

Metodologie innovative per pavimentazioni in cls



Maurizio Crispino* Filippo Giustozzi**

Le pavimentazioni rigide in calcestruzzo sono, almeno in Italia, solitamente relegate a poche sporadiche applicazioni, per lo più in ambito aeroportuale.

È prassi comune, infatti, associare a questa tipologia di sovrastruttura una connotazione di elevata resistenza ai carichi e agli agenti chimici nonché una maggiore vita utile e minore manutenzione rispetto a una pavimentazione flessibile in conglomerato bituminoso.

Tra gli aspetti che ne penalizzano l'uso sono invece spesso menzionati gli elevati costi di costruzione, la minore produttività data dai tempi di maturazione del calcestruzzo e le difficoltà legate alla manutenzione.

In ambito italiano, altre difficoltà, alcune peraltro di stampo prettamente culturale, impediscono una più ampia diffusione delle pavimentazioni in calcestruzzo: la mancanza di metodologie consolidate dalla pratica per la progettazione sia della sovrastruttura stradale sia della miscela da utilizzare; la scarsa conoscenza delle diverse tipologie di pavimentazione rigida in funzione della presenza o meno e della tipologia di armatura; la difficoltà nel proporzionamento dei molteplici additivi che intervengono in un calcestruzzo, anche se con fun-



1A e 1B. La stesa di pavimentazioni in calcestruzzo mediante tecnologia slipform

zioni e posologie differenti, allo stesso modo che in un conglomerato bituminoso. Per tutto quanto detto, l'utilizzo delle pavimentazioni rigide nelle infrastrutture viarie viene spesso relegato ad ambiti aeroportuali ed industriali con qualche minima eccezione per le autostrade, per lo più in aree di sosta o di pedaggio. Il materiale utilizzato viene inoltre spesso considerato alla stregua di un calcestruzzo per utilizzo civile e sovente progettato come un comune solaio di abitazione senza considerare le specificità di un utilizzo stradale (caratteristiche funzionali di aderenza, esposizione a vari fattori climatici, interazione con carichi dinamici per rotolamento).

Il calcestruzzo tuttavia ha dimostrato, grazie anche all'utilizzo di nuove tecnologie costruttive, di poter rappresentare un degno sostituto, per certi versi anche migliore, del conglomerato bituminoso. Il presente articolo approfondisce l'utilizzo di finitrice a casseforme scorrevoli (slipform) per la costruzione delle pavimentazioni rigide in calcestruzzo. Tale metodologia permette l'estrusione in continuo di una lastra in calcestruzzo da una finitrice con casseri laterali scorrevoli; il macchinario è alimentato, nella parte frontale, da autocarri che scaricano calcestruzzo sciolto (Figure 1A e 1B).

In numerosi aeroporti italiani, ad esempio, a causa di consistenti e repentini incrementi dei volumi di traffico, si è vista di recente la necessità di ampliare le superfici utili atte alla sosta e movimentazione degli aeromobili. Noti i brevi intervalli temporali e la necessità di ottenere elevate resistenze meccaniche ai carichi circolanti, talvolta anche a bassa velocità, si è spesso preferito l'utilizzo di finitrici slipform rispetto ai metodi tradizionali tipo cast-in-place per la costruzione di pavimentazioni rigide in calcestruzzo.

Rispetto al getto in opera, l'utilizzo delle casseforme scorrevoli consente: elevate produttività, finitura superficiale in continuo con la stesa, minore acqua d'impasto e conseguenti maggiori resistenze del calcestruzzo, elevata regolarità grazie ai sistemi ottici e satellitari di guida, omogeneità nella vibrazione e regolazione della stessa in funzione delle esigenze di cantiere, riduzione della quantità di giunti di costruzione e della manodopera necessaria.

La slipform, utilizzata già da diversi anni in America, Nord dell'Europa e molti altri Paesi anche per uso stradale, rappresenta quindi una valida metodologia di costruzione con pregevole qualità del prodotto finito qualora sapientemente utilizzata.

Nel seguito dell'articolo si identificheranno alcune delle caratteristiche peculiari del mix-design di una miscela per slipform e verrà presentata una strumentazione innovativa, messa a punto dagli scriventi, per la verifica di tali miscele in vera grandezza.

Gli obiettivi della ricerca

Lo scopo della ricerca è stato lo studio di quei parametri che influiscono nel comportamento di una miscela per slipform: dalla messa a punto della curva granulometrica, alle quantità di cemento e acqua, alla calibrazione degli additivi.

Si sono quindi verificate le prestazioni di tali miscele mediante indagini di laboratorio e le migliori sono state poi selezionate per una più approfondita analisi in vera grandezza mediante la strumentazione innovativa che si avrà modo di descrivere nel seguito.

I materiali

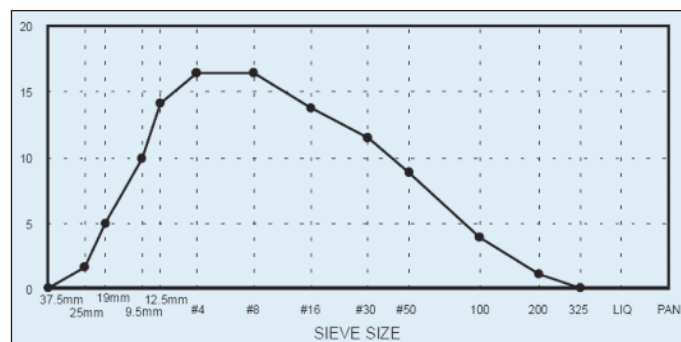
Si intende da subito far presente come non esista un'unica miscela universalmente adatta per la costruzione di pavimentazioni rigide mediante slipform. Ogni luogo di costruzione presuppone delle peculiarità (per esempio, tipologia di aggregati e del cemento, condizioni climatiche) che devono essere note al Progettista in modo da essere "adattate" al particolare utilizzo e risultato atteso.

La distribuzione granulometrica degli aggregati

La curva granulometrica rappresenta, nelle miscele di calcestruzzo per slipform, uno dei parametri fondamentali che permettono l'estrusione in continuo della lastra ed il suo conseguente auto-sostentamento nella posizione originale. Distribuzioni granulometriche non idonee portano ad evidenti difetti in corso d'opera (per esempio, cedimenti del profilo della lastra di calcestruzzo fresco) e in esercizio (per esempio, fessurazione, scheggiature dei giunti).

Il documento ETL 97-5 [1] dell'Air Force Civil Engineering Center (AFCEC) statunitense fornisce alcuni parametri per la corretta calibrazione del mix-design del calcestruzzo ad uso slipform. In particolare, per la curva granulometrica si identifica 19 mm (in funzione anche dell'esposizione ai cicli di gelo/disgelo e all'utilizzo di sali disgelanti) come diametro nominale massimo dell'aggregato e 2,35 come modulo di finezza minimo per l'aggregato fine. Si ricorda infatti che il modulo di finezza viene calcolato come la somma diviso cento del trattenuto cumulato percentuale ai setacci 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm. È opportuno che le percentuali di aggregato grosso e fine siano proporzionate in modo da garantire i requisiti di lavorabilità, resistenza, finitura e capacità di auto-sostenersi della miscela e, in particolare, la composizione della miscela dovrà essere tale da richiedere un basso quantitativo d'acqua d'impasto riducendo i potenziali fenomeni di ritiro, facilitando la finitura superficiale ed evitando fenomeni di segregazione [2 e 3].

Una prima regola generale suggerita dallo U.S. Army Corps of Engineers per la costruzione di pavimentazioni rigide mediante slipform è di contenere il materiale trattenuto ad ogni setaccio tra l'8 e il 18% in maniera da non avere gap troppo pronunciati nella curva granulometrica e garantire così una transizione omogenea dall'aggregato grosso a quello fine. L'American Concrete Pavement Association (ACPA) definisce idonea una curva con una forma ad "haystack" del tipo rappresentato in Figura 2 (in ordinata la percentuale di trattenuto, in ascissa la dimensione dei setacci).

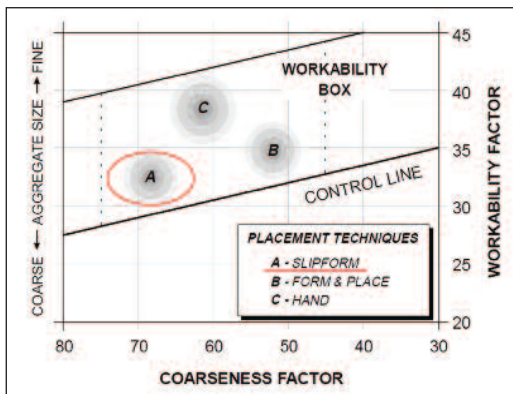


2. La curva granulometrica con forma ad "haystack" - ACPA

Tuttavia, distribuzioni granulometriche di questo tipo (eccessivamente ben-gradate o well-graded) vengono giudicate spesso come non idonee ad un rapido auto-sostentamento della miscela e si preferisce sovente, nella pratica corrente, aggiungere dei gap nella parte intermedia dell'aggregato. Ciò facilita anche il reperimento delle frazioni granulometriche da approvvigionare, minori per numero e tipologia.

Due parametri, il coarseness factor (CF) ed il workability factor (WF) [1], vengono inoltre definiti al fine di verificare il corretto proporzionamento della curva granulometrica. Il primo, definito come il rapporto tra la percentuale di trattenuto al setaccio 9,5 mm e la percentuale di trattenuto al setaccio 2,36 mm, è indicativo della presenza dell'aggregato di pezzatura intermedia (inferiore a 9,5 mm). Un CF molto elevato è indice di mancanza di pezzatura intermedia mentre un CF basso identifica una miscela con scarsa presenza di aggregato grosso (superiore ad 9,5 mm). Il workability factor rappresenta invece la percentuale di passante al setaccio 2,36 mm e fornisce indicazioni sulla quantità complessiva di aggregato fine, utile per stimare il grado di "mobilità" della miscela durante la fase di posa in opera. Le linee guida americane indicano un valore di CF compreso tra 62 e 75 e un WF compreso tra 29 e 36 per una miscela adatta alla slipform (Zona A della Figura 3).

Va tuttavia tenuto in debita considerazione che tali indicazioni per il proporzionamento degli aggregati non considerano altri fattori che potrebbero influenzare la lavorabilità della miscela, quali ad esempio il contenuto d'aria e l'aggiunta di eventuali additivi chimici di qualsiasi tipo.



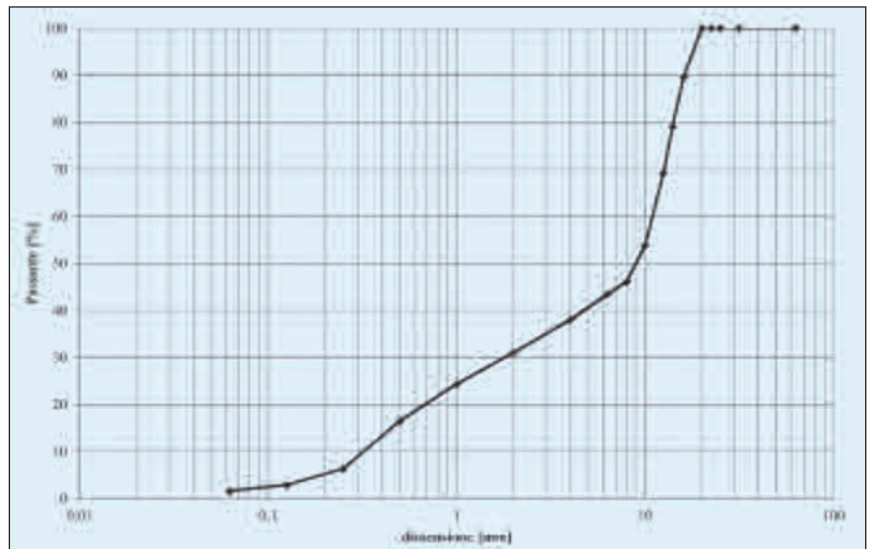
3. Coarseness factor e workability factor per la verifica della granulometria secondo [1]

Nella presente sperimentazione si è adottato aggregato tondeggiante di origine alluvionale consideratane l'abbondante disponibilità nell'Italia settentrionale, luogo della sperimentazione. L'aggregato è stato quindi approvvigionato nelle tre seguenti frazioni granulometriche: sabbia vagliata 0/2, sabbia 0/8 e ghiaietto 8/20 (Figure 4A, 4B e 4C).

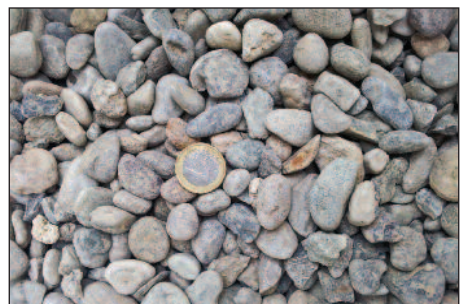
Per la valutazione del contenuto in polveri (filler), la Normativa UNI EN 8520-2:2005 prescrive il limite della percentuale di passante al setaccio da 0,063 mm in funzione del tipo di aggregato. Gli aggregati fini utilizzati per le prove sperimentali rispettano i limiti da Normativa presentando: classe f_3 per la sabbia vagliata 0/2, classe f_{10} per la sabbia 0/8 ma con equivalente in sabbia di 83, classe $f_{1,5}$ per il ghiaietto 8/20.

Il ghiaietto 8/20 ha presentato una classe di resistenza alla frammentazione pari a LA_{25} , idonea anche qualora si ipotizzasse una classe di resistenza $C_{50/60}$ per il calcestruzzo indurito secondo la UNI EN 8520-2, una classe F1 di resistenza al gelo/disgelo e classe WA241 per l'assorbimento (pari a 0,97%) secondo la UNI EN 12620.

Il coarseness factor ed il workability factor, rispettivamente pari a 71 e 32,8, rispettano i limiti consigliati e identificati dalla Zona A di Figura 3. Il modulo di finezza, calcolato con i setacci UNI (UNI EN 12620 annesso B), è risultato pari a 4,8, maggiore del minimo consigliato pari a 2,35. Si riporta in Figura 5 la distribuzione granulometrica definitiva utilizzata.



5. La curva granulometrica sperimentale della miscela per slipform



4A, 4B e 4C. Sabbia vagliata 0-2 mm (4A), sabbia 0-8 mm (4B) e ghiaietto 8-20 mm (4C)

Il cemento

La scelta del cemento da impiegare è solitamente complessa e dipendente da molteplici fattori tra cui si distinguono come principali: la resistenza meccanica del calcestruzzo una volta indurito e la resistenza all'ambiente di esposizione. Il tipo di cemento influenza tuttavia anche il comportamento del calcestruzzo fresco soprattutto nella fase di maturazione.

Il contenuto minimo consigliato per stese mediante slipform è pari a 335 kg/m³ [1] da calibrare poi in funzione delle prestazioni meccaniche richieste anche in funzione del contenuto d'aria per il rispetto della specifica classe di esposizione. A titolo di esempio, la Normativa UNI EN 206 riporta una quantità minima di cemento pari a 340 kg/m³ per un calcestruzzo in classe di esposizione XF4 (soggetto a frequenti cicli di gelo/disgelo e utilizzo di sali disgelanti).

Nel caso di stese mediante slipform, considerati i tempi rapidi di esecuzione e la possibile riapertura al traffico nel breve periodo, si preferisce solitamente utilizzare un cemento di tipo R con sviluppo "rapido" delle resistenze.

Tale aspetto è particolarmente importante anche per il taglio dei giunti di contrazione tra lastre adiacenti che avviene solitamente entro le 24 ore dal getto e con resistenze già in parte sviluppate (circa 18-20 MPa), tali da assicurare la corretta riuscita del taglio.

Il cemento utilizzato nella presente sperimentazione è del tipo CEM II/A-LL 42.5 R in quantità pari a 390 kg/m³.

Le additivazioni

In tutti i tipi di calcestruzzo ed in particolare per l'utilizzo mediante slipform, il corretto proporzionamento degli additivi chimici costituisce condizione necessaria per la riuscita dell'applicazione. Una miscela può essere infatti profondamente modificata a seguito dell'aggiunta o meno di un determinato additivo durante la fase di mescolamento.

I più comuni additivi chimici possibilmente utilizzabili nelle miscele di calcestruzzo per slipform sono gli aeranti, i ritardanti di presa e gli acceleranti, i fluidificanti e super-fluidificanti. In particolare, gli aeranti (aumento delle micro-bolle d'aria e conseguente resistenza al gelo/disgelo) e i fluidificanti (miglioramento della lavorabilità) rappresentano quelli comunemente più utilizzati.

I ritardanti (o anche gli acceleranti) di presa vengono utilizzati in condizioni climatiche particolari (stese con temperature ambiente elevate) e/o lunghe distanze di trasporto. Oltre a questi principali esistono altri additivi chimici, eventualmente anche incorporati ai precedenti come prodotto unico, per fornire specifiche funzioni alla miscela di calcestruzzo; tra questi gli shrinkage-reducing admixture con funzione di anti-ritiro igrometrico, i tensioattivi per la stabilizzazione delle micro bolle d'aria che ne impediscono la coalescenza o quelli con funzione disperdente-viscosizzante per prevenire



6A, 6B e 6C. Additivo super-fluidificante (6A), additivo aerante (6B) e fibre in polipropilene (6C)

la flocculazione dei granuli di cemento consentendone una migliore dispersione in acqua.

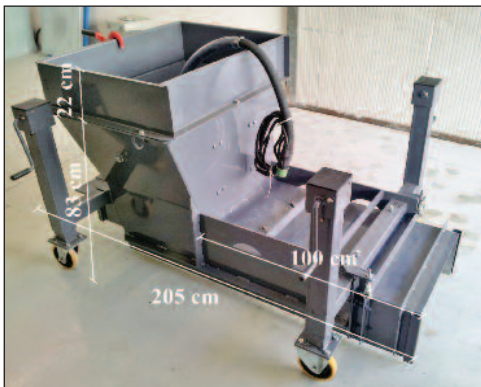
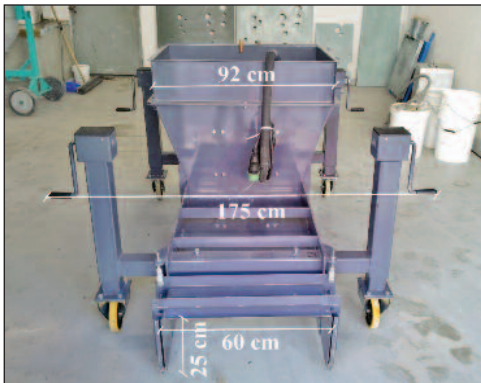
Nel presente studio sono stati utilizzati additivi aeranti a base di acidi resinici saponificati e super-fluidificanti; questi ultimi con funzioni anti-ritiro a base di polimeri policarbossilici per ridurre l'effetto del ritiro igrometrico e mantenere al contempo una corretta lavorabilità in fase di stesa.

Per il miglioramento delle proprietà del calcestruzzo fresco e indurito sono state aggiunte all'impasto micro-fibre in polipropilene fibrillato di lunghezza pari a 6 mm. La presenza della fibra incrementa la tixotropia della miscela garantendo la stabilità dei profili estrusi e riducendo le fessurazioni allo stato plastico del calcestruzzo.

La mini slipform sperimentale "PoliMi"

Per la verifica in vera grandezza dell'idoneità delle miscele di calcestruzzo alla stesa mediante slipform è stato scelto, con esemplare sinergia delle parti coinvolte, di costruire una macchina sperimentale unica nel suo genere che potesse simulare una slipform in scala, la mini slipform "PoliMi". Tale macchinario ha permesso di ridurre notevolmente i costi del materiale e della manodopera necessaria ma anche lo spazio per lo smaltimento del calcestruzzo, una volta indurito e testato. Si sottolinea come la costruzione della mini slipform abbia permesso l'esecuzione di prove di qualificazione del materiale fortemente innovative nel panorama internazionale della ricerca sulle pavimentazioni rigide; esempi simili, ma con peculiarità di semplificazione troppo estreme per poter rappresentare la situazione reale anche solo in parte, erano stati sviluppati dall'Università dell'Iowa nel 2005 [4]. Un set di prove completo effettuato con il cassero sperimentale può infatti fornire importanti informazioni circa la reologia del calcestruzzo in fase di estrusione facilitandone la comprensione, prima della messa in opera in cantiere. Il cassero in acciaio comprende, oltre alla cassaforma vera e propria a forma di L, anche quattro supporti laterali dotati di ruote che ne permettono l'avanzamento e la regolazione dell'altezza da terra. Le dimensioni sono quelle indicate nelle Figure 7A e 7B e la massa complessiva a vuoto è pari a circa 400 kg.

È composto da una tramoggia per l'accumulo del materiale (fino a 0,63 m³) con l'ulteriore funzione di dare stabilità al cassero contrastando la spinta verticale del calcestruzzo sulla cassaforma. Nella parte orizzontale, il cassero è lungo 100 cm e in questa zona sono stati praticati due fori superficiali



7A e 7B. La mini slipform "PoliMI"

8A, 8B, 8C e 8D. Alcuni particolari della mini slipform

per evitare fenomeni di vuoto che possano generare strappi e difficoltà nell'estrusione. In uno dei due lati interni, il cassero è sagomato per la simulazione del giunto di costruzione.

La sezione della lastra estrusa misura 60 cm in larghezza e 25 cm di spessore. La movimentazione della mini slipform è affidata a un verricello posto nella parte anteriore che tira in avanzamento il cassero e permette la regolazione della velocità di estrusione. Al fine della buona riuscita del processo di estrusione, la velocità media di avanzamento di una slipform reale solitamente varia nel range 0,5-1,5 m/min; un avanzamento pari a 1 m/min è stato mantenuto costante durante la presente sperimentazione. La vibrazione del calcestruzzo fresco è effettuata per mezzo di un vibratore ad ago del diametro pari a 66 mm e capace di 12.000 vpm (200 Hz), con caratteristiche del tutto simili a quello di una slipform in vera grandezza. Montato in posizione inclinata di circa 30° sull'orizzontale ma con possibilità di variare l'inclinazione, il vibratore sporge al di sotto del bordo superiore del cassero per poco più di $\frac{3}{4}$ del diametro della testa. L'area di influenza di un vibratore ad ago è, da letteratura tecnica, circa pari a 10 volte il suo diametro (nel caso in esame 660 mm) e di conseguenza sufficiente a coprire tutta la sezione del cassero (pari a 60 cm); si fa tuttavia notare come l'intensità di vibrazione decresca con la distanza dal vibratore.

Il numero, la posizione e la tipologia di vibrator può comunque essere facilmente modificato in funzione delle specifiche esigenze di sperimentazione. L'approvvigionamento di calcestruzzo è effettuato in continuo da un'autobetoniera posta lateralmente al cassero sperimentale, in direzione parallela al senso di avanzamento. Considerate le dimensioni geometriche, 1 m³ di calcestruzzo produce una lastra estrusa di circa 6 m di lunghezza.

Conclusioni

Il prossimo fascicolo presenterà nel dettaglio la campagna sperimentale con mini-slipform PoliMI, i risultati ottenuti da prove sui materiali e la valutazione delle stese di diverse miscele per slipform. In particolare, attraverso prove su calcestruzzo fresco e indurito, sia in laboratorio che in sito, verranno identificati alcuni parametri della miscela utili a definirne l'idoneità per uso slipform.

* *Professore Ordinario di Strade, Ferrovie ed Aeroporti del Politecnico di Milano*

** *Ricercatore del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - D.I.C.A. Infrastrutture di Trasporto e Geoscienze del Politecnico di Milano*

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano esprimere il più vivo e sentito ringraziamento alle Aziende Tecnochem Italiana SpA, Impresa Bacchi Srl e Wirtgen Macchine Srl per il fondamentale contributo dato allo svolgimento della ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. AFCEC, Engineering Technical Letter (ETL) 97-5 - "Proportioning Concrete Mixtures with Graded Aggregates for Rigid Airfield Pavements", 1997.
- [2]. D. Frentress, J. Grothaus - "Minnesota Concrete Flatwork Specifications", Minnesota LTAP, 2014.
- [3]. "Concrete Pavement Mixture Design and Analysis (MDA) - Guide Specifications for Highway Concrete Pavements: Commentary", National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, 2012.
- [4]. "Application for Slipform Paving: Phase I e II", Iowa State University, Self-Consolidating Concrete, Rapporto finale, Novembre 2005.