

# **Valutazione delle prestazioni reologiche e meccaniche di calcestruzzi spruzzati per rivestimenti di galleria additivati con acceleranti di presa e rinforzati con fibre di acciaio, vetro e polipropilene**

**Luigi Coppola<sup>(1)</sup>, Alessandra Buoso<sup>(1)</sup>, Franco D'Alessandro<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria, Dalmine (Bergamo)

<sup>(2)</sup> BASF, Construction Chemical C.C., Treviso

## **SOMMARIO**

La memoria concerne l'utilizzo di fibre in acciaio (SF), di vetro (GF) e in polipropilene (PF) per il confezionamento di calcestruzzi e betoncini proiettati (confezionati con un accelerante di presa a base di silicato di sodio) per la realizzazione di rivestimenti per gallerie. La ricerca sperimentale è stata condotta direttamente in cantiere valutando prestazioni reologiche e meccaniche di calcestruzzi spruzzati fibrorinforzati per confronto con quelle del conglomerato di riferimento (senza fibre e accelerante di presa). I risultati sperimentali evidenziano come l'aggiunta delle fibre non ha alcuna influenza sulle proprietà del calcestruzzo allo stato fresco e indurito. La percentuale di materiale che rimbalza durante le operazioni di spruzzaggio sono strettamente legate alla percentuale di additivo accelerante di presa utilizzato piuttosto che al tipo di fibra impiegato. Lo sviluppo delle prestazioni meccaniche dei calcestruzzi è fortemente influenzato sia dall'additivo accelerante di presa che dalla proiezione del conglomerato sulle pareti dello scavo. In particolare, la resistenza meccanica a compressione a brevi stagionature dei calcestruzzi spruzzati additivati con l'accelerante di presa sono maggiori di quelle del conglomerato di riferimento (senza silicato di sodio) gettato e vibrato. Dopo 28 giorni di maturazione, invece, la resistenza a compressione dei calcestruzzi spruzzati accelerati è risultata all'incirca del 45% inferiore rispetto a quella del conglomerato di riferimento senza silicato di sodio, gettato in opera entro cassero e successivamente vibrato. I risultati sperimentali, inoltre, indicano che la resistenza a punzonamento delle piastre di betoncino spruzzato rinforzato con fibre è inferiore rispetto a quella della piastra rinforzata con la tradizionale rete elettrosaldata in acciaio. Questo risultato è da ascrivere alla diminuzione dell'aderenza fibra-matrice come conseguenza dell'aggiunta dell'accelerante di presa. E' presumibile, infatti, che tale diminuzione sia più accentuata per un rinforzo discreto (le fibre), che non per il rinforzo continuo rappresentato dalla rete elettrosaldata. I risultati suggeriscono che per il confezionamento di calcestruzzi spruzzati sarebbe opportuno sostituire l'accelerante di presa a base di silicato sodico con additivi acceleranti che presentino una minore interferenza con il processo di idratazione del cemento.

## **Evaluation of rheological and mechanical properties of fiber reinforced set-accelerated shotcretes for tunnel lining**

### **SUMMARY**

The present paper deals with the use of different types of fibers (steel – SF, glass – GF and polypropylene - PF) to reinforce concretes and shotcretes (manufactured with a sodium silicate based set-accelerating admixture) for tunnel linings in order to compare rheological and mechanical behaviour of set accelerated fiber reinforced mixtures with respect to plain concrete. Tests were carried out directly in the job-site. No influence of fibers was observed on rheological and mechanical properties. Shotcrete rebound was closely related to the dosage of set-accelerating admixture. Strength gain and mechanical properties were strongly influenced by both the casting method and the dosage of set-accelerating product. Early compressive strengths of set-accelerated shotcretes were higher with respect those of plain vibrated concrete. On the other hand, 28-day compressive strengths of fiber reinforced shotcretes containing set-accelerating admixture were about 45% lower of plain mixture without sodium silicate. Furthermore, the test results indicated that punching shear strength of FR mixtures was lower than that of steel mesh reinforced shotcrete without fibers as a consequence of the poor quality of the cement matrix due to the set-accelerator addition. Use of set accelerating admixture reduced the fiber-matrix bond lowering the punching shear strength of FR mixtures. On the other hand, the poor quality of the cement matrix seems to affect less punching shear strength of steel mesh reinforced shotcrete. Results indicate that a replacement of the sodium silicate-based admixture is strictly necessary in order to improve mechanical and durability properties the tunnel linings.

## 1. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo è notoriamente un materiale fragile con una modesta resistenza a trazione e una naturale tendenza a contrarsi per effetto del ritiro idraulico. L'impedimento al ritiro determinato nelle strutture reali dalla presenza di vincoli genera stati coattivi responsabili della fessurazione degli elementi in c.a. [1]. La comparsa di quadri fessurativi nei primi periodi dopo il getto solitamente rappresenta un problema di tipo estetico più che strutturale, anche se le fessure che si generano a causa del ritiro idraulico possono compromettere la funzionalità dell'opera. Ad esempio, nelle pavimentazioni industriali, la presenza di soluzioni di continuità in servizio, per l'azione dei carichi di tipo mobile (su ruota), comporta un rapido sbriciamento dei cigli fessurativi con conseguente compromissione della funzionalità del pavimento. In molte situazioni, inoltre, le fessure possono avere ricadute negative sia per la statica che per la durabilità delle strutture, per la facilità con cui le sostanze aggressive attraverso le soluzioni di continuità, raggiungono le armature corrodendole. Al fine di sopperire a queste carenze prestazionali intrinseche del conglomerato cementizio, nelle strutture in c.a. si fa abitualmente ricorso all'utilizzo di armature di ripartizione – generalmente in forma di reti elettrosaldate o di barre di piccolo diametro e con passo molto ravvicinato. Tuttavia, la presenza dell'armatura lungo direttrici obbligate non sempre riesce a prevenire e, soprattutto, a contenere l'ampiezza delle soluzioni di continuità, in quanto gli stati tensionali indotti da questi fenomeni non agiscono in una sola e ben definita direzione [2]. Perciò, negli ultimi tempi, sta diventando sempre più frequente l'impiego di un rinforzo fibroso discreto inserito nella matrice cementizia. Le fibre, infatti, rispetto alle barre di armatura, si dispongono a guisa di un rinforzo tridimensionale e sono in grado di assorbire le sollecitazioni di trazione indotte negli elementi in qualsiasi direzione limitando così l'ampiezza delle lesioni e aumentando la capacità di dissipare energia resistendo a carichi di tipo impulsivo (urti, scoppi, azioni cicliche, etc.) maggiori [3]. Dagli inizi del '900 ad oggi l'uso delle fibre è in costante aumento. Le prime fibre utilizzate sono state quelle in amianto per produrre lastre prefabbricate. Successivamente, hanno fatto la comparsa sul mercato le fibre in acciaio alla fine degli anni '40 negli Stati Uniti. Poi è stata la volta delle fibre di vetro, quelle organiche (polipropilene, poliacrilonitrile, poliolefiche) provenienti da trattamenti di sintesi e recentemente anche fibre di ghisa, di ottone, ecc.[4]. Attualmente le fibre maggiormente utilizzate come rinforzo nel calcestruzzo sono in acciaio, vetro, polipropilene e poliacrilonitrile.

Negli ultimi anni, in Italia, il calcestruzzo fibrorinforzato ha trovato largo impiego nel settore delle pavimentazioni e dei rivestimenti per galleria (sia realizzati con calcestruzzo proiettato che gettato entro cassero). Stime cautelative (in difetto) indicano per questo tipo di rinforzi un volume complessivo di fatturato che supera i 10 milioni di euro. L'utilizzo di calcestruzzo fibrorinforzato, infatti, consente di avere dei vantaggi sia in termini strutturali, quali la riduzione di ampiezza delle fessure e di conseguenza l'aumento della durabilità, la maggiore resistenza a fatica e ai carichi impulsivi, ma anche la maggiore facilità di esecuzione dei manufatti e degli elementi costruttivi rispetto alla tradizionale tecnologia di realizzazione basata sull'impiego di barre di armatura e/o di reti elettrosaldate [5][6][7].

La progettazione strutturale di elementi in calcestruzzo rinforzato con fibre può essere effettuata ricorrendo alle raccomandazioni emanate dal *fib* (*Fédération Internationale du Béton*) che ha recentemente pubblicato la versione finale del Model Code 2010 in cui sono state inserite due nuove sezioni sui calcestruzzi rinforzati con le fibre (materiali e comportamento strutturale). Inoltre, per quanto concerne l'Italia, è disponibile anche un documento CNR-DT 204 in cui si riportano le istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato.

In questa memoria vengono presentati i risultati di una campagna sperimentale condotta su betoncini fibro-rinforzati - con fibre strutturali metalliche e non - applicati a spruzzo per la realizzazione di rivestimenti per gallerie. Le prove sperimentali sono state condotte, direttamente in cantiere, con l'obiettivo di confrontare le prestazioni reologiche ed elastomeccaniche dei betoncini rinforzati con fibre di diversa natura oltre all'influenza derivante dall'aggiunta dell'accelerante di presa (a base di silicato di sodio) [8].

## 2. METODOLOGIA SPERIMENTALE

### 2.1 Materiali

#### 2.1.1 Cemento

Per il confezionamento dei betoncini è stato utilizzato un cemento Portland al calcare (CEM II/A-LL 42.5R) conforme alla norma UNI EN 197-1, fornito da Italcementi Group S.p.A.. La composizione chimica è riportata in Tabella 1.

Tabella 1 Composizione chimica (% sulla massa) del cemento (CEM II/A-LL 42.5R)

Loss On Ignition (L.O.I.) at 500°C		0.88	
SiO <sub>2</sub>	19.31	MgO	2.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.31	SO <sub>3</sub>	2.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.28	Na <sub>2</sub> O	0.29
TiO <sub>2</sub>	0.14	K <sub>2</sub> O	0.86
CaO	61.08	Cl	0.06

#### 2.1.2 Aggregati

Sono stati utilizzati tre diversi tipi di aggregati:

- Sabbia granita (40% sul peso totale degli aggregati);
- Sabbia frantumata (25%);
- Pietrisco (35%) avente diametro massimo 8mm.

Si riporta in Tabella 2 la distribuzione granulometrica dei singoli aggregati e di quello combinato.

Tabella 2 Analisi granulometrica degli aggregati utilizzati per il confezionamento dei betoncini.

Apertura vaglio (mm)	Percentuale passante cumulativo [%]			
	Sabbia granita (25%)	Sabbia Franta (40%)	Pietrisco (35%)	Totale (100%)
16	100.0	100.0	100.0	100.0
12.5	100.0	100.0	100.0	100.0
8	100.0	100.0	100.0	100.0
4	100.0	99.0	26.0	73.7
2	78.0	87.0	1.7	54.9
1	54.0	69.0	0.5	41.3
0.5	38.0	47.0	0.2	28.4
0.25	25.0	20.0	0.2	14.3
0.063	4.9	1.2	0.2	1.8

### 2.1.3 Additivi

Nel confezionamento dei betoncini è stato utilizzato un additivo superfluidificante acrilico, dosato all'1.4% (rispetto alla massa del cemento).

Prima delle fasi di spruzzaggio, è stato aggiunto un additivo accelerante di presa (silicato di sodio) con un dosaggio che si è attestato nell'intervallo 13-17% circa vs massa del cemento.

### 2.1.4 Fibre

Alla miscela di riferimento, sono stati aggiunti tre tipi di fibre: acciaio, vetro e polipropilene le cui proprietà principali sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3 - Caratteristiche principali delle fibre utilizzate

Sigla	Materiale	Lunghezza (mm)	Diametro (mm)	l/d
SF	Acciaio	33	0.55	60
GF	Vetro	40	1.6	25
PF	Polipropilene	40	0.9	44

I dosaggi delle fibre sono riportati in Tabella 4. Si noti come il dosaggio in volume delle fibre in acciaio ed in vetro sia sostanzialmente coincidente e, conseguentemente, le prestazioni dei calcestruzzi realizzati con queste fibre saranno direttamente confrontabili. Per quanto concerne le fibre in polipropilene, il dosaggio risulta essere di gran lunga inferiore, circa del 34% circa rispetto alle fibre in acciaio e del 39% circa delle fibre in vetro.

Tabella 4 - Dosaggio (sia in volume che in massa) delle fibre e massa volumica degli impasti

Miscela	Natura delle fibre	Massa volumica cls	Dosaggio delle fibre	
		kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>
PL	-	2344	-	-
SF	Acciaio	2394	38.2	4.4
GF	Vetro	2342	11.2	4.7
PF	Polipropilene	2324	3.5	2.9

## 2.2 Mix-design

La sperimentazione ha previsto il confezionamento di betoncini aventi rapporto a/c pari a 0.44 e, per la miscela di riferimento, una lavorabilità iniziale al getto S5 (in accordo alla norma UNI EN 12350-2). Si riporta in Tabella 5 la composizione della miscela di riferimento senza l'aggiunta né di fibre né di additivo accelerante di presa.

## 2.3 Prove sperimentali

Durante le fasi di getto (dopo 1/5 e 4/5 dello scarico della betoniera), ma comunque prima dell'aggiunta dell'additivo accelerante di presa, sono state misurate sugli impasti allo stato fresco la lavorabilità e la massa volumica.

Successivamente è stato aggiunto il silicato di sodio ed il calcestruzzo è stato spruzzato sulle pareti della galleria, misurando lo sfrido (UNI EN 14488-7).

Per valutare le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi fibrorinforzati, sono stati confezionati dei pannelli (UNI EN 14488-1), sia prima che dopo l'aggiunta del silicato di sodio, maturati in condizioni di cantiere, da cui sono state estratte 3 carote (d=100 mm, h=100 mm, h/d=1) per la misura della massa volumica e della resistenza a compressione dopo 1, 7 e

28 giorni. Infine, sono stati confezionati pannelli (600x600mm) di shotcrete fibrorinforzato additivato con il silicato di sodio per valutare l'energia di deformazione, in accordo alla norma UNI EN 14488-5.

Tabella 5 Mix-design e principali caratteristiche della miscela di riferimento.

DOSAGGIO INGREDIENTI		
Cemento CEM II/A-LL 42.5R	kg/m <sup>3</sup>	450
Acqua	kg/m <sup>3</sup>	200
Aggregati:		
Sabbia frantumata	kg/m <sup>3</sup>	410
Sabbia granita	kg/m <sup>3</sup>	650
Pietrisco (D <sub>max</sub> 8 mm)	kg/m <sup>3</sup>	575
Additivo superfluidificante	%	1.4
	l/m <sup>3</sup>	6.3
Aria intrappolata	%	2.5
CARATTERISTICHE		
Acqua/Cemento		0.44
Massa volumica	kg/m <sup>3</sup>	2344

## 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati ottenuti dalla campagna sperimentale riguardano la valutazione delle proprietà reologiche (analisi della massa volumica del fresco, lavorabilità, dosaggio di additivo accelerante e sfrido) e di quelle meccaniche (massa volumica su indurito, resistenza a compressione e punzonamento).

### 3.1 Proprietà reologiche

#### 3.1.1 Massa volumica del calcestruzzo fresco

Si riportano in Figura 1 i valori medi di massa volumica sul fresco misurati durante le fasi di getto (dopo 1/5 e 4/5 dello scarico della betoniera) e prima dell'aggiunta dell'additivo accelerante di presa. Come si può notare non esistono differenze sostanziali tra gli impasti realizzati con le diverse fibre. Pertanto, l'aggiunta delle fibre non determina anomali intrappolamenti di aria.

#### 3.1.2 Lavorabilità

La lavorabilità prefissata (S5 in accordo alla UNI EN 206-1) è stata raggiunta anche negli impasti con l'aggiunta di fibre senza alcuna ulteriore riaggiunta di acqua rispetto all'impasto di riferimento. Inoltre, dopo 45 minuti dal confezionamento la lavorabilità è aumentata o rimasta sostanzialmente invariata rispetto a quella registrata al termine della miscelazione (Figura 2) per tutte le miscele.

#### 3.1.3 Additivo accelerante di presa e sfrido

Il dosaggio di additivo accelerante di presa (silicato di sodio) si è attestato nell'intervallo 13-17% circa (Figura 3): maggiore per l'impasto contenente fibre di vetro e minore per quello con fibre di acciaio. L'aggiunta del silicato di sodio nell'impasto di riferimento è circa uguale a quella utilizzata per l'impasto con le fibre in polipropilene (circa il 15%).

Lo sfrido si è attestato tra il 18 e il 35% circa (Figura 3) e risulta essere estremamente diverso per i vari tipi di miscela: maggiore con le fibre in acciaio e minore con quelle di vetro. Dai risultati ottenuti sembra, quindi, emergere chiaramente come la percentuale di materiale rimbalzato durante la prova

di proiezione dei betoncini sia esclusivamente influenzata dal dosaggio di additivo accelerante e non dal tipo né dal dosaggio di fibre aggiunte. Sembra, infatti, esistere una proporzionalità indiretta tra dosaggio di accelerante e sfrido: maggiore è il dosaggio di accelerante e minore risulta lo sfrido.

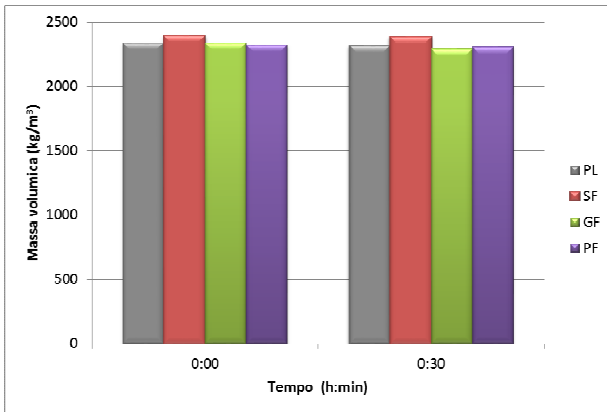


Figura 1: Massa volumica allo stato fresco

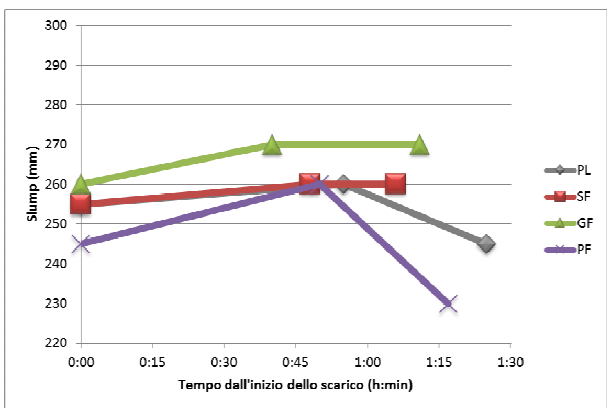


Figura 2: Lavorabilità nel tempo

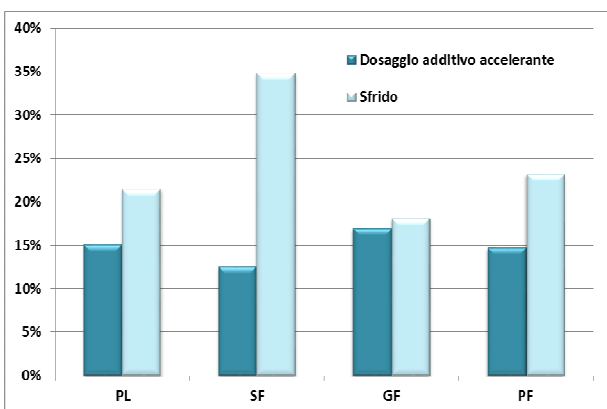


Figura 3: Dosaggio di additivo accelerante di presa e sfrido

### 3.2 Proprietà meccaniche del calcestruzzo

#### 3.2.1 Massa volumica su indurito

L'aggiunta dell'additivo accelerante di presa e le operazioni di spruzzaggio determinano inevitabilmente una riduzione della massa volumica che si attesta in un intervallo tra il 2 e il 6% rispetto al valore determinato sull'impasto di riferimento senza silicato di sodio, gettato su casseri e vibrato, indipendentemente dal tempo di maturazione e dall'aggiunta delle fibre (Figura 4).

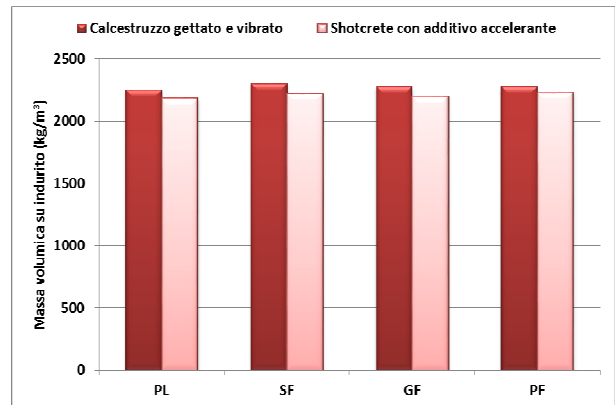


Figura 4: Massa volumica su indurito

#### 3.2.2 Resistenza a compressione

Per quanto concerne lo sviluppo della resistenza a compressione del tempo (Figura 5), si nota che dopo 1 giorno di maturazione, lo shotcrete (calcestruzzo spruzzato con aggiunta di additivo accelerante di presa) ha una resistenza maggiore di quella dell'analogo impasto confezionato senza silicato di sodio. Pertanto, alle brevissime stagionature, l'additivo accelerante di presa è in grado di compensare l'effetto negativo delle operazioni di spruzzaggio in termini di aumento della porosità (diminuzione di massa volumica) tanto che la resistenza meccanica a compressione dell'impasto con silicato di sodio risulta a 1g dal 50 all'85% circa maggiore di quella del betoncino senza l'accelerante.

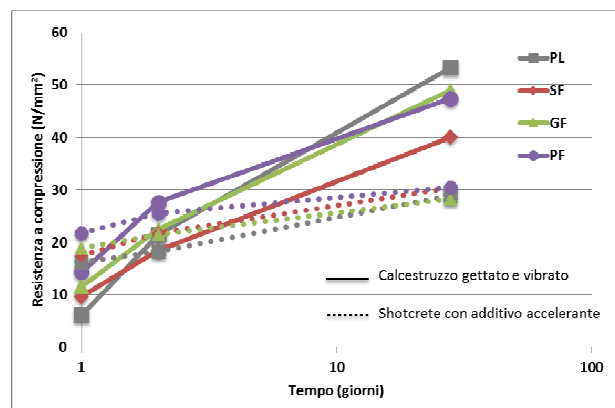


Figura 5: Sviluppo della resistenza a compressione nel tempo in funzione del tipo di fibra sia di calcestruzzi gettati che spruzzati con aggiunta di additivo accelerante di presa.

Per contro, dopo 28 giorni, tutti gli impasti – indipendentemente dall'aggiunta delle fibre – additivati con l'accelerante di presa presentano una resistenza meccanica a

compressione decisamente più bassa di quella dell'analogo impasto non additivato. In particolare, si nota come la diminuzione della resistenza a compressione sia strettamente legata alla percentuale di aggiunta dell'additivo accelerante (Figura 5): maggiore il dosaggio di silicato di sodio, minore la resistenza a compressione. Quindi, dai risultati della resistenza a compressione dopo 28 giorni di maturazione è possibile affermare come questa proprietà meccanica non sia strettamente correlata al tipo e dosaggio di fibra, ma dipenda quasi esclusivamente dal dosaggio dell'additivo accelerante di presa. In linea di massima, si può anche stimare la penalizzazione della resistenza direttamente attribuibile all'accelerante e quella, invece, associabile con la diminuzione di massa volumica conseguente all'operazione di proiezione del betoncino. Tenendo conto che:

1. la penalizzazione della resistenza per effetto della proiezione è del 5% circa per ogni punto percentuale di diminuzione della massa volumica;
2. la diminuzione della massa volumica del calcestruzzo è risultata compresa nell'intervallo 2÷6%.

la diminuzione della resistenza per effetto della proiezione dovrebbe essere all'incirca pari al 10÷30%. Pertanto, essendo la diminuzione della resistenza complessivamente compresa tra il 25 e il 45% circa, si deve concludere che l'effetto dell'accelerante di presa sulla diminuzione della resistenza meccanica a compressione è stimabile all'incirca in un 15%. In sostanza, i dati confermano che la penalizzazione delle resistenze meccaniche a compressione sono strettamente correlate sia alle modalità di posa in opera (proiezione) che al dosaggio di additivo accelerante di presa a base di silicato sodico più che al tipo e al dosaggio di fibre impiegate.

### 3.2.3 Punzonamento

I risultati della prova a punzonamento sono riportati in Figura 6 in termini di energia di deformazione ottenuti su pannelli confezionati con miscele spruzzate contenenti sia l'additivo accelerante di presa che le fibre. Per la miscela di riferimento (senza fibre) è stato utilizzato un rinforzo tradizionale quale una rete elettrosaldata in acciaio B450C ( $\Phi 6/150 \times 150$ )

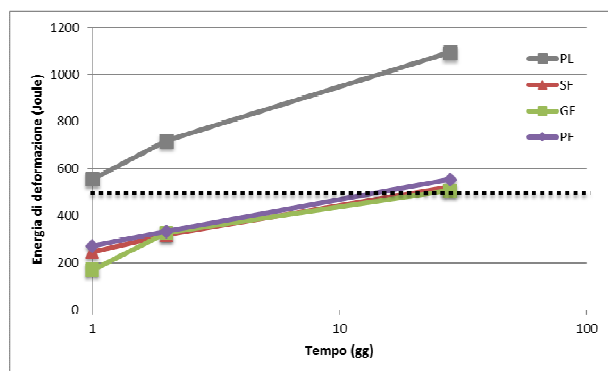


Figura 6: Energia di deformazione nel tempo per shotcrete fibrorinforzati con additivo accelerante di presa.

I risultati ottenuti indicano che l'utilizzo delle fibre in luogo del tradizionale rinforzo in acciaio non garantisce la raggiunta delle stesse prestazioni, in termini di resistenza al punzonamento. Infatti, già dopo 1 giorno, il pannello di riferimento raggiunge un valore di 500 Joule, requisito

minimo richiesto da normativa. Al contrario, questo valore limite è raggiunto nei pannelli fibrorinforzati solo dopo 28 giorni.

Importante sottolineare come il valore minimo venga raggiunto anche dal betoncino con fibre in polipropilene ( $2.9 \text{ l/m}^3$ ), nonostante il dosaggio di queste fibre nella ricerca condotta fosse inferiore a quello del vetro e dell'acciaio. (rispettivamente  $4.7$  and  $4.4 \text{ l/m}^3$ ).

Le prove di punzonamento in ogni caso e, inequivocabilmente, indicano che le prestazioni del calcestruzzo fibrorinforzato, indipendentemente dal tipo di fibra, sono inferiori a quelle del calcestruzzo armato con rete elettrosaldata. Il motivo di questo divario esistente tra le due tecniche proposte (tradizionale con rete vs fibrorinforzato) potrebbe essere spiegato in base al fatto che la prestazione del calcestruzzo fibrorinforzato in termini di resistenza al punzonamento è strettamente dipendente non solo dal tipo e dal dosaggio delle fibre, ma dipende fortemente anche dalla qualità della matrice. Nel caso della sperimentazione in esame – come menzionato ai precedenti paragrafi – la qualità della matrice cementizia è risultata fortemente penalizzata dall'aggiunta dell'additivo accelerante. Questa penalizzazione ha determinato un conseguente abbattimento dell'aderenza fibra-matrice con inevitabili ripercussioni negative sulla duttilità/tenacità del composito fibrorinforzato esasperando il divario prestazionale con la lastra armata con rete la quale, beneficiando di un rinforzo continuo, risente meno della scadente qualità della matrice cementizia [8].

## 4. CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati dell'indagine sperimentale condotta si possono trarre le seguenti conclusioni:

- a) Relativamente alla massa volumica del calcestruzzo fresco e alla lavorabilità, non esistono differenze sostanziali tra gli impasti realizzati con o senza le fibre, altresì indipendentemente dalla natura.
- b) Lo sfrido è esclusivamente influenzato dal dosaggio di additivo accelerante e non dalla presenza e natura delle fibre. Sembra esistere una proporzionalità indiretta tra dosaggio di accelerante e sfrido: maggiore è il dosaggio di accelerante e minore risulta lo sfrido.
- c) Relativamente alla massa volumica del calcestruzzo indurito, si può affermare che indipendentemente dalla stagionatura e dalla presenza o meno dell'accelerante l'aggiunta delle fibre non determina anomali intrappolamenti di aria: la massa volumica dei calcestruzzi fibrorinforzati, infatti, risulta sostanzialmente uguale o tendenzialmente maggiore di quella dell'impasto di riferimento senza fibre. C'è, invece, una diminuzione di massa volumica sugli impasti confezionati con l'aggiunta di silicato di sodio pari all'incirca al 2-6% rispetto a quella dell'impasto compattato a rifiuto, indipendentemente dal tipo di fibra e dalla stagionatura.
- d) La resistenza a compressione nel tempo è strettamente influenzata dalla presenza dell'additivo accelerante, indipendentemente dal tipo di fibra. Dopo 1 giorno di maturazione la resistenza a compressione dei calcestruzzi proiettati additivati con l'accelerante di presa risulta maggiore di quella dell'analogo impasto confezionato senza silicato di sodio di circa il 50-85%. A 2 giorni – e ancora una volta indipendentemente dal tipo di fibra – l'effetto positivo sulla resistenza meccanica a

compressione dovuto all'accelerazione della presa e all'indurimento eguaglia quello negativo derivante dall'incremento della porosità a seguito della proiezione degli impasti. Infine, a 28 giorni, tutti gli impasti – sia con che senza fibra – additivati con l'accelerante di presa presentano una resistenza meccanica a compressione minore di quella dell'analogo impasto non additivato di circa il 25-45%. Quindi, i dati di resistenza meccanica sembrano indicare come i valori di questa caratteristica siano fortemente dipendenti non dal tipo di fibra, ma dal dosaggio dell'additivo accelerante di presa. In linea di massima, si stima una penalizzazione della resistenza direttamente attribuibile all'accelerante di presa pari all'incirca in un 15%.

- e) Le prove di punzonamento indicano che le prestazioni del calcestruzzo fibrorinforzato indipendentemente dal tipo di fibra sono inferiori a quelle del calcestruzzo tal quale armato con rete elettrosaldata. Il motivo di questo divario esistente tra le due tecniche proposte (tradizionale con rete vs fibrorinforzato) potrebbe essere spiegato in base al fatto che la prestazione del calcestruzzo fibrorinforzato in termini di resistenza al punzonamento è strettamente dipendente non solo dal tipo e dal dosaggio delle fibre, ma dipende fortemente anche dalla qualità della matrice. Nel caso della sperimentazione in esame – come menzionato ai precedenti paragrafi – la qualità della matrice cementizia è risultata fortemente penalizzata dall'aggiunta dell'additivo accelerante. Questa penalizzazione ha determinato un conseguente abbattimento dell'aderenza fibra-matrice con inevitabili ripercussioni negative sulla duttilità/tenacità del composito fibrorinforzato esasperando il divario prestazionale con la lastra armata con rete la quale, beneficiando di un rinforzo continuo, risente meno della scadente qualità della matrice cementizia.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Coppola L., (2007) "Concretum", McGraw-Hill
- [2] Coppola L., Buoso A., "Calcestruzzi fibrorinforzati: risultati di una campagna sperimentale su spritz-beton rinforzati con fibre di acciaio, vetro e polipropilene", Enco Journal, N.60, 2013, pp.19-26
- [3] Coppola L., Cadoni E., Forni D., Buoso A., "Mechanical Characterization of Cement Composites Reinforced with Fiberglass, Carbon Nanotubes or Glass Reinforced Plastic (GRP) at High Strain Rates", Applied Mechanics and Materials (2011) Vol. 82 190-195.
- [4] Coppola L., "Il manuale del calcestruzzo di qualità", pp.350, Il Sole 24 Ore, Milano, Italia (Aprile 2008), ISBN 978-88-324-7027-7.
- [5] Zeidler K., Jäger J. (2007). "Fiber reinforced shotcrete for tunnel linings", Recent Advances in Concrete Technology.
- [6] Zaffaroni P., Pistolesi C., Dal Negro E., Coppola L. and Collepari M. (2000). "High Performance Shotcrete", Industria Italiana del Cemento, 756, 598-605.
- [7] Coppola L. (2001). "Rheology Proportioning and Properties of Self-Compacting Concretes", Proc. Self

Compacting Concrete for Tunnel Linings, Sargans, Switzerland.

- [8] L. Coppola, A. Buoso, F. D'Alessandro, (2013). "Comparative Evaluation of Steel, Glass and Polypropilene Fiber Reinforced Shotcretes for Tunnel Lining", Proceedings of ACI Italy Chapter 3rd Workshop on "The New Boundaries of Structural Concrete", 165-174, Editors L. Coppola, R. Realfonzo, P.Riva, Bergamo, October 3-4, 2013, ISBN 978-88-904292-7-9.