

Filler Effect of Fly Ash: Particle Packing Theory

Effetto fillerizzante della cenere volante: Teoria del Particle Packing

A. Pasqualini¹, M. Bressan¹, F. M. Liberatore³

¹ *Engineering Division, General Admixtures S.p.A., Treviso, Italy*

² *Civil Engineer, Vasto (CH), Italy*

ABSTRACT: High-performance, highly sustainable concretes made by optimising the Portland cement content by adding a mineral such as fly ash. The benefits afforded by this material are not only based on its marked pozzolanicity index but also on its excellent filler-providing capacity. In fact, the fly ash micro-particles contribute in reducing the inter-particle spaces found in the concrete matrix. This phenomenon, at the base of the well-known particle packing theory, contributes towards reducing the quantity of cement paste needed to confer a particular degree of workability to the concrete. By partially replacing cement and/or sand with fly ash significantly reduces the overall need of water in concrete, with a resulting improvement in its mechanical and durable properties. In this work, after a brief reference to the essential concepts of Particle Packing, Water Film Thickness and Specific Surface, results will be presented of two experimentations that were conducted on cement mortar with the aim of correlating the increased density of the particles in the cement matrices and the reduced amount of water required through the fly ash content used. / Calcestruzzi ad alte prestazioni con elevato contenuto di sostenibilità possono essere realizzati ottimizzando il contenuto di cemento Portland con una aggiunta minerale quale la cenere volante. I benefici apportati da questo materiale sono dovuti non solo alla sua spiccata pozzolanicità, ma anche alla sua elevata capacità fillerizzante. Le micro-particelle di cenere volante contribuiscono, infatti, alla riduzione dei vuoti interparticellari presenti nella matrice cementizia. Questo fenomeno, alla base della nota particle packing theory, contribuisce a ridurre il quantitativo di pasta cementizia necessaria a conferire una determinata lavorabilità al calcestruzzo. L'impiego della cenere volante, in parziale sostituzione del cemento e/o della sabbia, riduce significativamente la richiesta di acqua complessiva del calcestruzzo, con conseguente miglioramento delle sue proprietà meccaniche e di durabilità. Nel presente lavoro, dopo un breve richiamo ai concetti essenziali di Particle Packing, Water Film Thickness e Superficie Specifica, vengono presentati i risultati di due sperimentazioni condotte su malte di cemento con lo scopo di correlare l'aumento della densità particellare nelle matrici cementizie e la riduzione della richiesta di acqua con il contenuto di cenere volante impiegato.

KEYWORDS: particle packing; water film thickness; specific surface; fly ash / densità di impacchettamento; "water film thickness"; superficie specifica; cenere volante

1 INTRODUZIONE

Le diverse prestazioni richieste ad un calcestruzzo in termini reologici, meccanici e di durabilità possono essere garantite attraverso un razionale proporzionamento dei singoli costituenti: cemento, aggregati, aggiunte supplementari ed acqua.

Le procedure utilizzate per la progettazione di conglomerati cementizi, pur basandosi su regole fondamentali scritte da pionieristici ricercatori quali Abrams (correlazione tra resistenza meccanica a compressione e rapporto acqua/cemento) o Lyse (correlazione tra acqua di impasto, lavorabilità e tipologia di aggregato impiegato), hanno subito numerose evoluzioni negli anni.

L'ottimizzazione delle miscele è prima di tutto un problema di "impacchettamento" delle particelle costituenti, negli ultimi anni tenuto in debita conside-

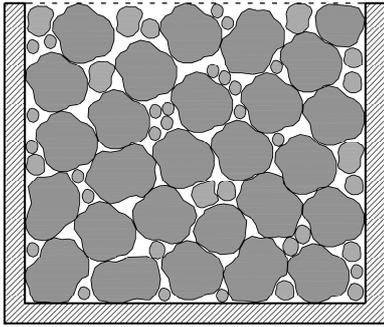
razione attraverso l'adozione di curve di distribuzione granulometrica "ideali".

I più recenti metodi di mix-design, spesso volti alla realizzazione dei cosiddetti "green concrete", ovvero calcestruzzi a ridotto impatto ambientale, si basano su tre concetti relativamente nuovi:

- Teoria dell'impacchettamento ("Particle Packing")
- "Water Film Thickness" (WFT) e "Paste Film Thickness" (PFT)
- Superficie Specifica

Il concetto principale su cui si basa la teoria del "Particle Packing" è la densità di impacchettamento "Packing Density" (PD). Con riferimento allo schema riportato in Figura 1, PD è definita semplicemente come il rapporto tra il volume occupato dai solidi costituenti un aggregato di particelle ed il volume complessivo del recipiente che li contiene.

L'applicazione di tale concetto al calcestruzzo risulta naturale alla luce della natura "particellare" di quest'ultimo.

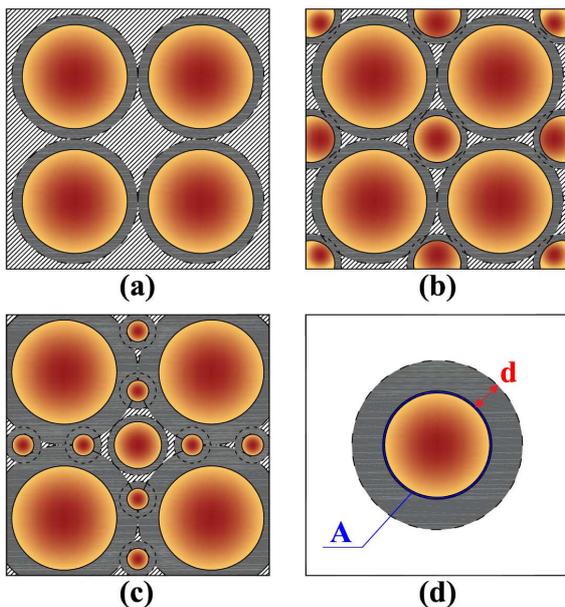


$$PD = \frac{V_{\text{SOLIDI}}}{V_{\text{TOTALE}}}$$

Figure 1. Particle density concept/ Concetto di densità particellare.

La massimizzazione di questo parametro comporta una riduzione dei vuoti interparticellari riempiti dalla pasta di cemento, la quale ha il compito di lubrificare l'aggregato di particelle e dotarlo di "mobilità".

Ridurre i vuoti significa ottimizzare il quantitativo di pasta (e quindi di cemento) necessaria per garantire una determinata lavorabilità del sistema



(Figura 2).

Figure 2. Particle packing, Paste film thickness "d" (d) and specific surface "A" (d)/ Densità particellare, Paste Film Thickness "d" (d) e Superficie Specifica "A" (d)

In Figura 2a viene schematizzato un sistema particellare costituito da elementi di dimensione uniforme.

Il volume dei vuoti viene riempito dalla pasta di cemento la quale assume un duplice ruolo:

- Rivestire il singolo granulo con uno spessore correlabile alla lavorabilità del sistema: maggiore è tale spessore e maggiore risulterà la capacità del sistema di particelle di scorrere.
- Occupare i vuoti rimanenti.

Allo spessore in questione sono correlati i concetti di "Water Film Thickness" (WFT) e "Paste Film Thickness" (PFT). In sostanza, dato un sistema avente densità particellare PD, il volume di vuoti sarà pari a $v = 1 - PD$. Introducendo un determinato quantitativo di acqua W nel sistema, una parte di essa andrà a saturare completamente i vuoti, e la rimanente in eccesso si distribuirà in forma di film sulla superficie delle singole particelle. Nello specifico, WFT è dato dal rapporto tra l'acqua in eccesso (rispetto a quella utile a riempire i vuoti) e la superficie dei granuli. È stato dimostrato come lo spessore di tale film abbia una rilevante influenza sulla reologia del sistema. Del tutto analogo è il concetto di "Paste Film Thickness", per il quale si ragiona in termini di pasta piuttosto che di acqua, dove per "pasta" si intende l'insieme costituito dall'acqua e dalle particelle con dimensione fino a 75 μm . Maggiori spessori di WFT e PFT sono quindi associati a malte o calcestruzzi aventi lavorabilità maggiori.

In Figura 2b è stato schematizzato l'inserimento di una ulteriore classe granulometrica avente dimensioni minori di quella inizialmente presente in Figura 2a. La densità di impacchettamento risulta aumentata, per la minore presenza di vuoti. È possibile quindi, riducendo il contenuto di pasta (e quindi ottimizzando la quantità di cemento) mantenere inalterato lo spessore PFT e quindi la lavorabilità del sistema. In alternativa, dopo l'inserimento della nuova classe granulometrica e quindi l'aumento della densità particellare, si può scegliere di lasciare inalterato il volume di pasta. Il risultato di questo è schematizzato in Figura 2c: lo spessore PFT (e quindi anche WFT) è aumentato e con esso la lavorabilità del sistema.

Risulta chiaro quindi come i concetti di "Particle Packing", "Water Film Thickness", "Paste Film Thickness" e Superficie Specifica siano dipendenti fra loro e influenzino la reologia di un sistema.

È evidente quindi come anche la superficie specifica delle particelle abbia un ruolo essenziale. A parità di acqua (o di pasta), riducendo il valore della superficie specifica, lo spessore WFT (o di PFT) aumenta e con esso la lavorabilità del sistema.

2 EFFETTO FILLERIZZANTE DELLA CENERE VOLANTE

I concetti ora esposti possono essere utilmente impiegati per evidenziare il comportamento fillerizzante della cenere volante nelle malte e nelle miscele di calcestruzzo. La peculiare distribuzione granulometrica delle sue particelle sferiche contribuiscono all'addensamento particellare sia a livello della sabbia (particelle più grandi) che del cemento (particelle più piccole). Ne risulta un effetto fillerizzante (Figura 3) su larga scala che, per quanto introdotto in precedenza, favorisce una riduzione della richiesta di acqua di impasto.

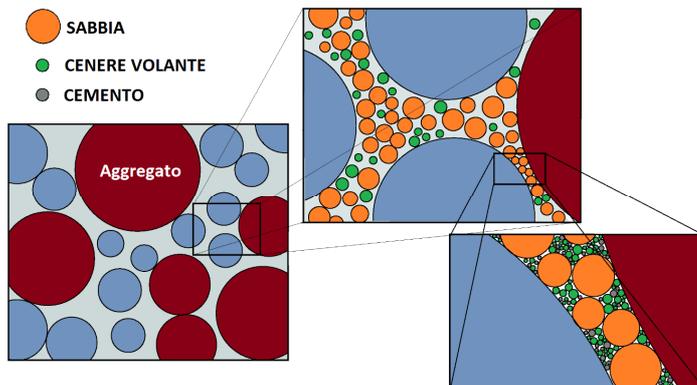


Figure 3. Filler effect of fly ash / Effetto fillerizzante della cenere volante

In merito alla riduzione della richiesta di acqua di impasto è opportuno fare una considerazione. L'introduzione, in miscele di calcestruzzo, di cenere volante in parziale sostituzione della sabbia porta inevitabilmente ad un aumento della superficie specifica complessiva del sistema. Tuttavia, sperimentalmente è stato verificato che anche questa modalità di impiego determina, in generale, una riduzione della richiesta d'acqua di impasto. Questa apparente contraddizione, ben nota in letteratura (Collepari, 1991), è dovuta al fatto che quando le particelle diventano molto piccole (inferiori a circa $300 \mu\text{m}$), ad un aumento della superficie specifica non corrisponde più un aumento della richiesta di acqua di impasto. Ciò dipende dal fatto che un aumento di particelle finissime comporta, entro certi limiti, un miglioramento della lavorabilità senza un necessario incremento di acqua. Si vuole inoltre ricordare che la forma sferica delle particelle di cenere determina una minimizzazione dell'incremento di superficie specifica.

3 SCOPO DEL LAVORO

Il presente lavoro ha avuto come scopo quello di evidenziare l'effetto fillerizzante "su larga scala" della cenere volante, così come descritto nel paragrafo precedente. Per fare questo sono state condotte due diverse sperimentazioni al fine di cogliere tale effetto sia nel range dimensionale delle sabbie che in quello, più piccolo, del cemento.

Allo scopo, sono stati utilizzati due approcci differenti.

3.1 Effetto fillerizzante a livello della sabbia. Sperimentazione 1

Sono state confezionate malte di cemento nelle quali diversi volumi di sabbia sono stati sostituiti con identici volumi di cenere volante, lasciando invariati i quantitativi di cemento ed acqua di impasto. Su que-

ste malte sono state effettuate le seguenti prove di laboratorio:

- Preliminare misura della densità in mucchio (bulk density) delle miscele Sabbia-Cenere nei diversi rapporti
- Valutazione della fluidità delle malte realizzate con le diverse combinazioni Sabbia-Cenere di cui sopra, e quantità costanti di cemento ed acqua efficace
- Resistenza a compressione delle malte ad 1 giorno di stagionatura.

Sulla base di quanto introdotto all'inizio della memoria, in presenza di effetto fillerizzante della cenere volante nei confronti della sabbia, i risultati attesi erano i seguenti:

- Nelle miscele Sabbia-Cenere volante, sostituendo parzialmente la sabbia con la cenere si sarebbe dovuto riscontrare un progressivo incremento della densità in mucchio (effetto dell'impacchettamento delle particelle).
- Lavorando a parità di acqua di impasto (efficace), ad un incremento della densità di impacchettamento sarebbe dovuto corrispondere un incremento della lavorabilità della malta
- A causa di un maggiore addensamento della matrice cementizia, la resistenza a compressione sarebbe dovuta aumentare pur lavorando a parità di rapporto acqua/cemento. Lavorando con una aggiunta pozzolanica, tuttavia, la resistenza a compressione poteva subire incrementi a causa della reazione pozzolanica. Per questo motivo, si è scelto di valutare tale prestazione appena dopo un giorno dal confezionamento delle malte, quando la reazione pozzolanica è inattiva o appena agli esordi.

3.2 Effetto fillerizzante a livello del cemento. Sperimentazione 2

Sono state confezionate malte nelle quali diversi volumi di cemento sono stati sostituiti con identici volumi di cenere volante. I quantitativi di sabbia ed acqua di impasto sono stati lasciati inalterati. Su queste malte sono state effettuate le seguenti prove di laboratorio:

- Preliminare misura della densità in mucchio delle miscele Cemento-Cenere nei diversi rapporti
- Valutazione della fluidità delle malte realizzate con le diverse combinazioni Cemento-Cenere di cui sopra, e quantità costanti di sabbia ed acqua efficace

Anche in questo caso, in presenza di effetto fillerizzante della cenere volante nei confronti del cemento si sarebbero dovuti ottenere i seguenti risultati:

- Nelle miscele Cemento-Cenere volante, sostituendo parzialmente il cemento con la cenere si sarebbe dovuto riscontrare un progressivo incremento della densità in mucchio
- Lavorando a parità di acqua di impasto (efficace), ad un incremento della densità di impacchettamento sarebbe dovuto corrispondere un incremento della lavorabilità della malta

4 METODI DI PROVA

4.1 Densità in mucchio e "particle density"

Un recipiente di volume noto (1 dm^3), preliminarmente pesato (tara) è stato riempito con la generica miscela (Sabbia-Cenere e Cemento-Cenere) in tre strati. Ciascuno dei tre strati è stato costipato mediante vibrazione per un tempo di 60 secondi.

Al termine del riempimento si è proceduto a livellare la parte superiore del recipiente e quindi a pesare quest'ultimo (Figura 4).



Figure 4. Determination of bulk density / Determinazione della densità in mucchio

Per ciascuna miscela, note le percentuali volumetriche dei costituenti nonché le masse volumiche effettive, è stato possibile valutare il valore della densità di impacchettamento, come rapporto tra il volume dei solidi ed il volume del recipiente.

4.2 Lavorabilità delle malte

La lavorabilità delle malte è stata valutata in termini di spandimento e la prova è stata condotta con riferimento alla procedura descritta nella UNI EN 1015-3.

4.3 Resistenza a compressione

Le prove sono state condotte con riferimento alla procedura descritta dalla UNI EN 197-1



Figure 5. Determination of workability of mortars (UNI EN 1015-3)/ Determinazione della lavorabilità delle malte (UNI EN 1015-3)

5 LAVORO SPERIMENTALE

5.1 Materiali

È stato utilizzato un cemento tipo CEM II/A-LL 42.5 R e cenere volante di produzione italiana (Micro-Pozz PFA di General Admixtures S.p.A.).

Al fine di limitare al massimo la variabilità della sabbia, in tutte le prove è stato fatto uso di sabbia normalizzata usualmente destinata al confezionamento delle malte di cemento.

5.2 Miscele testate

In Tabella 1 si riportano le composizioni delle malte utilizzate in merito alla Sperimentazione 1 di cui al punto 3.1.

Table 1. Composition of tested mortars (Experimentation 1) / Composizione delle malte testate (Sperimentazione 1)

Malta	Cemento	Acqua Efficace	a/c	Sabbia *	Cenere volante
	[g]	[g]	[-]	[% vol.]	[% vol.]
S1 - 1	450	225	0.5	100	0
S1 - 2	450	225	0.5	92.5	7.5
S1 - 3	450	225	0.5	85.0	15.0
S1 - 4	450	225	0.5	77.5	22.5
S1 - 5	450	225	0.5	70.0	30.0

* Contenuto di sabbia nella miscela S1-1 pari a 1350 g

In Tabella 2 si riportano le composizioni delle malte utilizzate in merito alla Sperimentazione 2 di cui al punto 3.2.

Table 2. Composition of tested mortars (Experimentation 2) /
Composizione delle malte testate (Sperimentazione 2)

Malta	Sabbia	Acqua Efficace	Cemento *	Cenere volante
	[g]	[g]	[% vol.]	[% vol.]
S2 - 1	1350	225	100	0
S2 - 2	1350	225	80	20
S2 - 3	1350	225	60	40
S2 - 4	1350	225	40	60
S2 - 5	1350	225	20	80

* Contenuto di cemento nella miscela S2-1 pari a 450 g

5.3 Risultati delle prove

In Tabella 3 si riportano i risultati delle prove descritte al punto 3.1 e relative alle miscele di cui alla Tabella 1.

Table 3. Test results (Experimentation 1) / Risultati delle prove (Sperimentazione 1)

Malta	Particle Density *	Spandimento	Resistenza a compressione (1 giorno)
	[-]	[%]	[N/mm ²]
S1 - 1	0.693	55	16.55
S1 - 2	0.719	70	17.91
S1 - 3	0.729	60	18.44
S1 - 4	0.725	45	18.60
S1 - 5	0.697	35	17.60

* Relativa solo alla combinazione Sabbia-Cenere volante

In Tabella 4 si riportano i risultati delle prove descritte al punto 3.2 e relative alle miscele di cui alla Tabella 2.

Table 4. Test results (Experimentation 2) / Risultati delle prove (Sperimentazione 2)

Malta	Particle Density *	Spandimento
	[-]	[%]
S2 - 1	0.539	80
S2 - 2	0.547	90
S2 - 3	0.556	110
S2 - 4	0.566	120
S2 - 5	0.577	130
PFA**	0.590	-

* Relativa solo alla combinazione Cemento-Cenere volante

** 100% Cenere volante. Prova considerata come riferimento ai fini della determinazione della "Particle Density" della sola cenere volante

5.4 Discussione dei risultati

Le due sperimentazioni condotte hanno sostanzialmente confermato le aspettative ed evidenziato la capacità fillerizzante della cenere volante, sia nel range dimensionale proprio della sabbia che in quello caratteristico del cemento.

Relativamente alla Sperimentazione 1 (vedi punto 3.1) infatti, la densità in mucchio della sola sabbia (Prova S1-1) è risultata pari a 0,693. Sostituendo volumi crescenti di sabbia con identici volumi di cenere, la massa volumica in mucchio del sistema è risultata sempre maggiore. Questo risultato evidenzia la capacità delle particelle di cenere di allocarsi negli spazi compresi tra i granuli di sabbia ed aumentare quindi la densità particellare. Le misure di fluidità mostrano un aumento della lavorabilità, ovvero una riduzione della richiesta di acqua di impasto, fino a sostituzioni di sabbia con cenere volante in ragione del 15% in volume. Superata tale percentuale, si riscontra una riduzione di lavorabilità, ovvero una maggiore richiesta di acqua. Probabilmente, superata la percentuale del 15% in volume, l'aumento della superficie specifica complessiva è predominante sull'effetto fillerizzante (che pur continua ad esserci, in base ai valori della densità di impacchettamento PD) e la miscela richiede maggiore acqua di impasto. La maggiore densità della matrice cementizia ha portato anche ad un beneficio in termini di resistenza a compressione. A parità di rapporto acqua/cemento, infatti, tutte le miscele confezionate con cenere volante in parziale sostituzione della sabbia mostrano una resistenza a compressione maggiore rispetto alla miscela con solo sabbia. Chiaramente, pur avendo condotto le prove ad 1 giorno di stagionatura, non si esclude la possibilità che il risultato possa essere stato influenzato, seppure in minima parte, dall'avvio della reazione pozzolanica. In ogni caso, i risultati relativi alle tre tipologie di prova condotte sono coerenti l'uno con l'altro. In Figura 6 si riporta un utile confronto grafico dei risultati ottenuti.

Il confronto tra le tre grandezze in esame evidenzia come, partendo dalla miscela con solo sabbia l'aggiunta di percentuali di cenere volante crescenti determini un effetto fillerizzante evidenziato miglioramento di tutti i parametri.

In corrispondenza di una percentuale di cenere pari a circa il 15%, il trend della densità particellare e della resistenza a compressione sembrano mostrare un massimo per poi iniziare a scendere, rimanendo, tuttavia, sempre superiori ai valori corrispondenti alla miscela di riferimento.

In corrispondenza della percentuale di cui sopra, anche la richiesta di acqua comincia ad aumentare rispetto alla miscela di riferimento.

Il risultato quindi evidenzia l'esistenza di una percentuale massima di cenere volante da non superare per poter trarre i massimi benefici dall'azione fillerizzante da parte di quest'ultima.

C'è da ritenere che tale percentuale dipenda dalle caratteristiche della sabbia utilizzata.

Probabilmente con una sabbia più scabra, e quindi con più vuoti intergranulari, la percentuale massima ottimale di cenere sarà maggiore rispetto al caso di una sabbia fine. L'ipotesi è tuttavia da verificare con ulteriori verifiche sperimentali.

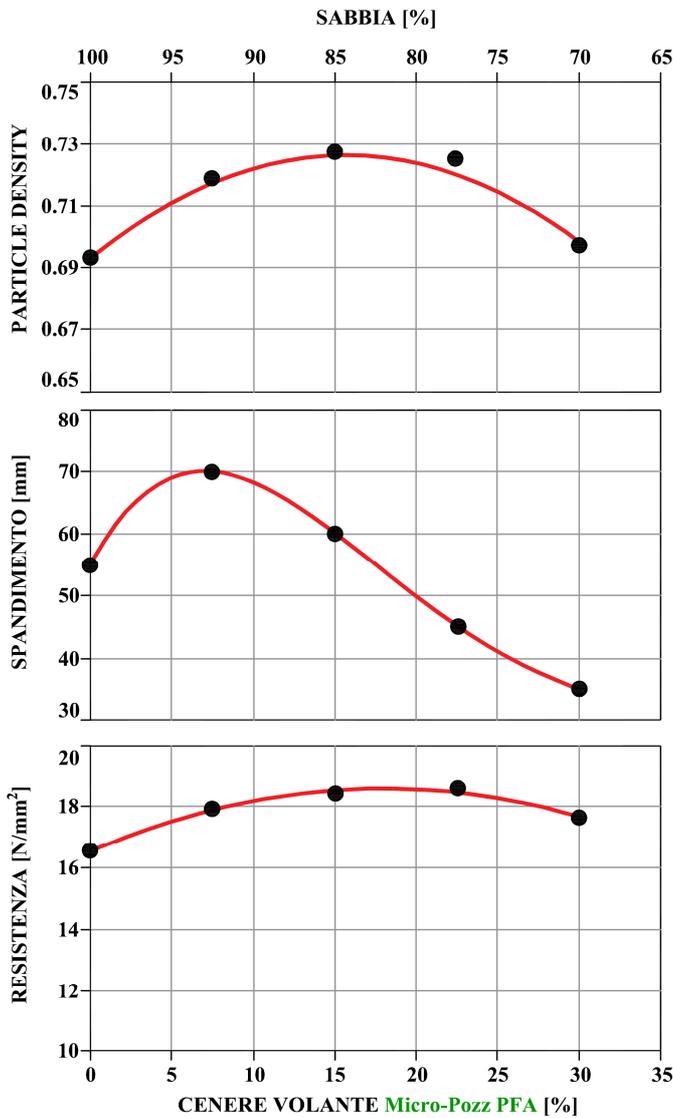


Figure 6. Test results (Experimentation 1) / Risultati delle prove (Sperimentazione 1)

Si vuole osservare che la percentuale riscontrata è rilevante se si pensa che in un calcestruzzo ordinario il contenuto di sabbia varia normalmente tra gli 800 ed i 1000 kg per metro cubo.

Con riferimento a questi quantitativi di sabbia, la percentuale del 15% (in volume) prima discussa si traduce in quantitativi di cenere volante dell'ordine di 100 – 120 kg/m³ (in parziale sostituzione della sabbia).

Passando alla Sperimentazione 2 (vedi punto 3.2), i risultati delle prove evidenziano la presenza di un rilevante effetto fillerizzante a livello della scala dimensionale propria del cemento.

La densità particellare di miscele Cemento-Cenere aumenta sempre all'aumentare del contenuto di cenere volante. Si osserva inoltre che la sola cenere volante (prova PFA di Tabella 4) mostra, rispetto al solo cemento, una densità di impacchettamento superiore.

Il risultato, dovuto probabilmente alla particolare forma e distribuzione granulometrica della cenere volante, è tuttavia da verificare con altre tipologie di

cementi (variando ad esempio la finezza di macinazione).

Molto interessante appare il risultato in termini di spandimento delle malte (Figura 7).

La sostituzione parziale di cemento con percentuali crescenti di cenere determina sempre un aumento della lavorabilità della malta (e quindi una riduzione della richiesta di acqua).

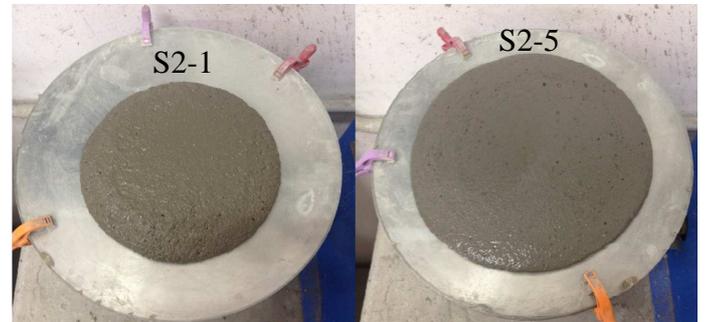


Figure 7. Workability test for S2-1 and S2-5 mixes/ Prova di spandimento per le miscele S2-1 e S2-2

Il risultato appare coerente e compatibile con le attese in quanto è facilmente spiegabile dal fatto che nella sostituzione cemento-cenere il valore della superficie specifica del legante si riduce notevolmente in quanto le particelle di cemento, notoriamente di forma irregolare, vengono sostituite con le particelle di cenere che invece hanno forma sferica (minima superficie).

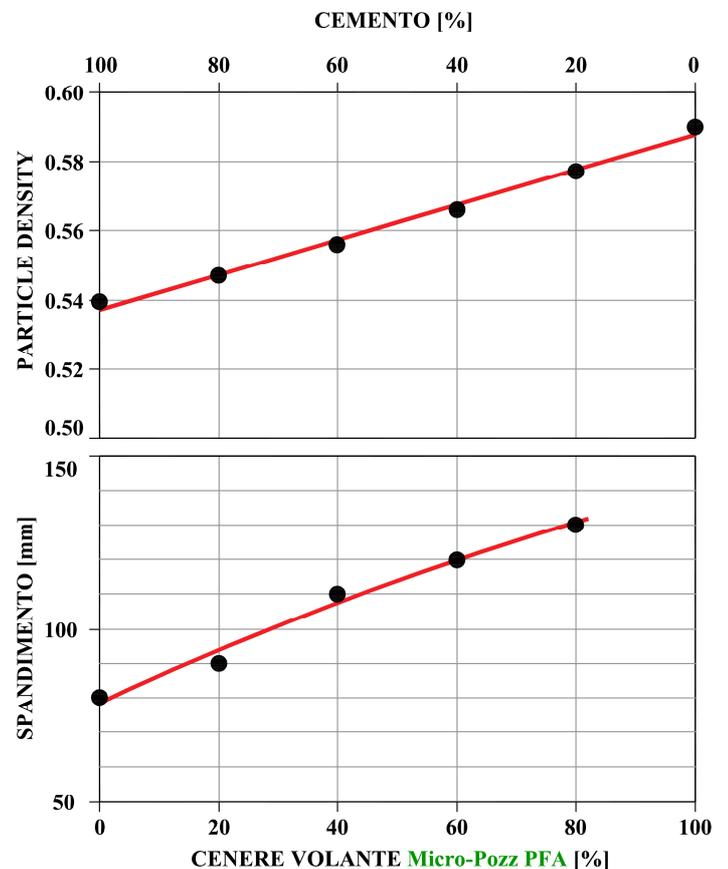


Figure 8. Test results (Experimentation 2) / Risultati delle prove (Sperimentazione 2)

6 CONCLUSIONI

Experimental tests conducted on mortars have highlighted the filler-providing capacity of fly ash, at the dimensional levels of both sand and cement.

The partial replacement of sand with increasing ash content has determined:

- Increased particle density
- Reduced requirement for water in the mixture
- Improved mechanical performances at the same water/cement ratio

The partial replacement of cement with increased ash content has determined:

- Increased particle density
- Reduced requirement for water in the mixture

The results obtained are totally compatible with the effects normally recorded when fly ash is used in preparing the concrete, both in partial replacement of cement according to the UNI EN 206-1 procedures and in partial replacement or integration of sand.

Prove sperimentali condotte su malte hanno messo in evidenza la capacità fillerizzante della cenere volante, sia ai livelli dimensionali di una sabbia che di un cemento.

La parziale sostituzione della sabbia con tenori crescenti di cenere volante ha determinato:

- Incremento della densità particellare (“Particle Density”)
- Riduzione della richiesta di acqua di impasto
- Incremento delle prestazioni meccaniche a parità di rapporto acqua/cemento

La parziale sostituzione di cemento con tenori crescenti di cenere volante ha determinato:

- Incremento della densità particellare
- Riduzione della richiesta di acqua di impasto

I risultati ottenuti sono del tutto compatibili con gli effetti che normalmente si riscontrano quando la cenere volante viene utilizzata nel confezionamento del calcestruzzo, sia in parziale sostituzione del cemento secondo le procedure della UNI EN 206-1 che in parziale sostituzione della sabbia.

REFERENCES

Collepari, M., 1991. *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, Milano: Hoepli