



HIGH PERFORMANCE SHOTCRETE

P. ZAFFARONI, C. PISTOLESI, E. DAL NEGRO*, L. COPPOLA**, M. COLLEPARDI***

E' stata studiata una combinazione di additivi chimici ed aggiunte minerali per produrre nuovi calcestruzzi ad alte prestazioni proiettati (High Performance Shotcrete: HPS) mediante il processo per via umida. Alcuni calcestruzzi confezionati con additivo superfluidificante a bassa perdita di lavorabilità (slump compreso tra 210 e 220 mm) con un rapporto acqua-cemento variabile nell'intervallo 0.42-0.44 sono stati proiettati per via umida mediante una macchina spruzzatrice. E' stato, inoltre, utilizzato fumo di silice nella misura di 20 kg/m³ al fine di ridurre il rimbalzo degli aggregati durante l'operazione di spruzzo oltre che per migliorare l'aderenza del calcestruzzo al substrato in roccia.

Sono stati utilizzati un cemento pozzolanico ed un cemento d'altoforno (450 kg/m³) al fine di confezionare dei calcestruzzi durevoli, sebbene questi tipi di cemento non posseggano prestazioni confrontabili con quelle del cemento portland relativamente allo sviluppo di resistenza alle brevi stagionature.

In corrispondenza dell'ugello della pistola spruzzatrice sono stati aggiunti degli additivi acceleranti di presa tradizionali a base di silicati di sodio e dei nuovi additivi chimici privi di alcali; le prestazioni dei calcestruzzi proiettati sono state valutate mediante delle prove di campo consistenti nell'applicazione a spruzzo sulle pareti in roccia di una galleria sotterranea.

I risultati ottenuti hanno evidenziato che gli additivi acceleranti a base di silicati alcalini (impiegati in misura del 12% sul peso del cemento) posseggono prestazioni migliori rispetto agli additivi privi di alcali (impiegati in misura del 7%) in termini di resistenza alle brevissime stagionature coincidenti con 20-60 minuti dopo la proiezione degli impasti. Tuttavia, già a 4 ore ed alle stagionature successive la resistenza a compressione dei calcestruzzi proiettati confezionati con gli additivi privi di alcali ha subito un incremento decisamente superiore rispetto a quello registrato per i corrispondenti impasti additivati con il silicato di sodio.

La resistenza a compressione misurata su provini cilindrici ottenuti per carotaggio dal rivestimento in calcestruzzo spruzzato sulla parete di roccia è risultata variabile nell'intervallo 2-6 MPa a 4 ore, 12-15 MPa a 12 ore, 20-25 MPa ad 1 giorno, 45-50 MPa a 7 giorni e 50-60 MPa a 28 giorni per gli impasti additivati con accelerante di presa *alkali-free*. I valori di resistenza meccanica a compressione di questi calcestruzzi spruzzati ad alte prestazioni nel periodo di tempo compreso tra 1 e 28 giorni successivi alla messa in opera è risultata del 5-10% inferiore rispetto ai valori conseguiti dal calcestruzzo di riferimento confezionato senza l'impiego dell'accelerante di presa, gettato e costipato "a rifiuto" entro cassero. Per contro, la resistenza a compressione a 28 giorni dei provini di calcestruzzo ottenuti per carotaggio dal rivestimento applicato sulla parete di roccia e additivato con sodio silicato è ri-

A combination of chemical and mineral admixtures was studied to manufacture new High Performance Shotcretes (HPS) by wet-mix process. Superplasticized low-slump-loss concretes (slump of 210 - 220 mm) with water-cement ratios in the range of 0.42 - 0.44 were treated by wet-mix guns. Silica fume (20 Kg/m³) was used to reduce the rebound of aggregates and improve the bond to the substrate.

Pozzolanic or slag cements (450 Kg/m³) were used to manufacture durable concretes, although these cements do not perform as well as portland cements in attaining high early strength.

Traditional accelerators based on sodium silicate and new alkali-free chemical admixtures were added at the nozzle and assessed through field tests for shotcrete applications in a tunnel.

Alkali silicate-based accelerators (12% by cement mass) performed slightly better than alkali-free chemical admixtures (7%) in terms of very early strength at 20-60 min. However, at 4 hours and later ages compressive strength of shotcretes with the alkali-free accelerator increased much more than in the corresponding mixtures with sodium silicate.

Compressive strength of cored cylinder specimens were 2-6 MPa at 4 hr, 12-15 MPa at 12 hr, 20-25 MPa at 1 day, 45-50 MPa at 7 days and 50-60 MPa at 28 days when the alkali-free accelerator was used. The compressive strength values of these HPS at 1-28 days were 5-10% less than the corresponding control concrete specimens, without accelerators, cast in forms. On the other hand, the 28-day compressive strength values of cored specimens for shotcretes treated with sodium silicate were, as usually, 50-60% less than the corresponding control concretes.

INTRODUCTION

According to the definition of American Concrete Institute [1] shotcrete is "mortar or concrete pneumatically projected at high velocity onto a surface". These are two different types of shotcrete: dry-mix and wet-mix. In the dry-mix procedure all ingredients except the water are mixed, and then the dry mixture is blown through the delivery hose in a stream of compressed air to the nozzle, where the water is added. In the wet-mix procedure, all ingredients including the water are combined in the mixer, and the resulting wet mixture is propelled to the nozzle where a blast of compressed air impels it on to the receiving surface [2].

Due to the difference in the water requirements between these two

*Mapei Spa, Milano, Italia

** Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV), Italia

*** Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Università di Ancona, Italia

sultata generalmente inferiore del 50-60% rispetto ai valori misurati per il calcestruzzo di riferimento (non additivato e gettato entro cassero).

INTRODUZIONE

In accordo alla definizione fornita dall'American Concrete Institute [1] per *shotcrete* si intende "una malta o un calcestruzzo proiettati pneumaticamente ad alta velocità contro una superficie". Ci sono due differenti tipologie di *shotcrete*: la prima si basa sul processo per via secca e la seconda su quello per via umida. Nel processo per via secca tutti gli ingredienti, ad eccezione dell'acqua, vengono preventivamente mescolati; successivamente la miscela secca viene inviata mediante aria compressa in corrispondenza dell'ugello della pistola dove viene aggiunta l'acqua. Nella procedura per via umida, invece, tutti gli ingredienti, inclusa l'acqua di impasto, vengono aggiunti nel miscelatore e la risultante miscela umida viene convogliata verso l'ugello dove, mediante aria compressa, viene spruzzata sulla superficie atta a riceverla [2].

A causa della differenza nella richiesta di acqua tra questi due processi, il rapporto acqua-cemento (*a/c*) dello *shotcrete* prodotto per via umida è generalmente più alto del corrispondente valore che si ottiene per l'impasto prodotto per via secca. Questo, di solito, determina una maggiore porosità, una maggiore permeabilità, un più elevato ritiro igrometrico, una minore resistenza meccanica e nel contempo una più bassa durabilità dello *shotcrete* prodotto per via umida rispetto ad un impasto proiettato per via secca [2].

Negli ultimi anni, grazie all'impiego combinato di superfluidificanti e fumo di silice, sono stati sviluppati degli *shotcrete* proiettati per via umida con delle eccellenti qualità adesive che rendono questi impasti di particolare interesse per il ripristino ed il consolidamento di strutture in calcestruzzo [3]. Morgan [4] ha analizzato i nuovi sviluppi nel settore del calcestruzzo proiettato mostrando diversi esempi di ripristini effettuati con la tecnica dello *shotcrete* per via umida in Nord America. Tuttavia, quando per svariate ragioni occorre introdurre nell'impasto un additivo accelerante di presa le prestazioni in servizio, in termini di resistenza meccanica a compressione, vengono significativamente ridotte (all'incirca del 50-60%) rispetto all'impasto confezionato senza additivo accelerante. Inoltre, i tradizionali acceleranti a base di silicato di sodio o di alluminio e carbonato di sodio aumentano il rischio di causticità per gli operatori durante l'applicazione dello *shotcrete*.

Il principale obiettivo del presente lavoro, pertanto, è stato

processes, the water-cement ratio (*w/c*) of the wet-mix shotcrete is in general higher than that of its corresponding dry-mix composition. This results in greater porosity, permeability, drying-shrinkage, lower strength, and durability of the wet-mix shotcrete with respect to that of properly applied dry-mix composition [2].

More recently, due to the combined use of superplasticizer and silica fume, wet-mix shotcretes have been developed with superior adhesive quality which makes them well suited for repair and rehabilitation of concrete structures by the wet-mix shotcreting process [3]. Morgan [4] has reviewed new developments in shotcreting with several examples of shotcrete repair of infrastructures in North America. However, when for some reasons accelerating admixtures are used, the performance in service, in terms of compressive strength, is significantly reduced (by 50-60%) with respect to the control mixture without accelerator. Moreover, the traditional accelerators based on sodium silicate, aluminate and carbonate increase the causticity risk for the workers during the application of the shotcrete.

The purpose of the present work was to study the combined action of superplasticizer, silica fume, accelerator, and blended pozzolanic or slag-portland cement to produce high-performance shotcrete (HPS) by wet-mix process in terms of the following characteristics:

- low causticity risk during application
- high workability and low slump-loss
- low rebound
- high early and later strength
- high durability

MATERIALS

Cements: High-strength portland cements are in general preferred rather than blended cements for shotcrete process due to the faster cement hydration rate. Blended cements in form of pozzolanic or granulated blast furnace slag (GBFS) cements were used in the present work for their better performance in service in terms of higher durability, lower heat of hydration, and lower vulnerability to cracking from thermal, autogeneous, and drying shrinkage stresses [3]. Pozzolanic cement (CEM IV/A 42,5 R according to the European Norm EN 197/1) with 35% of fly ash replacing portland cement was used. Granulated blast furnace slag cement (CEM III/A 42.5 according to the European EN 197/1) with 50% slag replacing portland cement was also used.

Silica fume: Densified silica fume was used to improve the bond to the substrate and reduce the rebound of aggregates. Table 1 shows the chemical composition of silica fume.

Superplasticizer: A commercial 30% aqueous solution of carboxylic acrylic ester (CAE) was used as superplasticizer to

quello di studiare l'azione combinata di additivi superfluidificanti, fumo di silice, acceleranti di presa e cementi pozzolanici o d'altoforno per produrre dei conglomerati ad alte prestazioni proiettati mediante il processo per via umida che fossero caratterizzati dalle seguenti proprietà:

- basso rischio di causticità durante la lavorazione dell'impasto e la successiva proiezione sulla superficie atta a riceverlo;
- elevata lavorabilità e ridotta perdita di slump;
- basso indice di rimbalzo;
- elevata resistenza sia a breve che a lungo termine;
- elevata durabilità.

MATERIALI

Cementi: i cementi portland ad alta resistenza sono generalmente preferiti ai cementi di miscela nella realizzazione di impasti da mettere in opera mediante proiezione grazie alla maggiore velocità di idratazione che li contraddistingue. I cementi di miscela, in forma di cementi pozzolanici o d'altoforno, sono stati utilizzati nella presente ricerca per le loro migliori prestazioni in servizio in termini di una maggiore durabilità, di un più basso sviluppo del calore di idratazione ed anche per una minore vulnerabilità a fessurarsi per effetto delle tensioni indotte dall'impedimento alle deformazioni di tipo termico e di tipo igrometrico sia di tipo autogeno che di tipo idraulico [3]. È stato utilizzato un cemento pozzolanico con 35% di cenere volante in sostituzione del clinker di cemento portland (CE IV/A 42.5 R in accordo alla Norma Europea 197 parte 1^a). Inoltre, è stato utilizzato un cemento d'altoforno (CEM III/A 42.5 R) con 50% di loppa in sostituzione del clinker di cemento portland.

Fumo di silice: è stato utilizzato il fumo di silice con l'intento di migliorare l'aderenza del calcestruzzo proiettato al substrato e, quindi, di ridurre il rimbalzo degli aggregati.

Superfluidificante: è stato impiegato un additivo superfluidificante di tipo acrilico in forma di una soluzione al 30% di polimero attivo con l'intento di produrre dei calcestruzzi fluidi e superfluidi con uno slump di 210-220 mm ed un rapporto acqua-cemento all'incirca di 0.42-0.44. Maggiori dettagli sulla composizione chimica di questi superfluidificanti si possono trovare nei lavori bibliografici [5] e [6].

Acceleranti di presa: sono stati impiegati due differenti tipologie di acceleranti di presa disponibili commercialmente. Un additivo accelerante tradizionale basato su una soluzione acquosa di silicato di sodio (36% di polimero attivo) ed un nuovo additivo accelerante privo di alcali basato su una emulsione acquosa di solfato di alluminio (60%). Grazie all'assenza di alcali l'impiego

manufacture fluid concretes with a slump of 210-220 mm and a water-cement ratio (w/c) as low as 0.42-0.44. More details on the chemical composition of this superplasticizer were published in previous works [5, 6].

Accelerators: Two different types of commercial accelerating admixtures were used. A traditional shotcrete accelerator based on sodium silicate aqueous solution (36%) and a new alkali-free shotcrete accelerator based on a water emulsion of aluminium sulfate (60%) were used. Due to the absence of alkali there is a lower risk of causticity during application when the latter is used.

Aggregates: Three natural limestone in form of fine sand (0-4 mm), coarse sand (4-6 mm) and gravel (6-8 mm) were used by adopting the following percentages: 65, 30, and 5% respectively.

Concrete mixtures: Two basic control mixtures were manufactured, both without accelerators, the main difference being the cement type (pozzolan cement CEM IV/A 42.5 and slag cement CEM III/A 42.5).

Table 1 shows the composition and the slump of the two fluid control mixtures before the addition of the accelerators.

For each basic concrete after 30 min of mixing, one or two different types of accelerator were added at the nozzle: sodium silicate admixture or alkali-free accelerator at a dosage of 8-12% or 6-7% by cement mass respectively.

METHODS

The following measurements were carried out:

– **Slump** at 5 and 30 minutes to assess the slump-loss behavior before the addition of the accelerators.

– **Rebound** was determined, after tunnel lining operations in the absence of reinforcing, by measuring the percentage of shotcrete which ricochets off the receiving surface and falls to the ground with respect to the total amount of projected concrete.

– **Specific gravity** (g_w) of control concrete specimens (without accelerators) placed into forms and fully compacted, and specific gravity (g) of cored specimens from shotcretes with accelerating admixtures: g/g_w indicates the compaction degree of the shotcrete with respect to the corresponding concrete without accelerator, fully compacted according to the traditional methods.

– **Proctor penetrometer test** (needle of 9 mm in diameter) on placed shotcretes (5 min-60 min) and determination of the very early compressive strength through calibration curves.

– **Piston tool Hilti method** developed by Kusterle [7] to determine the early compressive strength (2-15 MPa) of placed shotcretes (4-12 hr);

di questi additivi consente di ridurre il rischio di causticità durante la preparazione e la successiva proiezione degli impasti.

Aggregati: sono state impiegate tre diverse pezzature di aggregati calcarei in forma di sabbia fine (0-4 mm), sabbia grossolana (4-6 mm) e ghiaietto (6-8 mm) utilizzati rispettivamente nelle seguenti percentuali: 65, 30 e 5%.

Impasti: sono stati confezionati due impasti di riferimento, entrambi senza additivo accelerante, con i due cementi prescelti (pozzolanico CEM IV/A 42.5 e d'altoforno CEM III/A 42.5). La Tabella 1 mostra la composizione e le caratteristiche reologiche dei due impasti di riferimento prima dell'aggiunta degli additivi acceleranti. Per ognuno di questi impasti dopo 30 minuti dalla miscelazione l'additivo accelerante di presa è stato aggiunto all'ugello della pistola: l'additivo accelerante a base di silicato di sodio è stato impiegato in misura variabile tra l'8 ed il 12% rispetto alla massa del cemento; l'additivo accelerante *alkali-free*, invece, è stato impiegato in misura del 6-7% rispetto alla massa del cemento.

METODOLOGIE SPERIMENTALI

Sono state effettuate le seguenti misurazioni:

– **Slump** dopo 5 e 30 minuti con l'intento di valutare l'eventuale perdita di lavorabilità prima dell'aggiunta degli additivi acceleranti.

– **Rimbalzo:** è stato determinato misurando la percentuale di calcestruzzo proiettato che cadeva sul terreno rispetto al quantitativo totale di calcestruzzo proiettato contro la parete della roccia.

– **Grado di compattazione:** è stata determinata la massa volumica (g_0) del calcestruzzo di riferimento (senza accelerante) gettato all'interno di una cassaforma e compattato a rifiuto; inoltre, è stata determinata la massa volumica (g) dei provini di calcestruzzo ottenuti per carotaggio dal calcestruzzo proiettato contenente l'additivo accelerante prelevato direttamente dalla parete di roccia: il rapporto g/g_0 fornisce il grado di compattazione dello *shotcrete* rispetto al corrispondente calcestruzzo senza accelerante compattato a rifiuto in accordo con le tecniche tradizionali di posa in opera.

– **Test penetrometrico di Proctor** (ago con diametro di 9 mm): la prova consiste nell'introdurre la sonda di Proctor negli *shotcrete* posti in opera; la misura veniva effettuata nel periodo compreso tra 5 e 60 minuti seguenti alla proiezione dell'impasto ed aveva come obiettivo quello di determinare, attraverso delle opportune curve di taratura, la resistenza a compressione del calcestruzzo proiettato alle brevissime stagionature.

COMPOSIZIONE E PROPRIETA' REOLOGICHE DEGLI IMPASTI DI RIFERIMENTO PRIMA DELL'AGGIUNTA DELL'ADDITIVO ACCELERANTE DI PRESA/COMPOSITION AND SLUMP OF THE CONTROL MIXTURES BEFORE THE ADDITION OF THE ACCELERATORS AT THE NOZZLE

Ingredienti/ <i>Ingredient</i>	Calcestruzzo P con cemento pozzolanico <i>Concrete P</i> with pozzolanic cement (IV/A 42.5)	Calcestruzzo S con cemento d'altoforno <i>Concrete S</i> with GBFS cement (III/A 42.5)
Cemento/ <i>Cement</i>	450 Kg/m ³	450 Kg/m ³
Sabbia fine/ <i>Fine sand</i> (0-4 mm)	1075	1075
Sabbia grossolana <i>Coarse sand</i> (4-6 mm)	495	495
Ghiaia/ <i>Gravel</i> (6-8 mm)	82	82
Fumo di silice/ <i>Silica fume</i>	20	20
Acqua/ <i>Water</i>	198	190
Superfluidificante <i>Superplasticizer</i> (1-2% by cem.)	5.4	5.4
<i>a/c - w/c</i>	0.44	0.42
Slump		
	5 min	210
	30 min	200
		220
		215

– **Compressive strength at 1-28 days of cored shotcretes** (100 mm high, 50 mm in diameter) with accelerators added at the nozzle;

– **Compressive strength at 1-28 days of cored control concretes** (100 mm high, 50 mm in diameter), without accelerators, placed and fully compacted into prismatic forms.

RESULTS

Due to the use of the CAE type superplasticizer [5, 6] the slump loss within 30 min is negligible before the addition of the accelerators at the nozzle (Table 1). This means that the productivity of the

– **Pistola Hilti:** il metodo, che si basa sull'impiego della pistola Hilti sviluppata da Kusterle [7], consente di determinare la resistenza a compressione (compresa tra 2 e 15 MPa) del calcestruzzo proiettato del rivestimento nel periodo compreso tra le 4 e le 12 ore successive alla messa in opera del conglomerato.

– La resistenza meccanica a compressione da 1 a 28 giorni di carote di calcestruzzo (100 mm di altezza e 50 mm di diametro) confezionato con l'accelerante aggiunto in corrispondenza dell'ugello.

– La resistenza meccanica a compressione da 1 a 28 giorni di carote del calcestruzzo di riferimento (100 mm di altezza, 50 mm di diametro), senza accelerante di presa, gettato in opera e compattato a rifiuto entro delle forme prismatiche.

RISULTATI

Grazie all'impiego del superfluidificante di tipo acrilico [5, 6] la perdita di lavorabilità dopo 30 minuti dal confezionamento dell'impasto è risultata irrilevante prima dell'aggiunta dell'accelerante (Tabella 1). L'eccellente mantenimento della lavorabilità ha consentito di ottenere una elevata produttività dello *shotcrete* che ha raggiunto all'incirca i 20 m³/h.

A parità di dosaggio dell'additivo superfluidificante (1.2%) il rapporto *a/c* è leggermente più basso (0.42 contro 0.44) per il calcestruzzo confezionato con il cemento d'altoforno rispetto al conglomerato prodotto con il cemento pozzolanico, sebbene lo *slump* iniziale fosse leggermente più alto (220 contro 210 mm) per il calcestruzzo con cemento d'altoforno.

Nelle operazioni di realizzazione del rivestimento in galleria, dove non vi è presente alcuna armatura, il rimbalzo di tutti gli *shotcrete* studiati è stato molto basso (all'incirca pari al 2-3%) grazie all'elevata coesione dell'impasto dovuta alla presenza contemporanea del superfluidificante, del fumo di silice e dell'accelerante di presa.

La Fig. 1 mostra in una doppia scala logaritmica la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo misurata dopo 5 minuti e fino a 28 giorni dall'operazione di spruzzo, del conglomerato prodotto con il cemento d'altoforno (Tabella 1) confezionato senza accelerante, con accelerante a base di silicato di sodio (8 e 12%) ed infine con l'accelerante di presa del tipo *alkali-free* aggiunto in misura del 6%. L'accelerante a base di silicato di sodio è leggermente migliore rispetto all'additivo *alkali-free* in termini di resistenza alla brevissima stagionatura: ad esempio, dopo un'ora la resistenza a compressione è pari a 0.5 MPa per il calcestruzzo additivato con il silicato e a 0.2 MPa per l'accelerante privo di alcali. Tuttavia, già a 4 ore i due ac-

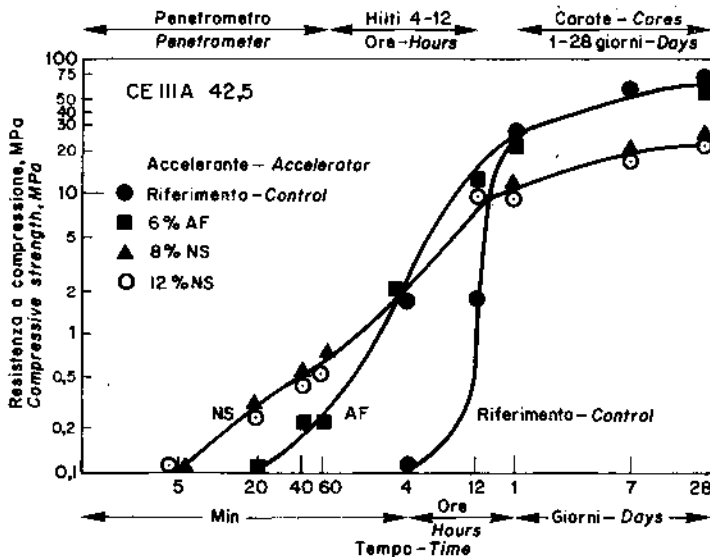


Fig. 1 - Influenza degli acceleranti di presa a base di sodio silicato o *alkali-free* sulla resistenza a compressione di calcestruzzi proiettati confezionati con cemento d'altoforno III/A 42.5.

Fig. 1 - Influence of accelerators sodium silicate (NS) or *alkali-free* (AF) on the compressive strength of the *shotcrete* with slag cement III/A 42.5.

shotcrete can be as high as 20 m³/hr due the workability of the pumped concrete feeding the spraying equipment in a reliable manner for the negligible *slump-loss*.

At a given superplasticizer dosage (1.2%), the *w/c* is a little lower (0.42 vs. 0.44) for the concrete with slag-cement than for that with pozzolanitic cement, although the initial *slump* was slightly higher (220 vs. 210 mm) for the former.

In tunnel lining operations with no reinforcing the rebound of all *shotcretes* studied was as little as 2-3% due to the high cohesiveness of the mixture for the combined presence of superplasticizer, silica fume, and accelerators.

Fig. 1 shows in a double-logarithmic scale the concrete compressive strength, measured at 5 min to 28 days after *shotcreting*, on the slag-cement concrete (Table 1) manufactured without accelerator, with sodium silicate (8 and 12%), and with *alkali-free* accelerator 6%. The sodium silicate accelerator is a little better than the *alkali-free* admixture in terms of very early compressive strength: for instance at 1 hr the compressive strength is 0.5 MPa with the silicate admixture and 0.2 MPa with the *alkali-free* accelerator. However, at 4 hr the two accelerators perform the same, and at 23 hr and later ages the *alkali-free* accelerator perform much better than the silicate admixture. For instance, the 28 day compressive strength of the

celeranti si comportano allo stesso modo ed alle 24 ore, nonché alle stagionature successive, l'accelerante *alkali-free* si comporta molto meglio rispetto all'additivo a base di silicato di sodio. Per esempio, la resistenza a compressione a 28 giorni dello *shotcrete* confezionato con l'accelerante *alkali-free* è all'incirca di 60 MPa. Questo valore è soltanto il 10% più basso rispetto a quello del calcestruzzo di riferimento non additivato, mentre, la corrispondente perdita di resistenza dello *shotcrete* confezionato con il silicato di sodio è all'incirca il 60% di quella del calcestruzzo di riferimento non additivato.

Gli eccellenti risultati garantiti dall'accelerante *alkali-free* in termini di resistenza alle lunghe stagionature è stata confermata dall'utilizzo di un più alto dosaggio dell'additivo (7%) sia nel calcestruzzo confezionato con cemento d'altoforno (Fig. 2) che nell'impasto confezionato con cemento pozzolanico (Fig. 3). Di nuovo, la perdita di resistenza alle lunghe stagionature è impercettibile, soltanto il 10%, rispetto alle normali riduzioni di resistenza causate dai tradizionali acceleranti basati sull'impiego del silicato di sodio, di alluminato o carbonato di sodio [8].

Con l'intento di spiegare il differente ruolo giocato dagli acceleranti a base di silicato di sodio e quello invece determinato dall'aggiunta degli acceleranti *alkali-free* sull'idratazione del

shotcrete with the *alkali-free* accelerator is as high as 60 MPa (only 10% less than the control mixture), whereas the corresponding strength loss of the *shotcrete* with silicate is 60% less than that of the control concrete.

The excellent results of the *alkali-free* accelerators in terms of the strength at later ages were confirmed by using a little higher dosage of the admixture (7%) both in the slag-cement concrete (Fig. 2) and in pozzolanic-cement mixture (Fig. 3). Again, the strength loss at later ages is negligible (only 10%) with respect to the usual strength reduction caused by the traditional accelerators based on sodium silicate, aluminate or carbonate [8].

In order to explain the different role played by sodium silicate accelerators and *alkali-free* admixtures, the strength loss at 28 days with respect to the control mixtures were compared with the corresponding expected values on the basis of the lower compaction degree determined by the specific gravity ratio g/g_0 . It is known [9] that for each 1% of lower specific gravity there is a compressive strength reduction of about 5-6% for the voids caused by the lower compaction. Therefore a compaction degree of 0.94 in terms of g/g_0 in the 12% silicate *shotcrete* (Table 2) should correspond to an expected strength loss of 30-36%. This is much lower than that (55%) measured at 28 days on the silicate *shotcrete* in service with respect

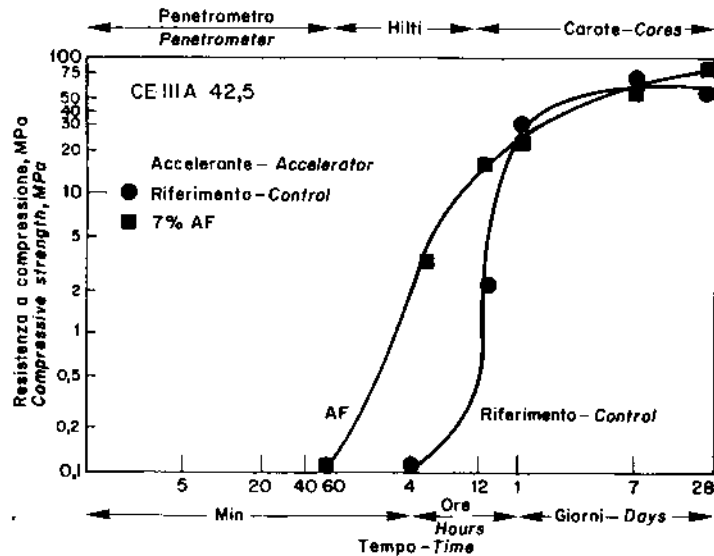


Fig. 2 - Influenza dell'additivo accelerante *alkali-free* sulla resistenza a compressione di calcestruzzi confezionati con cemento d'altoforno CE III/A 42.5.
Fig. 2 - Influence of the *alkali-free* (AF) accelerator on the compressive strength of the shotcrete with slag cement III/A 42.5.

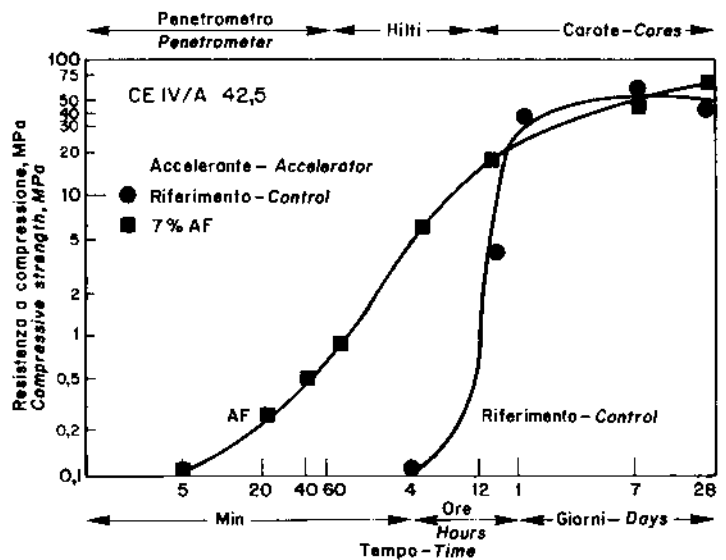


Fig. 3 - Influenza dell'additivo accelerante *alkali-free* sulla resistenza a compressione di calcestruzzi confezionati con cemento pozzolanico CE IV/A 42.5.
Fig. 3 - Influence of the *alkali-free* (AF) accelerator on the compressive strength of the shotcrete with pozzolanic cement IV/A 42.5.

cemento, la perdita di resistenza a 28 giorni rispetto all'imposto di riferimento è stata confrontata con la perdita attesa per la minore compattazione del calcestruzzo proiettato del rivestimento rispetto ad un calcestruzzo gettato e compattato a rifiuto entro le forme prismatiche (g/g_0). È ben noto [9] che per ogni 1% di riduzione della massa volumica vi è una corrispondente diminuzione della resistenza meccanica a compressione di circa il 6% a causa delle macroporosità presenti nella matrice cementizia determinate da una compattazione non efficace. Pertanto, ad un grado di compattazione pari a 0.94, in termini di g/g_0 , ottenuto per i calcestruzzi additivati con silicato di sodio aggiunti in misura del 12% (Tabella 2), dovrebbe corrispondere una perdita di resistenza di circa il 36%. Questa perdita di resistenza è molto più bassa di quella (55%) misurata a 28 giorni sulle carote di *shotcrete* a base di silicato di sodio prelevate dal rivestimento in opera rispetto al calcestruzzo di controllo senza additivo e gettato entro le forme e completamente compattato a rifiuto. Questo significa che nel calcestruzzo proiettato del rivestimento, in aggiunta ad una compattazione non completa, la perdita di resistenza potrebbe essere ascritta al minor grado di idratazione, del C_3S e del C_2S del clinker di cemento portland [10] causato dall'aggiunta dell'additivo accelerante di presa a base di silicato di sodio.

D'altra parte in presenza di additivi acceleranti *alkali-free* il grado di compattazione (0.97-0.98) è più alto per la migliore lavorabilità nel momento in cui viene effettuata la proiezione del conglomerato cementizio. Inoltre, la perdita di resistenza a compressione misurata a 28 giorni è uguale o leggermente più bassa rispetto al valore atteso (10-18%) sulla base del più basso grado di compattazione. Questo significa che l'accelerante *alkali-free* non determina alcuna riduzione del grado di idratazione del cemento alle lunghe stagionature. Al contrario, la più bassa perdita di resistenza meccanica a compressione a 28 giorni rispetto al valore atteso basato sulla sola riduzione della massa volumica (Tabella 2) dovrebbe indicare che questo effetto è parzialmente compensato da un più alto grado di idratazione del cemento.

CONCLUSIONI

L'impiego combinato di un additivo superfluidificante a base acrilica, del fumo di silice e di un accelerante di presa *alkali-free* consente di produrre dei conglomerati ad alte prestazioni da mettere in opera mediante proiezione (*High Performance Shotcrete*) caratterizzati da una più alta lavorabilità, una maggiore resistenza meccanica a compressione, un buon grado di compattazione,

INFLUENZA DEGLI ADDITIVI ACCELERANTI DI PRESA A BASE DI SILICATO DI SODIO E ALCALI-FREE SULLA MASSA VOLUMICA DI CALCESTRUZZI PROIETTATI (g) RISPETTO ALLA MASSA VOLUMICA (g_0) DEI CALCESTRUZZI DI RIFERIMENTO (SENZA ADDITIVO) GETTATI E COMPATTATI A RIFIUTO ENTRO CASSEFORME PRISMATICHE/INFLUENCE OF THE SODIUM SILICATE (NS) OR ALKALI-FREE (AF) ACCELERATOR ON THE SPECIFIC GRAVITY OF THE SHOTCRETE (g) WITH RESPECT TO THAT (g_0) OF THE CONTROL CONCRETE WITHOUT ADMIXTURE FULLY COMPACTED

Tipo di cemento Cement type	Accelerante (%-tipo) Accelerator (%-type)	Massa volumica, g /Specific gravity, g (Kg/m^3)	Massa volumica, g_0 /Specific gravity, g_0 (Kg/m^3)	g/g_0	Perdita di resistenza Strength loss (%)	
					Attesa Expect.	Misurata Measur.
III	12 NS	2239	2384	0.94	30-36	55
III	8-NS	2247	2359	0.95	25-30	54
III	7-AF	2300	2359	0.97	15-18	10
IV	7-AF	2296	2336	0.98	10-12	8

to the control concrete without admixture placed in forms and completely compacted. This means that, in addition to an uncomplete compaction, something else must be taken into account to explain the measured strength loss. This could be related to the lower degree of hydration caused by the sodium silicate admixture on the C_3S and C_2S hydration of the clinker phase [10].

On the other hand, in the presence of the alkali-free accelerator the degree of compaction (0.97-0.98) is higher for the better workability at the time of spraying. Moreover, the measured strength loss at 28 days is equal or a little lower with respect to the expected value (10-18%) on the basis of the lower degree of compaction. This means that alkali-free accelerators do not produce any reduction in the degree of hydration at later ages. On the contrary, the lower strength loss at 28 days with respect to the expected value based on the reduction of the compaction degree (Table 2) would indicate that this effect is partly compensated by a higher degree of hydration.

CONCLUSIONS

The combined use of an acrylic superplasticizer, silica fume and

ed una eccellente durabilità conseguenti sia all'adozione di un basso rapporto *a/c* che all'utilizzo di cementi pozzolanici e d'altoforno.

La più bassa perdita di lavorabilità, inoltre, il più basso indice di rimbalzo, il minore rischio di causticità dovuta all'assenza di alcali durante l'applicazione, sono le altre importanti proprietà di questi conglomerati ad alte prestazioni.

an alkali-free accelerator allows to manufacture high performance shotcretes (HPS) in terms of high slump level, high compressive strength, good compaction, and excellent durability for the low w/c and the use of pozzolanic or slag cements with 30 or 50% replacement of portland cement respectively.

Low slump-loss, low rebound, and low causticity risk during application are other important properties of this HPS.

BIBLIOGRAFIA/REFERENCES

- [1] ACI Committee 116, Cement and Concrete Terminology ACI 116R-90, SP-19 (90), American Concrete Institute, Detroit, 1990, p. 54.
- [2] WARNERM J., "Understanding Shotcrete. The Fundamentals", Concrete International, May 1995, pp 59-64.
- [3] MEHTA, P.K., "Advancements in Concrete Technology", Concrete International, June 1999, pp 69-76.
- [4] MORGAN, D.R., "New Developments in Shotcrete of Repair and Rehabilitation", Advances in Concrete Technology, CANMET, Ottawa, 1994, pp 675-720.
- [5] CERULLI, T., COLLEPARDI, M., COPPOLA, L., FERRARI, G., PISTOLESI, C., QUECK, F., AND ZAFFARONI, P., "Zero Slump-Loss Superplasticized Concrete", 18th Conference on Our World of Concrete of Structures, Singapore, 1993, pp 73-79.
- [6] COLLEPARDI, S., COPPOLA, L., TROLI, R., AND COLLEPARDI, M., "Mechanism of Actions of Different Superplasticizers for High Performance Concrete", Proceedings of the Second CANMET/ACI Conference, Gramado (Brazil), pp 503-524.
- [7] KUSTERLE W., "A Combined Method for Determining the Early Strength of Sprayed Concrete" Hilti Operating Instructions.
- [8] MAILVAGANAM, N.P., "Miscellaneous Admixtures", Chapter 15 in "Concrete Admixtures Hand-Book", Editor V.S. Ramachandran, Noyes Publications, Park Ridge, N.Y., USA, pp. 1009-1019
- [9] NEVILLE, A.M., "Properties of Concrete", Fourth Edition, Longman Group Limited, Essex, England, p. 844.
- [10] COLLEPARDI, M., "Concrete Science and Technology" (in Italian), p. 547, Hoepli, Milan, Italy, Third Edition, 1990.