

ASFALTI A FREDDO CON MATERIE PRIME DI RICICLO

UNO STUDIO DI LABORATORIO CHE MIRA ALLA PRODUZIONE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI PER APPLICAZIONI A FREDDO CONTENENTI MATERIE PRIME DI RICICLO. I RISULTATI OTTENUTI INCORAGGIANO FORTEMENTE LA SCELTA DI MATERIE PRIME ALTERNATIVE CON SIGNIFICATIVI MARGINI DI INCREMENTO

Le buche, una delle principali problematiche relative alle pavimentazioni stradali, compaiono normalmente dopo che le pavimentazioni sono state sottoposte a una combinazione di carichi ripetuti di veicoli e scarsa capacità portante della struttura sottostante. All'insorgere delle prime fessure, gioca un ruolo fondamentale anche l'azione dell'acqua piovana, la quale penetra negli strati della pavimentazione attraverso le aperture formatesi. Di conseguenza, l'effetto ciclico del traffico congiunto all'ingresso di umidità causa la perdita di resistenza degli strati portanti della pavimentazione. In seguito a questo inevitabilmente lo strato più superficiale inizia a "sgranarsi", formando così buche che tendono ad ingrandirsi esponenzialmente [1].



1. Chiusura di un carotaggio da pavimentazione stradale con asfalto a freddo

Il conglomerato bituminoso per applicazioni a freddo (denominato volgarmente "asfalto a freddo") viene comunemente utilizzato per la riparazione delle buche o per il ripristino delle tracce realizzate per la realizzazione o la manutenzione di sottoservizi (rete idrica, elettrica, ecc.). Tale soluzione rappresenta ovviamente un provvedimento temporaneo, in quanto l'asfalto a freddo non è ad oggi in grado di garantire durabilità nel tempo. L'asfalto a freddo è generalmente composto da una miscela di aggregati con particolari leganti (emulsione bituminosa, bitume diluito, ecc.) e additivi. Tuttavia, negli ultimi anni, l'uso di materiali di scarto come il granulato di conglomerato bituminoso (RAP), le tegole asfaltiche riciclate (RAS) e sabbie artificiali derivanti da termovalorizzazione di RSU come sostituti minerali hanno ricevuto crescente interesse e attenzione nella progettazione degli asfalti a freddo. Nonostante i benefici delle miscele a freddo nei programmi di manutenzione, essi presentano alcune debolezze relative alle loro scarse prestazioni o rotture premature. Scarsa lavorabilità a freddo, scarsa stabilità, specialmente nelle buche profonde, e suscettibilità all'umidità sono i principali problemi associati a queste miscele. Inoltre, poiché non possono essere compattate allo stesso livello dei conglomerati bituminosi a caldo, mostrano un alto contenuto di vuoti che, insieme a un tempo di maturazione più o meno prolungato, influisce negativamente sulle loro proprietà meccaniche. L'asfalto a freddo è una tipologia di materiale fortemente influenzata dalla granulometria con la quale viene prodotto. In generale, una granulometria che comporti un contenuto di vuoti più elevato una volta compattato consente una rapida fuoriuscita degli elementi volatili, e quindi una maturazione più veloce delle caratteristiche di resistenza, ma allo stesso tempo comporterebbe una riduzione della rigidità e della resistenza alla deformazione dovuta alla maggior presenza di vuoti. Al contrario, una curva granulometrica che miri a ridurre il contenuto di vuoti può

REQUISITO	METODO	U.M.	VALORE		
			Sabbia calcarea	Sabbia RSU	Graniglia calcarea
Dimensioni dell'aggregato	UNI EN 933-1	mm	0/4	0/4	4/7
Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8	%	81	68	-
Massa volumica delle particelle	UNI EN 1097-6	Mg/m ³	2.668	2.526	2.673
Percentuale di superfici frantumate	UNI EN 933-5	%	-	-	100
Forma dell'aggregato grosso – Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	-	-	-	15
Resistenza alla frammentazione dell'aggregato grosso	UNI EN 1097-2	%	-	-	22
Resistenza alla levigazione dell'aggregato grosso	UNI EN 1097-8	-	-	-	32
Resistenza al gelo e disgelo	UNI EN 1367-1	%	-	-	< 1

Tabella 1. Caratteristiche degli inerti utilizzati

REQUISITO	METODO	U.M.	VALORE
Passante (2 mm)	UNI EN 933-10	%	100.0
Passante (0.125 mm)			88.5
Passante (0.063 mm)			77.1
Porosità del filler secco compattato (Vuoti Rigden)	UNI EN 1097-04	%	38.4
Stiffening Power – $\Delta_{R\&B}$	UNI EN 13179-1	°C	8.0
Massa volumica delle particelle	UNI EN 1097-7	Mg/m ³	2.567

Tabella 2. Caratteristiche del filler utilizzato

REQUISITO	METODO	U.M.	VALORE
Dimensioni dell'aggregato (tal quale)	UNI EN 933-1	mm	0/10
Dimensioni dell'aggregato (estratto)			0/6.3
Percentuale di bitume sulla miscela	UNI EN 12697-1	%	4.93
Percentuale di bitume sugli aggregati	UNI EN 12697-1	%	5.19

Tabella 3. Caratteristiche del fresato utilizzato

fornire una migliore stabilità e durata dopo la posa in opera ma non garantirebbe una buona lavorabilità per lo stoccaggio e la movimentazione in impianto [2; 3].

Dopo la posa in opera e la compattazione dell'asfalto a freddo inizia il processo di indurimento e la miscela acquisisce resistenza. In laboratorio gli asfalti a freddo vengono analizzati per lo più in termini di lavorabilità, stabilità e resistenza alla deformazione. La stabilità della miscela viene spesso determinata tramite prova Marshall, prove di resistenza a trazione indiretta e prove di modulo resiliente. Tuttavia è stato dimostrato che non è possibile stabilire una correlazione significativa tra queste prove e le prestazioni sul campo [4; 5].

In base alle caratteristiche dell'asfalto a freddo e del fresato (RAP), l'utilizzo di quest'ultimo come possibile aggiunta inerte presenta potenziali vantaggi, tra cui l'innescare di un ciclo di riutilizzo di materiale destinato a rifiuto, la conservazione delle risorse e quindi la sostenibilità ambientale. Inoltre, l'asfalto a freddo

prodotto con fresato può presentare vantaggi in termini di prestazioni. Durante il processo di produzione, la bassa temperatura di preparazione del conglomerato può evitare l'invecchiamento secondario del fresato, mentre durante il processo di stoccaggio si promuove la possibilità di diffusione interfacciale tra i leganti (vergine e del fresato) e l'additivo.

Lo studio presentato mira quindi a valutare l'introduzione di materie prime di riciclo, come fresato e sabbia da RSU, nel ciclo produttivo dell'asfalto a freddo. Il programma sperimentale, svolto in laboratorio, ha dapprima assunto come riferimento un prodotto disponibile sul mercato, il quale è stato poi soggetto a variazioni granulometriche introducendo alternative riciclate. Le prestazioni investigate hanno riguardato lavorabilità e resistenza.

MATERIALI E PROGRAMMA SPERIMENTALE

In questa sezione vengono illustrati i materiali utilizzati e le miscele prodotte nel contesto sperimentale, nonché il programma di prove seguito per l'analisi dell'influenza degli inerti riciclati.

Le materie prime

Gli inerti di prima estrazione utilizzati per la produzione dell'asfalto a freddo assunto a riferimento sono una sabbia calcarea 0/4 ed una graniglia calcarea 4/7. Viene poi prevista una modesta integrazione di filler calcareo. Gli inerti riciclati considerati sono invece un granulato di conglomerato bituminoso 0/10 e una sabbia artificiale 0/4 derivante da termovalorizzazione RSU. Le caratteristiche degli inerti utilizzati, compreso il filler, vengono riportate nelle tabelle 1, 2 e 3.

Gli asfalti a freddo prodotti sono stati confezionati con un bitume classe 70/100 (vedi tabella 4) con aggiunta di additivo flussante per mantenerne la lavorabilità.

I conglomerati bituminosi

La ricerca sperimentale ha coinvolto dapprima la caratterizzazione del materiale di riferimento confezionato in impianto e imballato in sacchi e, successivamente, la produzione di 4 miscele alternative contenenti materie prime di riciclo. I dosaggi di ciascun componente relativi ai conglomerati analizzati vengono riportati in tabella 5 come percentuale sul peso totale del conglomerato.

Si osserva che la sabbia artificiale viene dosata tra circa il 10% e il 20% mentre il fresato viene introdotto con dosaggi variabili tra circa il 15% e il 25%. In definitiva, le alternative proposte contengono mediamente circa il 30% di materie prime riciclate.

Un aspetto fondamentale, affinché il paragone tra le miscele analizzate sia possibile, è la coerenza delle diverse curve granulometriche, le quali sono state mantenute il più possibile prossime tra loro (vedi figura 2). Va sottolineato che nella fase di mix-design, la curva granulometrica del fresato considerata è quella relativa all'inerte tal quale, in quanto è possibile sostenere che le basse temperature di produzione dell'asfalto a freddo non comportino, se non in maniera minima, una riattivazione del bitume contenuto nel fresato. Al fine di avere risultati paragonabili tra le miscele oggetto di studio, il bitume di apporto del fresato ha comportato una riduzione del bitume vergine, così che il quantitativo di bitume totale all'interno della miscela fosse mantenuto costante.

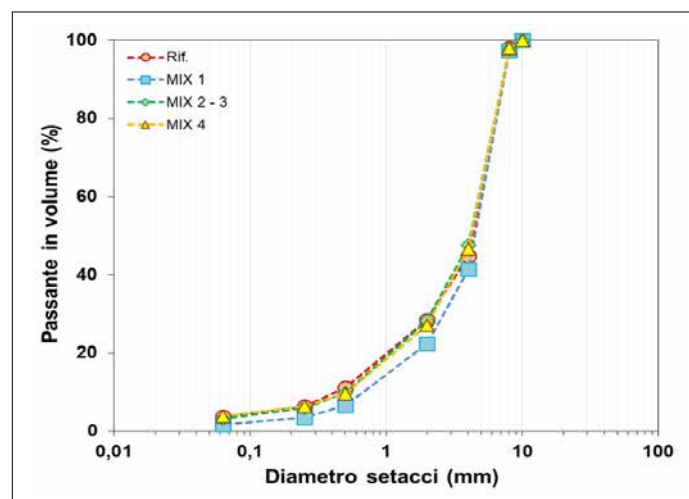
Le miscele oggetto di studio sono state prodotte in laboratorio tramite miscelatore ad asse orizzontale con capienza massima di 20-25 kg. Gli inerti, il fresato e il filler, asciugati in forno a 130 °C fino al raggiungimento di massa costante, sono stati introdotti nel miscelatore precedentemente riscaldato a 100 °C. Gli inerti sono stati quindi mescolati per circa 2 minuti per ottenere un assortimento granulometrico omogeneo. Successivamente è stato inserito il quantitativo di bitume (riscaldato a 160 °C) e

REQUISITO	METODO	U.M.	70/100
Penetrazione a 25°C	UNI EN1426	dmm	81
Punto di Rammollimento	UNI EN1427	° C	46.0
Viscosità dinamica a 160 °C	UNI EN13302	Pa · s	0.075
Performance Grade	ASTM D6373	-	58-22

Tabella 4. Caratteristiche del legante bituminoso utilizzato

COMPONENTE	RIF.	MIX1	MIX2	MIX3	MIX4
	% Peso				
Sabbia artificiale RSU	0.0	9.4	9.4	9.4	18.9
Sabbia 0/4	36.4	9.4	17.0	16.9	9.4
Graniglia 4/7	54.7	51.9	47.1	47.1	50.0
Granulato di conglomerato 0/10	0.0	23.6	18.9	18.8	14.1
Filler	3.2	0.0	1.9	1.9	1.9
Bitume totale	4.0				
Additivo flussante	1.7	1.7	1.7	1.9	1.7
TOT	100.0				

Tabella 5. Composizione delle miscele analizzate



2. Curve granulometriche delle miscele analizzate

di filler previsti, procedendo alla miscelazione con controllo di temperatura (100 °C) fino a completa e uniforme distribuzione del legante.

L'additivo flussante per la produzione di conglomerati a freddo è stato dosato direttamente nel mescolatore come ultimo componente. Dopodiché, una mescolazione di ulteriori 2 minuti ha permesso la dispersione ottimale.

Programma sperimentale

Una delle caratteristiche fondamentali che una miscela di asfalto a freddo deve garantire è la sua stabilità nel tempo ovvero mostrare durevoli proprietà di lavorabilità e resistenza. Per questo motivo il programma sperimentale e le analisi svolte sono state basate su un processo di maturazione simulato dei materiali sottoposti ad analisi, eseguito per 14 giorni a 40 °C. Più precisamente, il materiale prodotto è stato lasciato prima raffreddare a temperatura ambiente e, successivamente, collocato in cella climatica al fine di accelerarne il processo di maturazione (figura 3). Le caratteristiche di lavorabilità e resistenza delle miscele oggetto di studio sono state analizzate a vari step di maturazione, più precisamente a t = 0, 1 giorno, 3 giorni, 7 giorni e 14 giorni. In corrispondenza di ciascuno di questi step sono state eseguite le seguenti prove:

1. compattazione di n. 4 provini tramite pressa giratoria (UNI EN 12697-31) a temperatura ambiente (diametro 100 mm, pressione di 600 kPa, velocità di 30 rpm, angolo giratorio di 1,25°, 300 giri);
2. analisi delle proprietà volumetriche dal processo di compattazione;
3. condizionamento in cella climatica a 25 °C dei provini compattati per 6 ore;
4. prove di resistenza a trazione indiretta (UNI EN 12697-23).

Le curve di compattazione ottenute sono state analizzate approssimando le stesse tramite due parametri: m_{10} , il quale rappresenta la lavorabilità della miscela (massa volumica a 10 giri), e k che rappresenta la compattabilità della miscela. I due parametri sono legati dall'equazione:

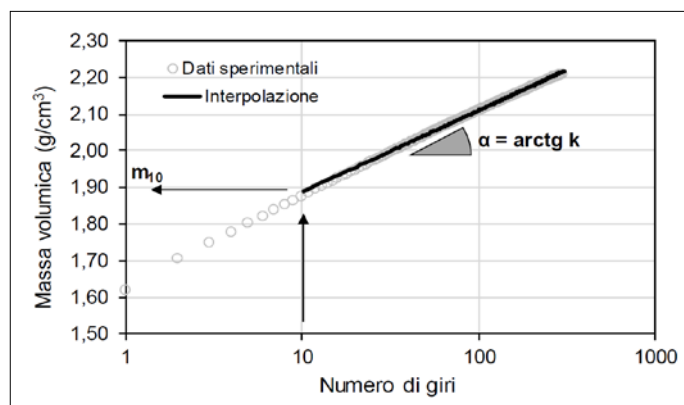
$$m_v = m_{10} + k \cdot \log N$$

Dove m_v è la massa volumica del materiale e N è il numero di giri. Graficamente, l'equazione può essere rappresentata congiuntamente con i dati rilevati come in figura 4.

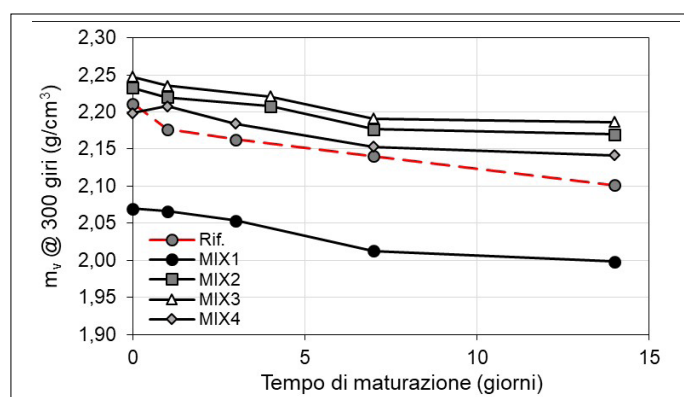
I RISULTATI SPERIMENTALI

Caratteristiche di lavorabilità

In figura 5 viene mostrato il valore di massa volumica dei provini compattati a 300 giri in relazione al tempo di maturazione. In generale si nota un peggioramento di tutte le miscele in termini di massa volumica all'aumentare del tempo di maturazione, conseguenza apportata dalla perdita di fluente che comporta un irrigidimento della fase bituminosa a temperatura ambiente. Il MIX1 è l'unica miscela che mostra valori di densità inferiori alla miscela di riferimento, conseguenza del fatto che è l'unico



4. Curva di compattazione approssimata



5. Evoluzione della massa volumica a 300 giri



3. Conglomerati bituminosi in cella climatica a 40 °C

conglomerato privo di filler di integrazione.

Le altre alternative prodotte migliori in termini di densità dell'asfalto a freddo di riferimento traggono benefici dal ridotto utilizzo di fresato (MIX2), dall'aumento del dosaggio di additivo (MIX3) e dall'aumento di sabbia artificiale da RSU (MIX4). Quest'ultima miscela ha mostrato in definitiva i risultati più prossimi alla miscela di riferimento.

La figura 6 mostra l'evoluzione dei parametri di lavorabilità m_{10} e compattabilità k relativamente al tempo di maturazione. In prima analisi, è visibile che il tempo di maturazione ha un maggior effetto sulla lavorabilità m_{10} piuttosto che sulla compattabilità k . Infatti, è evidente che all'aumentare del tempo di maturazione il parametro m_{10} tende a diminuire e, quindi, la lavorabilità tende a peggiorare. Le miscele che mostrano un'evoluzione del parametro simile o migliore dell'asfalto a freddo di riferimento sono il MIX2 e il MIX3 ovvero quelle che prediligono l'utilizzo di filler di integrazione e un maggior utilizzo di fresato (circa il 20%) rispetto alla sabbia artificiale da RSU (circa il 10%).

Allo stesso tempo, il parametro di compattabilità non sembra essere influenzato dal tempo di maturazione e i valori ottenuti relativi alle varie miscele mostrano un andamento pressoché costante nel tempo. Ad ogni modo, le miscele che mostrano valori più alti del parametro k , e quindi migliore compattabilità, dell'asfalto a freddo di riferimento sono il MIX2, MIX3 e MIX4, le quali si differenziano maggiormente dal MIX1 per la presenza di filler di integrazione.

Un interessante aspetto che vale la pena di approfondire è relativo a quale dei due fenomeni (lavorabilità e compattabilità) sia maggiormente responsabile della massa volumica del materiale compattato e riassunta in figura 5. Tutti i dati raccolti in merito vengono espressi nelle figure 7A e 7B, dove vengono mostrate le relazioni tra la massa volumica del materiale raggiunta a 300 giri e i parametri k e m_{10} .

Si nota che mentre la compattabilità k mostra un grado di correlazione relativamente basso ($R^2 = 0,37$), la lavorabilità m_{10} influenza invece più chiaramente il valore di massa volumica ($R^2 = 0,83$). Nel particolare contesto dell'asfalto a freddo, questo risultato assume maggiore importanza, in quanto la compattazione viene generalmente eseguita con bassi livelli di energia (talvolta manualmente) e quindi verosimilmente raggiungendo livelli di massa volumica simili al valore di m_{10} . Dai risultati ottenuti si può quindi ritenere che tanto maggiore risulta essere l'indice di lavorabilità, tanto migliore sarà la capacità del materiale di addensarsi dopo la posa in opera e, quindi, garantire determinate prestazioni meccaniche. Il materiale deve però assicurare il mantenimento della lavorabilità nel tempo, aspetto trattato e mostrato nelle figure 6A e 6B.

Resistenza a trazione indiretta

Nelle figure 8A e 8B vengono illustrati i risultati ottenuti in termini di resistenza a trazione indiretta in relazione al tempo di maturazione. Nello specifico, in figura 8A sono raccolti i dati relativi al

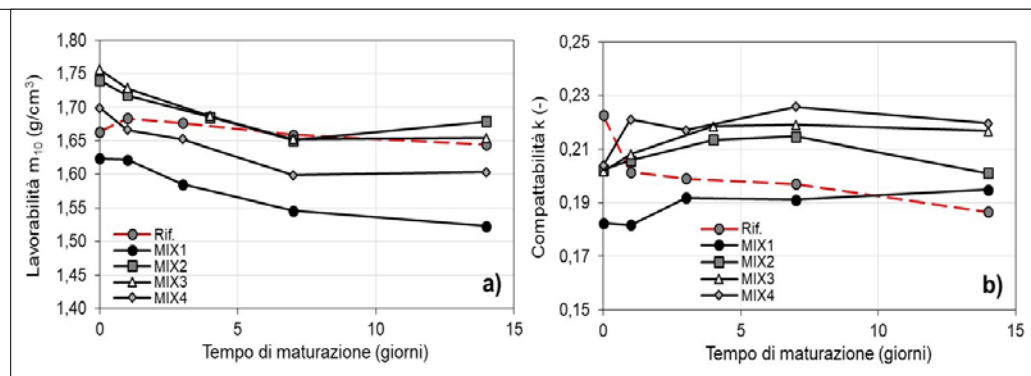
valore di resistenza a trazione indiretta, mentre in figura 8B viene illustrato l'andamento del valore di resistenza rapportato al valore precedentemente rilevato, in percentuale. In questo modo è possibile determinare la stabilità del materiale in termini di resistenza, ovvero quando il processo di maturazione va ad esaurirsi e quindi quando il valore calcolato è prossimo allo 0% (o in un tratto discendente).

Come ci si poteva aspettare, la resistenza mostra un andamento crescente con il tempo di maturazione. In generale, la miscela di riferimento è caratterizzata dai valori minori di resistenza a trazione indiretta, mentre le 4 alternative proposte contenenti materie prime di recupero mostrano maggiori resistenze lungo tutto il processo di maturazione. Al termine del periodo di monitoraggio, il MIX1 è quello caratterizzato dalla maggior resistenza, risultato del maggior contenuto di fresato (circa il 25%), seguito dal MIX4, ovvero quello con il maggior contenuto di sabbia artificiale da RSU. Il MIX2 ed il MIX3 sono le miscele che mostrano il comportamento più simile a quello dell'asfalto a freddo di riferimento prodotto con materie prime vergini.

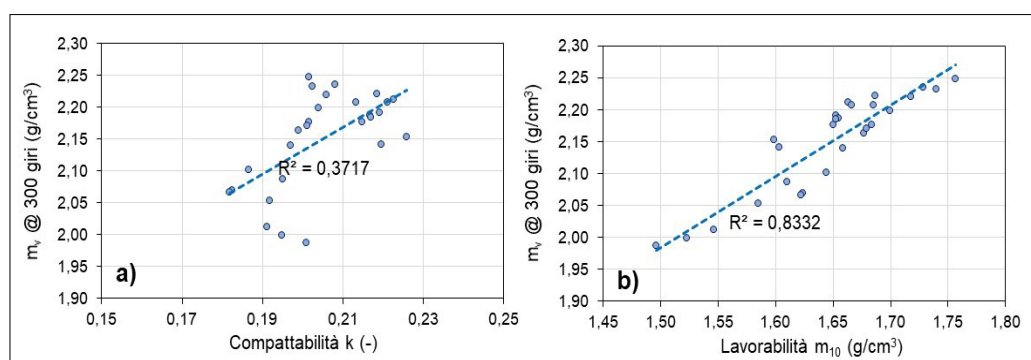
Infine, si può sottolineare dalla Figura 8B che tutte le miscele raggiungono una situazione discretamente stabile dopo i 14 giorni di maturazione ipotizzati, in quanto non mostrano un andamento marcatamente crescente.

CONCLUSIONI

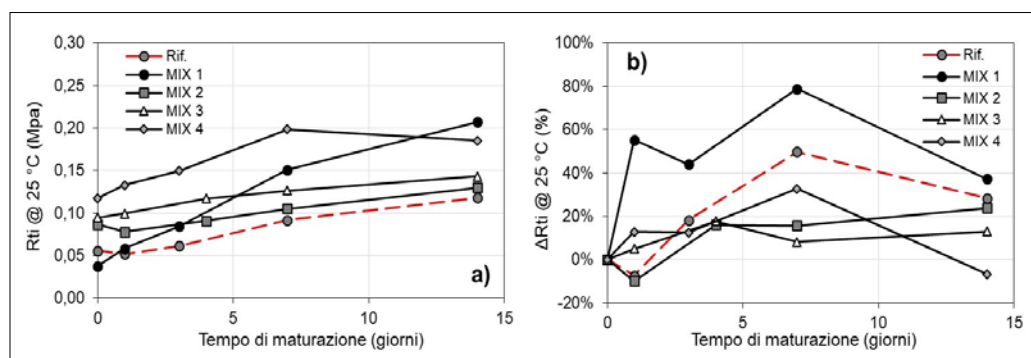
La produzione di asfalti a freddo (ovvero a temperatura ambiente) avviene solitamente a temperature inferiori rispetto ai conglomerati bituminosi tradizionali e questo per avvantaggiare l'elevato utilizzo di additivo destinato al mantenimento della lavorabilità. Al giorno d'oggi, tale prodotto viene tradizionalmente confezionato con un'elevata percentuale di materie prime vergini (prossima al 100%), sebbene sia destinato a riparazioni ordinarie e di piccola entità (buche, carotaggi, tracce per sottoservizi, ecc.). Risulta quindi di fondamentale importanza progettare e analizzare valide alternative in termini ambientali e prestazionali, in modo da ridurre quanto più possibile l'impatto



6A e 6B. a) evoluzione del parametro di lavorabilità m_{10} ; b) evoluzione del parametro di compattabilità k



7A e 7B. Correlazione tra: a) compattabilità k ; b) lavorabilità m_{10}



8A e 8B. Evoluzione nel tempo di: a) Resistenza a trazione indiretta; b) Variazione di resistenza

causato dalla produzione di tale prodotto. A tal fine, la ricerca condotta ha affrontato la possibilità di introdurre circa il 30% di materie prime riciclate (fresato e sabbia artificiale derivante da RSU) in un prodotto di riferimento attualmente sul mercato e contenente il 100% di materie prime vergini.

In sintesi, sono state sottoposte a prova 4 miscele alternative, analizzate in termini di lavorabilità, compattabilità e resistenza a trazione indiretta lungo un periodo di maturazione di 14 giorni a 40 °C. I risultati hanno innanzitutto sottolineato l'importanza del filler di integrazione, il quale contribuisce positivamente a tutti gli aspetti analizzati, assicurando risultati soddisfacenti di mantenimento di lavorabilità e di resistenza.

Un dosaggio di fresato superiore al 20% ha comportato una drastica diminuzione di lavorabilità a partire dal 3° giorno di maturazione, nonché uno scarso addensamento del materiale compattato. Al contrario, dosaggi di fresato compresi tra il 15% e il 20% possono essere considerati non sensibilmente influenti sui risultati ottenuti rispetto al prodotto preso a riferimento.

La sabbia artificiale derivante dalla termovalorizzazione di RSU è stata introdotta in dosaggi pari al 10% e al 20% e in combinazione di fresato. Un dosaggio del 20% è risultato penalizzare esclusivamente la lavorabilità del materiale, mentre un utilizzo pari al 10% ha restituito un comportamento paragonabile al prodotto di riferimento.

In conclusione, i risultati ottenuti hanno convalidato un utilizzo di materie prime di riciclo in sostituzione di circa il 30% della miscela granulare, considerando sia il fresato sia la sabbia artificiale. Tali elementi risultano conferire i risultati migliori se dosati al 20% (fresato) e al 10% (sabbia artificiale). Lo studio si è però basato sull'assunzione di un materiale di riferimento puramente indicativo ed è quindi plausibile asserire che un diverso prodotto, così come diverse materie prime vergini di integrazione, potrebbero portare a dosaggi differenti. Inoltre, è chiaramente necessario convalidare i risultati ottenuti con una produzione su larga scala in impianto.

Un riguardo particolare in caso di utilizzo di fresato va alle modalità di lavorazione e stoccaggio dello stesso. L'aspetto più importante da tenere in considerazione è l'umidità in esso contenuto, fattore già determinante in caso di produzione di conglomerati bituminosi tradizionali ma ancor più ponderante nel caso di conglomerati bituminosi per applicazioni a freddo. Infatti, per massimizzarne e ottimizzarne l'uso è di fondamentale importanza utilizzare fresato con un contenuto minimo di umidità, la quale altrimenti andrebbe ad abbattere ulteriormente le temperature di produzione già relativamente

basse (circa 100 °C), compromettendo dunque la qualità della miscelazione e del prodotto finale. ■

⁽¹⁾ *Ingegnere, Direttore Ricerca e Sviluppo STS Mobile Srl*

⁽²⁾ *Ingegnere, Responsabile Ricerca e Sviluppo STS Mobile Srl*

Bibliografia

- [1]. Chatterjee, S., White, R. P., Smit, A., Prozzi, J., and Prozzi, J. A. (2006). "Development of mix design and testing procedures for cold patching mixtures." Rep. No. FHWA/TX-05/0-4872-1, Texas Dept. of Transportation, Austin, TX
- [2]. Anderson, D. A., Thomas, H. R., Siddiqui, Z., and Krivohlavek, D. D. (1988). "More effective cold, wet-weather patching materials for asphalt pavements." Publication FHWA-RD-88-001, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [3]. Evans, L. D., Mojab, C. G., Patel, A. J., Romine, A. R., Smith, K. L., and Wilson, T. P. (1993). "Innovative materials development and testing. Volume-1: Project overview." SHRP-H-352, Washington, DC.
- [4]. Maher, A., Gucunski, N., Yanko, W., and Petsi, F. (2001). "Evaluation of pothole patching materials." FHWA 2001-02, New Jersey Dept. of Transportation, Trenton, NJ;
- [5]. Estakhri, C. K., Button, J. W. (1995). "Evaluation and improvement of bituminous maintenance mixtures." FHWA/TX-96/1377-1F, Texas Transportation Institute, Texas A&M Univ., College Station, TX