all'azione del traffico. A meno che non si utilizzino materiali speciali, la riparazione ha brevissima durata e deve essere rieseguita entro pochi giorni;
2. Throw-and-Roll: si riempie la buca con il materiale di ripristino e poi si costipa con l'azione di un veicolo pesante (per esempio, camion). La durata è tendenzialmente breve;
3. Iniezione a spruzzo: sono utilizzate macchine speciali che spruzzano il materiale all'interno della buca. La durata può essere anche abbastanza lunga o addirittura elevata. Il problema principale è l'ingombro del mezzo che interferisce con il traffico;
4. Semipermanente: (Figura 1) si rimuovono detriti e acqua dalla buca, si taglia in modo netto lungo i lati, si cosparge emulsione bituminosa, si riempie con il materiale e si compatta con appositi strumenti (piastre vibranti, compattatori, rulli, ecc.). È il metodo che consente di ottenere maggiore durata della riparazione;

workers. These aspects are the subject of the InfraROB project, funded by the European Commission's Horizon 2020 research programme, which aims to reduce the exposure of workers to vehicle traffic and the action of construction machinery, including pothole maintenance, and to reduce the cost of repetitive tasks while increasing the safety of road users.

FLEXIBLE PAVEMENT POTHOLES AND TRADITIONAL REHABILITATION METHODS

The term "pothole" generally indicates a localised deterioration of the road pavement, in which material breaks down and is lost, causing a large depression of a more or less circular shape. Depending on the prevailing causes that produce them or determine their evolution (speed and intensity of traffic, type of passing vehicles and environmental conditions), potholes are typically at least 30 mm deep and between 100 mm and 1 m in diameter. The size may also increase abruptly and/or others may emerge in the vicinity soon after the first one has appeared [1].
In addition to accelerating the degenerative process that leads to the end of the service life of the pavement, potholes can cause wheel damage, bumps and damage to the underside of vehicles, sudden braking and swerving, which can consequently lead to collisions and serious accidents.
Maintenance of potholes generally requires temporary and emergency repairs, and then, in theory, permanent and/or definitive repairs (including resurfacing) in the warmer months. Basically, if a repair is done correctly, one can wait even longer before resurfacing.
The detection and assessment of deterioration is one of the most important actions in determining the correct maintenance strategies for a road infrastructure.
Manual detection is time-consuming and expensive from the point of view of the technicians involved. Therefore, in recent years, a number of systems have been developed to automatically detect and recognise road disruptions (e.g. based on in-vehicle acceleration, 3D reconstruction and photographic imaging), contributing to the improvement of detection efficiency and pavement quality through preliminary investigation [2].
There are many manuals indicating the steps to be taken during repairs, for example the one by the Ministry of Infrastructure of Cambodia: Guidelines for Repairing Defects of Roads [3] is very interesting.
The duration of pothole repair depends substantially on the materials used and the compaction carried out. The most commonly used methods worldwide are as follows [4]:

1. *Throw-and-Go: the hole is filled with the repair material, if necessary, slightly thickened with a shovel, and then left to be compacted by traffic. Unless special materials are used, the repair is very short-lived and must be resurfaced within a few days.*
2. *Throw-and-Roll: the pothole is filled with repair material and then compacted by the action of a heavy vehicle (e.g. truck). The duration tends to be short.*
3. *Spray injection: special machines are used to spray the material inside the pit. The duration can be quite long or even high. The main problem is the encumbrance of the machine that interferes with traffic.*

5. Ricostruzione parziale: si demolisce una parte della pavimentazione sino agli strati ammalorati e si ripristina l'intero pacchetto stradale. Quest'ultimo rappresenta il metodo più efficace per il ripristino delle buche ma è anche quello più dispendioso in termini di risorse economiche.

In compenso, la formazione di buche può essere evitata o rallentata attraverso lo studio della manutenzione preventiva già in fase progettuale, perché è il modo più conveniente per estendere la vita utile di una pavimentazione e per ridurre al minimo la necessità di riparazioni profonde e costose. Lo Stato di Washington rappresenta un esempio internazionale in tal senso in quanto ha adottato un approccio integrato alla conservazione, esaminando il ciclo di vita complessivo e i processi di formazione degli ammaloramenti, pianificando la conservazione e la manutenzione della pavimentazione [5].

Le cause principali che generano la formazione delle buche sono [6, 7, 8 e 9]:

- spessori insufficienti della pavimentazione (compresa fondazione) rispetto ai carichi che deve sopportare, i quali comportano una flessione superiore a quella tollerabile, generando fessurazioni e deformazioni permanenti;
- uso di materiali impropri e/o di scarsa qualità in funzione del traffico e delle condizioni ambientali (sole, calore, freddo, escursioni termiche, pioggia, ecc.) e/o non convenientemente progettati/confezionati (mix design);
- gestione delle acque non appropriata che accelera il processo di formazione ed evoluzione della buca (per esempio, pendenze insufficienti dovute ad errori di progettazione o costruzione, depressioni dovute all'assestamento della pavimentazione, scarsa manutenzione dei canali di scolo, ecc.);
- realizzazione di trincee e tasche, normalmente dovute agli interventi sui sottoservizi o al fallimento di manutenzioni pregresse;
- mancata gestione delle fessure e delle deformazioni che non sono immediatamente sigillate e/o trattate, attraverso le quali si infiltra l'acqua.

Il progredire della buca dipende molto dall'azione simultanea di acqua-traffico-temperature:

- acqua-traffico:
  - cedimento per fatica che inizia con fessurazioni e che poi si trasforma in buca. L'acqua in pressione dovuta ai carichi accelera il processo. Le pavimentazioni sottili (minori di 15 cm) sono quelle che risentono maggiormente di questo fenomeno;
  - spogliamento degli aggregati dello strato di usura (cause principali sono la scarsa adesione chimico-meccanica tra aggregati-bitume e minore contenuto di legante rispetto a quello ottimale) con formazione di sgranamenti che, nel giro di due-cinque anni, si trasforma nella formazione di buche;
- acqua-temperature: nei periodi invernali l'acqua gela e la sua espansione è assimilabile all'azione di un cuneo che allarga le fessure, sino a sgretolare la pavimentazione formando delle buche.

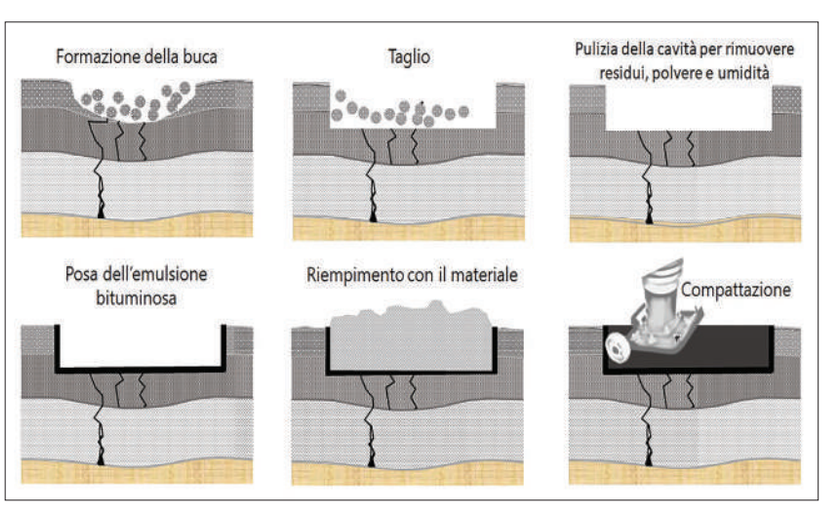
4. *Semi-permanent: (Figure 1) debris and water are removed from the hole, a clean cut is made along the sides, bitumen emulsion is sprinkled, the material is filled in and compacted with special tools (vibrating plates, compactors, rollers, etc.). This is the method that allows the repair to last longer.*

5. *Partial reconstruction: a part of the pavement is demolished, down to the damaged layers, and the entire road package is restored. It is the best method, but also the most expensive one.*

In return, pothole formation can also be avoided or slowed down through the study of preventive maintenance during the project phase, beacuse it is the most suitable way to extend the service life of an asphalt pavement and to minimize the need for major and expensive repairs. An international example is the State of Washington, which has adopted an integrated approach to preservation, examining the overall lifecycle and processes of deterioration formation and planning for pavement preservation and maintenance [5].

The main causes of pothole formation are [6, 7, 8 e 9]:

- *insufficient thickness of the pavement (including the foundation) compared to the loads it must withstand, which lead to a bending greater than tolerable, generating cracks and permanent deformations;*
- *use of improper and/or poor-quality materials depending on traffic and environmental conditions (sun, heat, cold, temperature ranges, rain, etc.) and/or not properly designed/packaged (mix design);*
- *inappropriate water management that accelerates the process of formation and evolution of the pothole (e.g. insufficient gradients due to design or construction errors, depressions due to the settling of the pavement, poor maintenance of drains, etc.)*
- *construction of trenches and patches, normally due to interventions on subservices, or failure of previous maintenance interventions;*
- *failure to manage cracks and deformations that are not immediately sealed and/or treated, through which water infiltrates.*



1. *Il migliore processo per il ripristino di una buca*

1. *The best procedure to repair a pothole*

I materiali tappabuche devono essere appositamente formulati e studiati; i due principali metodi produttivi sono:

- conglomerato bituminoso a caldo o HMA dal termine inglese Hot Mix Asphalt: in teoria è il materiale migliore, ma bisogna considerare che la maggior parte degli impianti di asfalto in inverno sono chiusi e che un carico tipico di autocarro (1-8 t) è utilizzato per la riparazione di molte buche prima di esaurire la miscela. Pertanto, considerando al massimo 3 ore di trasporto prima del suo raffreddamento e della impossibilità di essere adeguatamente compattato, è evidente che il suo utilizzo è molto complicato;
- conglomerato bituminoso a freddo o CMA dal termine inglese Cold Mix Asphalt: è il materiale più utilizzato perché versatile, stoccabile e facilmente lavorabile anche alle bassissime temperature. È prodotto a caldo, a tiepido o a freddo, attraverso l'uso di additivi, fluidificanti ed emulsioni bituminose. Il vecchio metodo del cutback, con solventi o gasolio, è ormai proibito per motivi di salute e ambientali.

Un fattore importante da non dimenticare è inoltre l'effetto del traffico veicolare durante le fasi di ripristino della buca, sia dal punto di vista della sicurezza sia riguardo all'operatività.
In un contesto così "semplicemente complicato", immaginando di poter utilizzare una tecnologia innovativa tappabuche, i maggiori obiettivi sarebbero: sostenibilità, durata, facilità di posa, automazione, bassa interferenza con il traffico, elevata sicurezza e bassi costi.
Di seguito si presentano gli aspetti essenziali della ricerca InfraROB in corso, finanziata grazie a fondi europei, che persegue proprio tali obiettivi qualificanti.

IL PROGETTO INFRAROB E I METODI DI RIPRISTINO SOSTENIBILI, DURATURI E SICURI

InfraROB è un progetto finanziato dal programma di ricerca della Commissione Europea Horizon 2020 con il Grant Agreement n° 955337. Il progetto è compartecipato dall'Associazione Italiana dei Professionisti per la Sicurezza Stradale (AIPSS) e dalle sue associate: Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL - Sapienza Università di Roma) e Dipartimento di Ingegneria dell'Università Roma Tre (Figura 2).
L'obiettivo è quello di ridurre l'esposizione dei lavoratori al traffico veicolare e all'azione delle macchine di cantiere, ridurre il costo delle attività ripetitive e aumentare la sicurezza degli utenti della strada, incrementando al contempo la disponibilità della rete di trasporto.
La prospettiva dell'introduzione di macchine e attrezzature autonome nel settore delle costruzioni sta muovendo grande interesse tra i produttori (Komatsu, Caterpillar, Hitachi Construction Machinery, Volvo Construction Equipment e altri), anche se oggi il loro livello di penetrazione è basso e limitato a veicoli fuoristrada, macchinari e attrezzature utilizzati principalmente o esclusivamente in aree chiuse e di cantiere. In particolare, il



2. *Il progetto di ricerca InfraROB della Commissione Europea Horizon 2020*
2. *Research project InfraROB of the European Commission Horizon 2020*

The progress of the pothole depends on the simultaneous action of water-traffic-temperatures:

- *water-traffic:*
  - *fatigue failure that begins with cracks and then turns into a hole. Pressure water due to loads accelerates the process. Thin pavements (less than 15 cm) are those most affected by this phenomenon;*
  - *stripping of aggregates from the wearing course (main causes are the poor chemical-mechanical adhesion between aggregates-bitumen and less binder content than optimal) with the formation of raveling that, within two-five years, turns into the formation of potholes;*
- *water-temperature: in winter the water freezes and its expansion is similar to the action of a wedge that widens the cracks, until crumbling the pavement forming potholes.*

Potholes patching materials must be specially formulated and studied and the two main production methods are:

- *hot bituminous mix or HMA from the English term Hot Mix Asphalt: in theory it is the best material, but it should be considered that in winter most asphalt plants are closed and that a typical load of truck (1-8 tons) is used for repairing many potholes before exhausting the mixture. Therefore, considering at most 3 hours of transport before its cooling and the impossibility of being properly compacted, it is evident that its use is very complicated;*
- *cold bituminous mix or CMA from the English term Cold Mix Asphalt: it is the most used material because it is versatile, storable and easily workable even at very low temperatures. It is produced hot, warm or cold, through the use of additives, fluidizing substances and bituminous emulsions. The old method called "cutback", with solvents or diesel, is now prohibited for health and environmental reasons. An important factor to mention is also the effect of vehicular traffic during the pothole rehabilitation phases, both from the point of view of safety and operability.*

In such a "simply complicated" context, if we could use an innovative pothole patching technology, the major objectives would be: sustainability, durability, ease of installation, automation, low interference with traffic, high safety and low costs.
Below we present the essential aspects of the ongoing InfraROB research, financed with European funds, which pursues precisely these qualifying objectives.

progetto è volto a mantenere l'integrità, le prestazioni e la sicurezza dell'infrastruttura stradale attraverso soluzioni robotizzate autonome e modulari, anche per la riparazione di piccole buche del manto stradale. Una delle varie attività del progetto è rivolta allo sviluppo di una "stampante 3D semovente" in grado di estrudere una miscela specifica per il riempimento di fessure e piccole buche.
La ricerca condotta dal gruppo di lavoro italiano, prima descritto, è così strutturata:

- fase 1: definizione dei parametri ottimali del sistema stampante 3D/miscela;
- fase 2: studio di diversi materiali (in parallelo al precedente), comunemente utilizzati per la riparazione delle buche stradali, possibilmente con caratteristiche di sostenibilità ambientale. Lo scopo è quello di bilanciare diverse prestazioni contrastanti: consistenza, omogeneità, scorrevolezza e struttura interna che hanno ricadute sulla estrudibilità, sulla fluidità, sui tempi di presa e sulle prestazioni finali;
- fase 3: prove in situ per verificare l'efficacia della compattazione della miscela sotto i carichi del traffico.

Avendo riscosso molto interesse, i dettagli dello studio della macchina 3D sono già stati presentati in diversi convegni e seminari, come ad esempio durante l'AIIT 3rd International Conference on Transport Infrastructure and Systems del TIS Roma 2022 [10].
La prima operazione del nuovo sistema proposto consiste nel rilievo della buca con un laser scanner o tecniche fotogrammetriche per il rilevamento della nuvola di punti da fornire alla stampante 3D per la costruzione dell'oggetto da estrudere. La fase successiva comprende la messa in strada del robot la cui stampante sarà in grado di estrudere il materiale di riempimento in funzione delle caratteristiche della buca in lavorazione.
Di seguito si riportano invece alcuni dettagli delle fasi 2 e 3.

UNA MISCELA INNOVATIVA TAPPABUCHE

Le miscele analizzate per l'utilizzo nel progetto InfraROB sono state diverse, ognuna con le sue peculiarità. Una di quelle che risulta alla data odierna più funzionale e prestazionale è un conglomerato bituminoso composto da 100% materiale di recupero derivante dalla demolizione di vecchie pavimentazioni (RAP - Reclaimed Asphalt Pavement oppure granulato di conglomerato bituminoso, in gergo: "fresato"), rigenerato attraverso apposito prodotto formulato. Il rigenerante è frutto di diversi anni di ricerca ed è già usato nell'ambito delle soluzioni sostenibili, ma è stato appositamente ritarato per la ricerca in oggetto.
L'utilizzo del RAP al posto delle materie prime non rinnovabili (aggregati e bitume) permette di perseguire gli obiettivi della sostenibilità ambientale e la riduzione quindi delle emissioni di CO_2 equivalente.
Il corretto trattamento del fresato comprende la demolizione della pavimentazione (separazione degli strati superficiali da quelli più profondi), il controllo iniziale (presenza di corpi estranei, dimensioni degli elementi e compatibilità ambientale), il trattamento per frantumazione e/o vagliatura (controllo chimico e dimensionale degli elementi e miscelazione se provenienti da fonti diverse), lo stoccaggio e la gestione delle scorte per possibile riciclo.

THE INFRAROB PROJECT AND SUSTAINABLE, DURABLE AND SAFE REPAIR METHODS

InfraROB is a project funded by the European Commission's Horizon 2020 research programme with the Grant Agreement No. 955337. The project is shared by the Italian Association of Road Safety Professionals (AIPSS) and its members: Research Centre for Transport and Logistics (CTL - Sapienza University of Rome) and Engineering Department of Roma Tre University (Figure 2).
The aim is to reduce workers' exposure to vehicular traffic and the action of construction machinery, reduce the cost of repetitive activities and increase the safety of road users, while increasing the availability of the transport network. The prospect of the introduction of autonomous machinery and equipment in the construction sector is attracting great interest among manufacturers (Komatsu, Caterpillar, Hitachi Construction Machinery, Volvo Construction Equipment and others), although today their level of penetration is low and limited to off-road vehicles, machinery and equipment used mainly or exclusively in closed areas and construction site. In particular, the project aims to maintain the integrity, performance and safety of the road infrastructure through autonomous and modular robotic solutions, also for the repair of small potholes of the road surface. One of the various activities of the project is the development of a "self-propelled 3D printer" capable of extruding a specific mixture for the filling of cracks and small potholes.
The research conducted by the Italian working group, described above, is structured as follows:

- step 1: definition of the optimal parameters of the 3D printer/mixture system;
- step 2: study of different materials (in parallel to the previous one), commonly used for the repair of road potholes, possibly with characteristics of environmental sustainability. The aim is to balance different contrasting performances: consistency, homogeneity, smoothness and internal structure that have repercussions on extrudability, fluidity, grip times and on the final performance;
- step 3: on site tests to verify the effectiveness of the compaction of the mixture under traffic loads.

Attracting much interest, the details of the 3D machine study have already been presented at several conferences and seminars, such as during the AIIT 3rd International Conference on Transport Infrastructure and Systems of TIS Roma 2022 [10].
The first operation of the proposed new system consists in the survey of the hole with a laser scanner or photogrammetric techniques for the detection of the point cloud to be provided to the 3D printer for the construction of the object to be extruded. The next step involves putting the robot on the road whose printer will be able to extrude the filling material according to the characteristics of the hole being processed.
Here are some details of phases 2 and 3.

INNOVATIVE POTHOLE PATCHING MIXTURE

The mixtures analyzed for the InfraROB project were different, each with its own peculiarities. The one that today is the most functional and performing is a bituminous mix composed of 100% reclaimed material resulting from the demolition of old

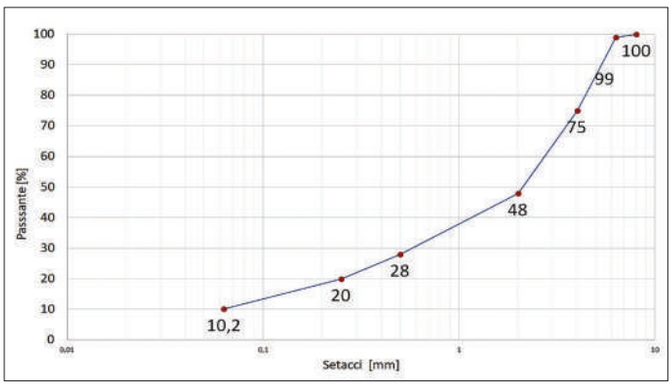
Come noto, il bitume subisce una trasformazione chimica sia durante le fasi di stoccaggio e produzione dei conglomerati bituminosi, sia durante l'utilizzo della pavimentazione. Il processo chimico comporta l'ossidazione del bitume, la perdita di parti volatili ed il deterioramento delle prestazioni. Per il riciclo del RAP è possibile utilizzare due diverse categorie di prodotti: flussanti (migliorano la lavorabilità della miscela contenente RAP, per facilitarne l'utilizzo) e rigeneranti (reintegrano parzialmente o totalmente i componenti chimici del bitume invecchiato contenuti nel RAP, conferendo all'impasto un'adeguata lavorabilità per la costruzione, e ripristinando le prestazioni del bitume, garantendone una nuova vita di servizio). La categoria di appartenenza di un prodotto può essere facilmente riscontrata attraverso prove di laboratorio [11]. Il rigenerante utilizzato (2,0÷3,5% di Iterlene ACF 1000 HP Green sul peso del RAP) in questo caso è composto da diversi componenti chimici, tra cui agenti ringiovanenti, antietà, plastificanti, sostanze idratanti, additivi disperdenti, ed è aggiunto al RAP a temperatura ambiente fino a ricoprire completamente i granuli e formare il nuovo impasto. Le prove di laboratorio sono state eseguite con lo scopo di ottenere il corretto mix design con un adeguato bilanciamento tra estrudibilità (per la stampante 3D) e prestazioni legate alla durabilità del ripristino. Dal punto di vista prestazionale, sono stati valutati: granulometria, stabilità Marshall, contenuto di vuoti, resistenza alla trazione indiretta e perdita di particelle (prova Cantabro).
A parità di curva granulometrica del RAP, si sono studiate diverse miscele variando il contenuto di additivo nell'intervallo 1,5-3,5% e il contenuto di acqua nell'intervallo 3,1-5%, per un totale di otto miscele. In funzione delle dimensioni delle buche che saranno sottoposte all'azione del robot, la dimensione massima dell'aggregato è stata scelta pari a 8 mm. La miscelazione e la compattazione (50 colpi di pestello Marshall) sono avvenute a temperatura ambiente. Le prove di stabilità Marshall e di resistenza a trazione indiretta sono state effettuate a 25 °C dopo un periodo di stagionatura di sette giorni alla stessa temperatura in forno ventilato. La perdita di particelle è stata studiata con la prova Cantabro secondo EN 12697-17, dopo un periodo di stagionatura di 28 giorni a 25 °C.
L'estrudibilità è stata invece verificata con una coclea orizzontale (Figura 3) che sarà montata sulla stampante 3D.



3. *La coclea per l'estrusione della miscela*
3. *Screw for extrusion of the mixture*

asphalt pavements (RAP - Reclaimed Asphalt Pavement) rejuvenated through a special formulated product.
The rejuvenator is the result of several years of research and it is already used in the field of sustainable solutions, but has been specially recalibrated for the research in question. The use of RAP instead of non-renewable raw materials (aggregates and bitumen) allows to pursue the objectives of environmental sustainability and therefore the reduction of equivalent CO_2 emissions.
The correct treatment of RAP includes the demolition of the pavement (separation of the surface courses from the deeper ones), the initial control (presence of foreign bodies, size of the elements and environmental compatibility), the treatment by crushing and/or sieving (chemical and dimensional control of the elements and mixing if they come from different sources), storage and stock management for possible recycling.
It is known that bitumen undergoes a chemical transformation both during the storage and production of bituminous mixes and during the use of the pavement. The chemical process involves bitumen oxidation, loss of volatile parts and deterioration of performance. For the recycling of RAP, it is possible to use two different categories of products: flux oils (they improve the workability of the mixture containing RAP to facilitate its use) and rejuvenators (they partially or totally reintegrate the chemical components of the aged bitumen contained in the RAP, giving the mixture adequate workability for construction, and restoring the performance of bitumen, ensuring a new service life). The category to which a product belongs can be easily detected by laboratory testing [11]. The rejuvenator used (2.0÷3,5% of Iterlene ACF 1000 HP on the weight of RAP) in this case is composed of several chemical components, including rejuvenating agents, anti-aging, plasticizers, moisturizers, dispersant additives, and it is added to the RAP at ambient temperature to completely cover the granules and form the new mixture. The laboratory tests were carried out with the aim of obtaining the correct mix design with an adequate balance between extrudability (for the 3D printer) and performance related to the durability of the restoration.
From a performance point, the following characteristics were evaluated: particle size, Marshall stability, void content, Indirect Tensile Strength and particle loss (Cantabro test).
At the same RAP particle size curve, different mixtures were studied by varying the additive content in the range of 1,5-3,5% and the water content in the range of 3,1-5%, for a total of eight mixtures. Depending on the size of the potholes that will be subjected to the action of the robot, the maximum aggregate size was chosen equal to 8 mm. Mixing and compaction (50 blows of Marshall hammer) took place at ambient temperature. Marshall stability and indirect tensile strength tests were carried out at 25 °C after seven-day conditioning period at the same temperature in a conditioning chamber. The particle loss susceptibility of the mixtures was studied with the Cantabro test according to EN 12697-17, after a conditioning period of 28 days at 25 °C. The extrudability was verified with a horizontal screw (Figure 3) that will be installed on the 3D printer.
Figure 4 shows the particle size curve of the final mixture and it also shows the results of the analyzed mixtures, compared

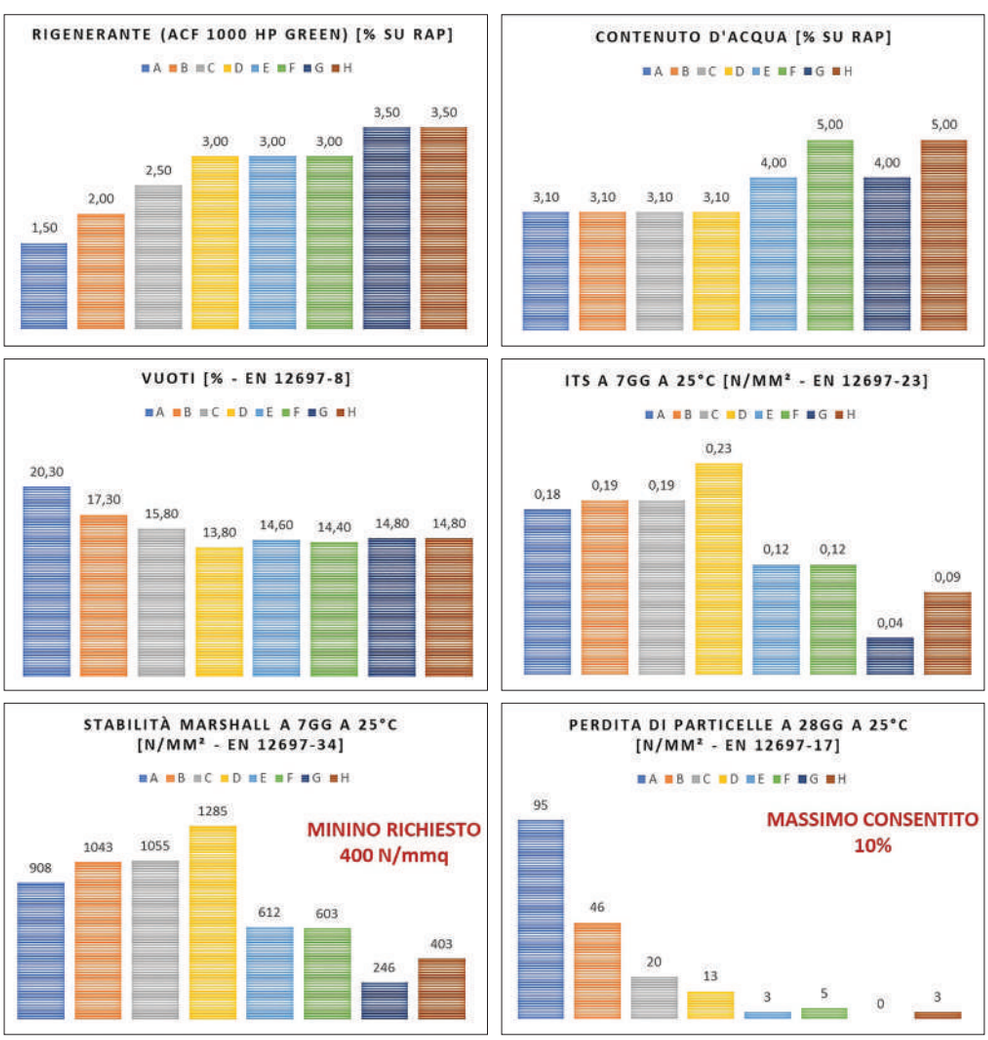
In Figura 4 è riportata la curva granulometrica della miscela finale e riporta inoltre i risultati delle miscele analizzate rispetto ai minimi previsti per questa tecnologia da un capitolato assunto come riferimento [12]. È evidente che la percentuale dei vuoti residui è elevata, sia per la bassa energia di compattazione sia per la mancanza di materiale fine che è racchiuso all'interno dei granuli di RAP frantumati. Tutte le miscele, ad eccezione della miscela G, mostrano stabilità Marshall e resistenza alla trazione indiretta molto superiori al minimo.
La miscela ottimale ha contenuto di rigenerante pari al 3,0% e contenuto di acqua del 3,1%. È interessante evidenziare che la miscela D raggiunge il massimo valore di resistenza a trazione indiretta e di stabilità Marshall, ma la perdita di particelle è leggermente superiore ai requisiti. Peculiarità tecnica della tecnologia proposta è che non è necessario ridimensionare, pulire e/o asciugare la buca per garantire la durata del ripristino. Inoltre, la buca è immediatamente carrabile subito dopo il riempimento.
Per quanto riguarda la perdita di particelle, le miscele migliori risultano la E e la F.



4. *La curva granulometrica del tappabuche con 100% fresato rigenerato a freddo*

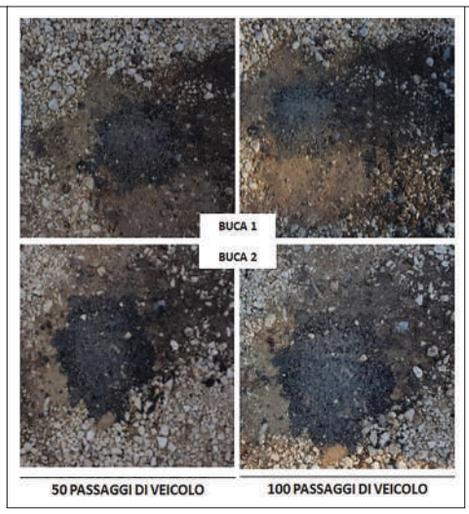
4. *Pothole patching particle size curve with 100% cold reclaimed asphalt*

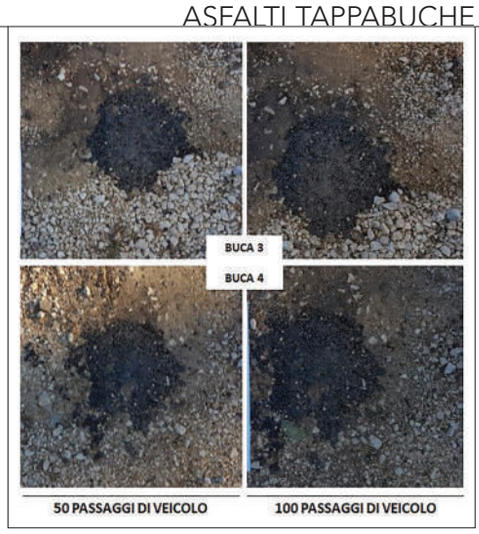
to the minimum required for this technology by a specification taken as a reference [12]. It is evident that the percentage of residual voids is high, both for the low compaction energy and for the lack of fine material that is enclosed within the crushed RAP granules. With the exception of mixture G, the other mixtures show much higher Marshall Stability and Indirect Tensile Strength than the minimum value.
The optimal mixture has a rejuvenator content of 3,0% and water content of 3,1%.
Interestingly, the mixture D reaches the maximum value of Indirect Tensile Strength and Marshall Stability, but the particle loss is slightly higher than the requirements. A technical peculiarity of the proposed technology is that it is not necessary to resize, clean and/or dry the pothole to ensure the duration of the restoration. In addition, the pothole is immediately driveable after filling. As for particle loss, the best mixtures are the E and F ones.
Since the Cantabro test does not faithfully reproduce the possible damage caused by traffic and in order to verify the effectiveness of the repairs, the material was laid in some potholes, specially made with appropriate shape and size, near the headquarters of the Faculty of Civil and Industrial Engineering of the Sapienza-University of Rome.



5A, 5B, 5C, 5D, 5E e 5F. *I risultati ottenuti per le otto miscele analizzate rispetto ai minimi previsti per questa tecnologia (Regione Lombardia e Comune di Milano, 2021)*

5A, 5B, 5C, 5D, 5E and 5F. *Obtained results for the eight analyzed mixtures, regarding the expected minimums for this technology (Lombardy Region and Municipality of Milan, 2021)*





6A e 6B. *Prove in sito delle miscele: le miscele E (6A) ed F (6B) immediatamente dopo la posa*
6A and 6B. *On-site tests of mixtures: mixtures E (6A) and F (6B) immediately after installation*

Poiché la prova Cantabro non riproduce in maniera fedele i possibili danni prodotti dal traffico e al fine di verificare l'efficacia delle riparazioni, il materiale è stato posato in alcune buche, realizzate appositamente con forma e dimensione appropriate, vicino alla sede della Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale della Sapienza-Università di Roma.
La scelta del sito deriva da due ragioni:

1. il sito è privato, per cui le prove sono state eseguite senza disagi al traffico e i campioni sono stati monitorati nel tempo con traffico controllato;
2. la pavimentazione è in terra ed è stato quindi facile scavare le buche con profondità e diametro di 10 cm.

Le buche utilizzate per il test sono state riempite con le due miscele ritenute ottimali tra quelle indicate nelle Figure 5A, 5B, 5C, 5D, 5E e 5F: miscele E ed F. Le riparazioni delle quattro buche sono state caricate con automezzo stradale (FIAT Doblò) subito dopo la posa e sono state inizialmente monitorate dopo 50 e 100 passaggi. I sondaggi sono stati effettuati visivamente per verificare che non vi fossero perdite di materiale, soprattutto inizialmente quando le miscele non avevano fatto ancora presa e il materiale era solo "autocompattato".
Le prove in situ hanno evidenziato un sostanziale e buon addensamento, con assenza di disgregazione del materiale o perdita di coesione, anche subito dopo la posa (Figure 6A e 6B). Finora, dopo sei mesi di traffico, il materiale di riempimento non presenta distacchi o sgranamenti.
Oltre a proseguire nel monitoraggio delle buche sopra evidenziate, al momento sono in corso lavori di riparazione di buche su pavimentazioni in conglomerato bituminoso e relative attività di controllo.

CONCLUSIONI

In questo articolo sono stati presentati i primi risultati di uno studio condotto nell'ambito del progetto di ricerca europeo InfraROB, il cui obiettivo è quello di aumentare la sicurezza dei lavoratori e degli utenti della strada in presenza di cantieri di manutenzione stradale.
Nell'ambito del progetto, si sta studiando in particolare un sistema di riparazione di piccole buche mediante un'apparecchiatura autonoma su cui sarà montata una stampante 3D in grado di estrudere una miscela idonea per la buca da riparare, senza prevedere la preliminare pulizia e la compattazione del riempimento. In particolare, in questo articolo è stato presentato lo studio di laboratorio e in situ finalizzato alla definizione delle caratteristiche ottimali per la miscela da utilizzare per alimentare la stampante 3D. In laboratorio sono stati studiati la granulometria, la stabilità Marshall, il contenuto di vuoti, la resistenza alla trazione indiretta e la perdita di materiale con la prova Cantabro. Queste caratteristiche sono state valutate variando il contenuto di additivo nell'intervallo 1,5-3,5% e il contenuto di acqua nell'in-

The choice of site derives from two reasons:

1. *the site is private, so the tests were carried out without disruption to traffic and the samples were monitored over time with controlled traffic;*
2. *the pavement is made of soil and it was therefore easy to dig the potholes with depth and diameter of 10 cm.*

The potholes used for the test were filled with the best two mixtures selected among those indicated in Figure 5: mixtures E and F. The repairs of the four potholes were loaded with a road vehicle (FIAT Doblò) immediately after the laying phase and they were initially monitored after 50 and 100 steps. The surveys were carried out visually to verify that there was no loss of material, especially at the beginning when the mixtures had not taken hold yet and the material was only "self-contained".
In-situ tests showed substantial and good thickening, with no material disintegration or loss of cohesion, even immediately after installation (Figure 6).
So far, after six months of traffic, the backfill material shows no detachment or raveling.
In addition to continuing to monitor the potholes highlighted above, pothole repair work on asphalt pavements and related inspection activities are currently ongoing.

CONCLUSION

This article presents the first results of a study conducted as part of the european research project InfraROB, whose aim is to increase the safety of workers and road users at road maintenance sites.
In particular, as part of the project, a system for repairing small potholes by means of an autonomous device is currently being studied. A 3D printer will be installed on this device in order to extrude a mixture suitable for the pothole to be repaired, without the prior cleaning and compaction of the backfill. In particular, this article presents the laboratory and in situ study aimed at defining the optimal characteristics for the mixture to be used to power the 3D printer.
Grain size, Marshall stability, void content, indirect tensile strength and material loss were studied in the laboratory using the Cantabro test. These characteristics were evaluated by

tervallo 3,1-5%. La dimensione massima dell'aggregato è stata limitata a 8 mm, perché il progetto InfraROB tratta soltanto la riparazione di piccole buche, con dimensioni massime di 5 cm di profondità e 20 cm di diametro.
Dal punto di vista della sostenibilità, la tecnologia prevede l'utilizzo di 100% RAP rigenerato (Iterlene ACF 1.000 HP Green) con miscelazione a temperatura ambiente. In totale sono state sperimentate otto miscele. Le prove di laboratorio hanno dato ottimi risultati in termini di resistenza a trazione indiretta, stabilità Marshall e perdita di particelle; la miscela si è rivelata molto stabile durante le prove in situ.
Nell'ambito del progetto InfraROB è ancora in corso lo studio di altre miscele di conglomerato bituminoso a freddo, ma attualmente la miscela presentata in questo articolo sembra soddisfare tutti i requisiti di consistenza, omogeneità, fluidità e struttura interna necessari per l'utilizzo con una stampante 3D. ■

varying the additive content in the range of 1.5-3.5 per cent and the water content in the range of 3.1-5%. The maximum aggregate size was limited to 8 mm, because the InfraROB project only deals with the repair of small potholes, with a maximum size of 5 cm depth and 20 cm diameter.
From the point of view of sustainability, the technology involves the use of 100% rejuvenated RAP (Iterlene ACF 1000 HP Green) with blending at room temperature. A total of eight mixtures were tested. Laboratory tests gave very good results in terms of indirect tensile strength, Marshall stability and particle loss; the mixture proved to be very stable during in-situ tests. Other cold asphalt mixtures are still being studied within the InfraROB project, but at the moment, the mixture presented in this article seems to meet all the requirements of consistency, homogeneity, fluidity and internal structure necessary to be used with a 3D printer. ■

(1) Professore Associato del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) presso "La Sapienza" Università di Roma
(2) Professore Ordinario del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) presso "La Sapienza" Università di Roma
(3) Professoressa Associata del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) presso "La Sapienza" Università di Roma
(4) Ingegnere, Responsabile Laboratorio Materiali Stradali presso "La Sapienza" Università di Roma
(5) Ingegnere, Presidente di AIPSS - Associazione Italiana Professionisti Sicurezza Stradale
(6) Ingegnere, Direttore Scientifico e dello Sviluppo Strategico di Iterchimica SpA

(1) Associate Professor at the Department of Civil, Constructional and Environmental Engineering (DICEA) at "La Sapienza" University of Rome
(2) Full Professor at the Department of Civil, Constructional and Environmental Engineering (DICEA) at "La Sapienza" University of Rome
(3) Associate Professor at the Department of Civil, Constructional and Environmental Engineering (DICEA) at "La Sapienza" University of Rome
(4) Engineer, Head of Road Materials Laboratory at "La Sapienza" University of Rome
(5) Engineer, President of AIPSS - Italian Association of Road Safety Professionals
(6) Engineer, Scientific and Strategic Development Director at Iterchimica SpA

Bibliografia / *References*

[1]. A. Johnson - "Asphalt pavement maintenance", Minnesota: Minnesota Department of Transportation, Office of Research and Strategic Services, 2000.
[2]. K. Taehyeong, R. Seung-Ki - "Review and analysis of pothole detection methods", Journal of emerging trends in computing and information sciences, 603-608, 2014.
[3]. R.I. Cambodia - "Guidelines for repairing defects of roads", Cambogia, 2017.
[4]. S. Psymbolic - "8 different types of pothole repair methods", Retrieved from Psymbolic: https://www.psymbolic.com/8-different-types-of-pothole-repair-methods/, 1° Giugno 2022.
[5]. Washington Transportation Department - WSDOT Maintenance Manual, Washington, 2020.
[6]. R. Eaton, E. Wright, W. Mongeon - "The engineer's pothole repair guide", Hanover, New Hampshire: USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1984.
[7]. B. Kotak, A. Parmar, D. Patel, B. Katriya - "Application and methodology of repairing and maintenance of potholes using modern techniques in flexible pavement", Researchgate, volume 3 (4): 121-127, 2014.
[8]. CSIR - "Potholes: technical guide to their causes, identification and repair", Pretoria: South Africa's Council for Scientific and Industrial Research, 2010.
[9]. N. Tamaskovics, P. Pavlov, L. Totev, D. Tondera - "Computational pothole mining subsidence analysis. Journal of mining and geological sciences", vol. 60, Part II, Mining, Technology and Mineral Processing, 2017.
[10]. G. Cantisani, A. D'Andrea, P. Di Mascio, L. Moretti, N. Fiore, M. Petrellli, C. Polidori, L. Venturini - "Materials study to implement a 3D printer system to repair road pavement potholes" AIIT 3rd International Conference on Transport Infrastructure and Systems (TIS Roma 2022), 15th-16th September 2022, Rome, Italy.
[11]. V. Loise - "Unravelling the role of a green rejuvenator agent in contrasting the aging effect on bitumen: a dynamics rheology, nuclear magnetic relaxometry and self-diffusion study.
[12]. Regione Lombardia e Comune di Milano - "Volume specifiche tecniche - Prezzario delle opere pubbliche", Milano: Provveditorato interregionale per la Lombardia e l'Emilia Romagna, 2021. / *Lombardy Region and Municipality of Milan - "Volume specifiche tecniche - Prezzario delle opere pubbliche", Milano: Provveditorato interregionale per la Lombardia e l'Emilia Romagna, 2021.*