



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea

***STUDIO DI ADDITIVI MULTIFUNZIONALI PER IL RIPRISTINO E
RECUPERO DI CALCESTRUZZO ARMATO AMMALORATO***

***STUDY OF MULTIFUNCTIONAL ADMIXTURES FOR RESTORING OF
DAMAGED CONCRETE STRUCTURES***

Relatore:

Prof.ssa Valeria Corinaldesi

Correlatore:

Ing. Jacopo Donnini

Tesi di laurea di:

Annalisa Pugliese

Anno Accademico 2019/2020

**“Quello che saremo domani,
lo costruiamo oggi”**

*Alla mia famiglia che mi ha dato l'opportunità
di raggiungere questo traguardo.*

A me stessa.

INDICE

1. Introduzione e breve descrizione del lavoro	3
2. Il prodotto innovativo.....	4
3. Premessa al Mix Design	6
3.1. Utilizzo del vetro	6
3.2. Preparazione del vetro.....	7
3.3. Setacciatura del vetro	9
4. Capacità idrorepellente per cls.....	14
4.1. Progetto della miscela	14
4.2. Preparazione della miscela	14
4.3. Getto	15
4.4. Scassero	16
4.5. Applicazione del prodotto innovativo	18
4.6. Massa asciutta al forno	19
4.7. Massa satura dopo immersione	19
4.8. Massa satura dopo ebollizione	21
4.9. Commento dei risultati	23
5. Capacità di mitigazione/annullamento delle reazioni alcali-aggregato	24
5.1. Progetto della miscela	24
5.2. Preparazione della miscela	24
5.3. Getto	25
5.4. Scassero	28
5.5. Applicazione prodotto innovativo	28
5.6. Memoria iniziale e lettura.....	29
5.7. Lettura zero.....	33

5.8. Conservazione e successive misurazioni	36
Lettura 3 gg	37
Lettura 6 gg	39
Lettura 10 gg	41
Lettura 13 gg	43
Lettura 17 gg	45
Lettura 20 gg	47
5.9. Commento dei risultati	48
6. Conclusioni	50
7. Bibliografia	51
8. Ringraziamenti	52

1. Introduzione e breve descrizione del lavoro

Il presente lavoro di tesi si prefigge lo scopo di valutare l'efficacia di un prodotto innovativo per il consolidamento di opere ammalorate in calcestruzzo armato.

Il programma sperimentale per la caratterizzazione delle proprietà del prodotto è stato suddiviso in due parti:

- **Capacità idrorepellente per calcestruzzo.**

Per la valutazione di tale proprietà è stato effettuato il test ASTM C 642-13 "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".

- **Capacità di mitigazione/annullamento delle reazioni alcali-aggregato.**

Per la valutazione di tale proprietà è stato effettuato il test ASTM C 1260-14 "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)".

2. Il prodotto innovativo

Il prodotto innovativo oggetto di studio è un inibitore liquido della reazione alcali aggregato e della corrosione dei ferri di armatura, a effetto passivante, anti-carbonatazione e idrorepellente.



Figura 1. Il prodotto oggetto di studio: DRACOGARD CLE

Si tratta di un formulato liquido sperimentale ad effetto combinato di colore bianco latte, a bassa viscosità, da applicare sulla superficie delle strutture in calcestruzzo armato, quale impregnante protettivo.

Il suo scopo è quello di ottenere la massima efficacia e protezione anche in presenza degli ambienti più aggressivi, come quelli marini o nelle zone di bagnasciuga.

Le **caratteristiche specifiche** del prodotto sono:

- Neutralizzazione della reazione alcali-aggregato (ASR).
- Capacità di protezione contro la corrosione da cloruri nelle armature.
- Incrementa la durabilità e la vita utile delle strutture.
- Protezione in caso di contatto con sali disgelanti e ambienti marini.
- Non ha effetti negativi sulle caratteristiche del calcestruzzo.
- Facilità di utilizzo grazie alla formula liquida ad alta capacità migratoria.

- Azione protettiva idrorepellente.

I campi di impiego sono:

- Strutture in calcestruzzo realizzate con inerti potenzialmente reattivi.
- Strutture in calcestruzzo armato fuori terra e interrate.
- Strutture sottoposte all'azione indiretta dell'ambiente marino.
- Parcheggi e pavimentazioni stradali in calcestruzzo.
- Strutture in genere sottoposte all'azione di Sali disgelanti durante il periodo invernale.
- Superfici in calcestruzzo di strutture storiche di alto valore estetico (estensione della vita utile).

L'**applicazione** è molto semplice, in quanto il prodotto è pronto all'uso e non deve essere diluito; dopo una preliminare agitazione può essere applicato direttamente sul calcestruzzo asciutto, in strati multipli, fresco su fresco, assicurandosi che ogni strato venga correttamente assorbito.

3. Premessa al Mix Design

Per effettuare i test di caratterizzazione del prodotto innovativo, sono state progettate due differenti miscele: una in cui è previsto l'utilizzo di sola sabbia come inerte, un'altra in cui la sabbia viene sostituita al 75% con vetro trasparente.

In particolare, la miscela contenente vetro è stata utilizzata per il test C1260-14, poiché il vetro risulta essere un materiale in grado di aumentare l'espansione alcali-aggregato, effetto che ci si propone di limitare o annullare con il prodotto innovativo oggetto dello studio.

3.1. Utilizzo del vetro

Per l'utilizzo del vetro riciclato è stato preso in analisi l'articolo "**Rause of recycled glass in mortar manufacturing**" di Valeria Corinaldesi, Alessandro Nardinocchi & Jacopo Donnini.

Nel presente articolo viene trattato l'utilizzo del vetro riciclato nelle malte come sostituto di cemento o aggregato; in questa sede facciamo particolare riferimento all'utilizzo come sostituto della sabbia. Inoltre, all'inizio dell'articolo si premette come il tipo di riutilizzo del vetro riciclato non sia ancora comune a causa del rischio della reazione alcali-aggregato **ASR**, effetto che in questo frangente si richiede per studiare l'efficacia del prodotto innovativo.

L'ASR è una reazione che provoca evidenti danni al calcestruzzo, infatti si è visto come la struttura di silicato amorfo del vetro si dissolva nella soluzione di pori alcalini del calcestruzzo e formi un gel che in presenza di acqua rigonfia e spacca il calcestruzzo.

Studi hanno messo in relazione la gravità delle espansioni ASR con dimensioni, contenuto e colore del vetro. Da questi si evince che al diminuire delle dimensioni, le espansioni e le fessurazioni si riducono; inoltre è stato osservato come l'utilizzo di vetro verde o ambrato porti a espansioni trascurabili, mentre il vetro trasparente produca un'espansione ASR molto elevata, infatti per rottame di vetro trasparente fino a 8 mm si raccomanda un rapporto di sostituzione non maggiore del 50% in peso.

Quindi, preso atto degli studi effettuati e delle conclusioni esposte nell'articolo sopracitato, per il test sulla potenziale reattività alcalina degli aggregati, si è deciso di realizzare una miscela con un rapporto di sostituzione del 75%, con l'obiettivo di ottenere un'espansione quanto più possibile elevata.

3.2. Preparazione del vetro

Il vetro impiegato per la preparazione della miscela è vetro trasparente riciclato, proveniente da bottiglie e barattoli accuratamente lavati e asciugati prima dell'utilizzo.

Prima di tutto, le bottiglie e i barattoli sono stati frantumati con un martello di metallo fino ad ottenere frammenti quanto più piccoli possibile.



Figura 2. Alcuni dei barattoli di riciclo prima di essere frantumati



Figura 3. Attrezzatura utilizzata per la preliminare frammentazione di bottiglie e barattoli



Figura 4. Secchio utilizzato per la frantumazione preliminare del vetro



Figura 5. Vetro pronto per la macinazione

A questo punto, il vetro frantumato viene inserito all'interno di un mulino a biglie di porcellana ceramica.



Figura 6. Mulino a biglie di porcellana utilizzato per la macinazione del vetro



Figura 7. Biglie in porcellana ceramica utilizzate per la macinatura



Figura 8. Vetro macinato e pronto per la setacciatura

3.3. Setacciatura del vetro

Subito dopo la macinatura, è stata effettuata un'analisi granulometrica per setacciatura.

Sono stati utilizzati 6 setacci ASTM delle dimensioni: 4000 μm , 2800 μm , 2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 250 μm .



Figura 9. Serie di setacci utilizzati per la setacciatura

Dal vetro macinato è stato prelevato un campione significativo di 1000 g, che verrà inserito in alto, nel setaccio con apertura maggiore.

La serie di setacci, sovrapposti con apertura via via decrescente dall'alto verso il basso, viene fatta vibrare in modo che i granuli vengano separati in frazioni pressoché uguali e trattenuti nei setacci con diametro corrispondente.



Figura 10. Setacciatrice utilizzata per la setacciatura del campione di vetro macinato



Figura 11. Frazioni di vetro risultanti dalla setacciatura

Dalla setacciatura risulta:

n	Setaccio		Setaccio + vetro	Vetro			
	Dimensioni [μm]	Peso [g]		P_i [g]	T_i [%]	TC_i [%]	PC_i [%]
1	4000	568.9	764.17	195.27	19.527	19.527	80.473
2	2800	561.32	652.86	91.54	9.154	28.681	71.319
3	2000	542.93	606.11	63.18	6.318	34.999	65.001
4	1000	491.05	568.62	77.57	7.757	42.756	57.244
5	500	460.03	775.18	315.15	31.515	74.271	25.729
6	250	422.93	592.12	169.19	16.919	91.19	8.81
7	Base	440.51	528.61	88.1	8.81	100	0

Tabella 1. Risultati dell'analisi granulometrica per setacciatura

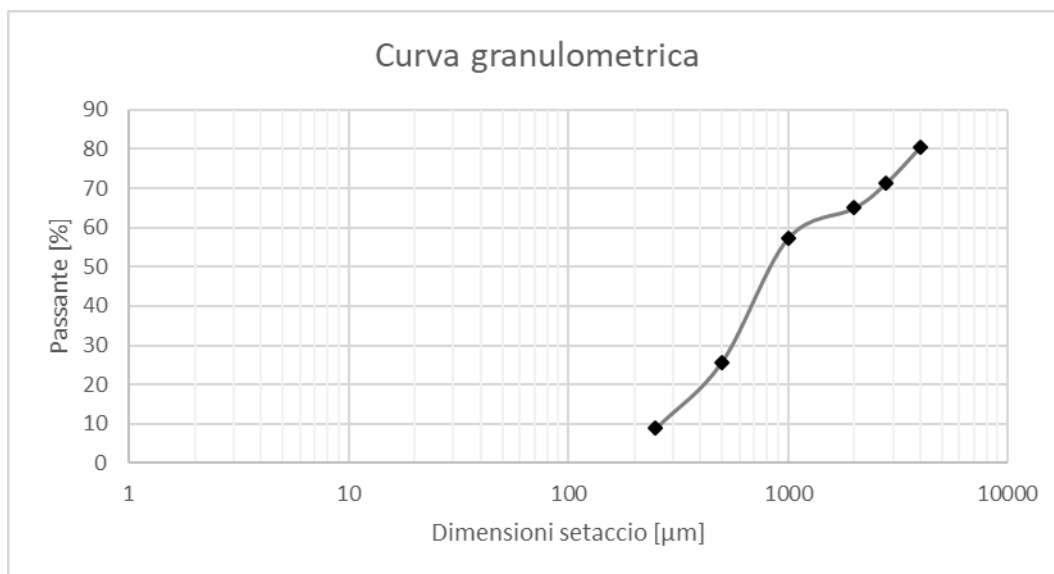


Grafico 1. Curva granulometrica del vetro macinato

La norma ASTM C1260-14 dà dei requisiti di classificazione dell'aggregato da utilizzare, come prescritto dalla seguente tabella:

Dimensioni setaccio		Massa [%]	PCi [%]
Passante	Trattenuto		
4.75 mm (n.4)	2.36 mm (n.8)	10	90
2.36 mm (n.8)	1.18 mm (n.16)	25	65
1.18 mm (n.16)	600 µm (n.30)	25	40
600 µm (n.30)	300 µm (n.50)	25	15
300 µm (n.50)	150 µm (n.100)	15	0

Tabella 2. Requisiti di classificazione dell'aggregato secondo ASTM C1260-14

Tali requisiti sono stati quindi, messi a confronto con i risultati dell'analisi granulometrica del vetro macinato.

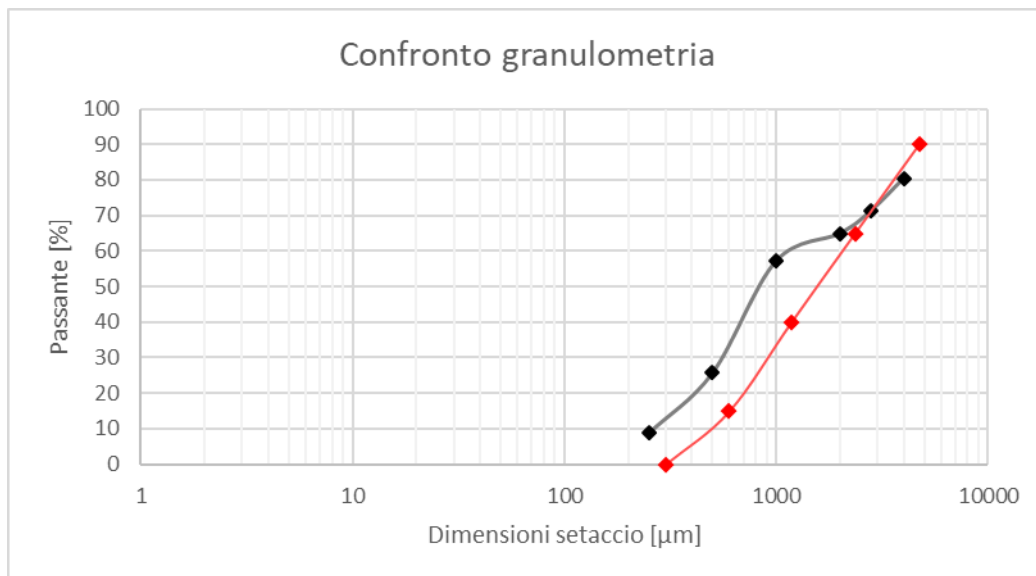


Grafico 2. Confronto granulometria vetro e requisiti norma ASTM C1260-14

4. Capacità idrorepellente per cls

Per la valutazione di tale proprietà ci si è avvalsi della norma americana **ASTM C642-13** “**Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**”.

4.1. Progetto della miscela

È stata progettata una miscela considerando una classe di consistenza S4 e un rapporto acqua – cemento (a/c) pari a 0.47.

In particolare, si specifica che per il quantitativo di materiali secchi da utilizzare, non è stato scelto quello risultante dal mix design, ma la proporzione “1 parte di cemento e 2.25 parti di aggregato” come richiesto dalla norma ASTM 1260-14.

Tipo di miscela	a/c	Classe lavorabilità	Prodotto innovativo	% P.I. in massa	% Vetro	Acqua [g/l]	Cemento [g/l]	Sabbia [g/l]	Vetro [g/l]
Standard di riferimento	0.47	S4	NO	0%	0%	250	532	1197	0
Prodotto innovativo			SI	0%	0%	250	532	1197	0

Tabella 3. Mix design del primo getto di malta cementizia

4.2. Preparazione della miscela

Il legante impiegato è il cemento Portland al calcare 42.5R (resistenza a compressione iniziale a 2 giorni ≥ 20 MPa), mentre l’aggregato utilizzato è costituito interamente da sabbia passante al setaccio 0.85 mm e peso specifico di 2.65 kg/l.

Prima di tutto sono stati pesati tutti gli ingredienti, separatamente, in dosi tali da ottenere un quantitativo di miscela proporzionato per la realizzazione di 6 provini di dimensioni 5x5x30 cm.

Poi tutti gli ingredienti sono stati mescolati in un miscelatore elettrico per un tempo utile all’ottenimento di un impasto omogeneo.



Figura 12. Miscelatore utilizzato per la preparazione della miscela

4.3. Getto

Sono stati realizzati 6 provini in casseri di acciaio di dimensioni 5x5x30 cm. Tali casseri sono predisposti a blocchi di tre e fissati su una piastra di acciaio che funge da base. Quindi con ogni cassero è possibile produrre 3 provini, di conseguenza sono stati preparati due casseri.

Dunque, i getti effettuati sono: uno per i 3 provini di riferimento, ed un altro per i provini sui quali verrà applicato il prodotto innovativo.



Figura 13. Casseri in acciaio, 5x5x30 cm, utilizzati per il getto della malta

Una volta effettuato il getto (utilizzando anche la pedana vibrante per evitare che si verifichi il fenomeno della segregazione), gli stampi sono stati coperti con della pellicola trasparente e conservanti nella camera climatica per circa 24 ore.



Figura 14. Pedana vibrante

4.4. Scassero

Il giorno seguente al getto i provini sono stati scassero e identificati con i codici: RIF 1/2/3 per i provini di riferimento e P.I. 1/2/3 per quelli su cui verrà applicato il prodotto innovativo.



Figura 15. Provini scasserati e identificati.

Subito dopo sono stati pesati uno alla volta.

Provino	Massa [g]
	Scassero
RIF. 1	1654.61
RIF. 2	1665.4
RIF. 3	1695.5
P.I. 1	1618.15
P.I. 2	1659.76
P.I. 3	1675.97

Tabella 4. Masse provini subito dopo lo scassero

Una volta pesati, sono stati avvolti con della pellicola trasparente, così da permettere una stagionatura umida, e messi in camera di conservazione per altri 27 giorni.

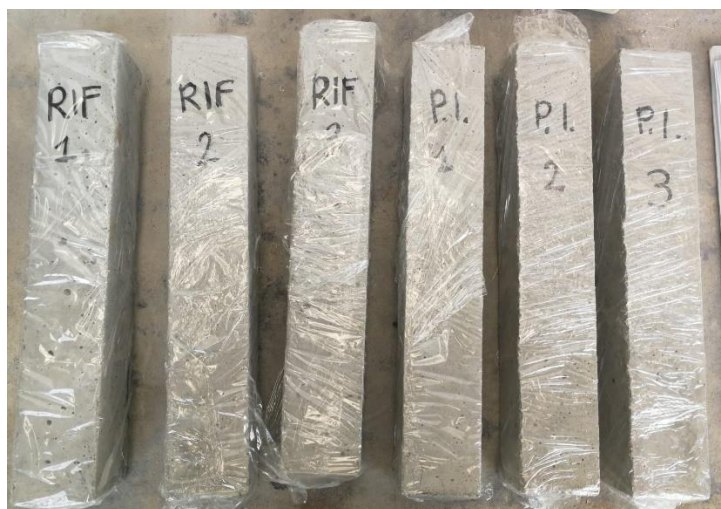


Figura 16. Provini, avvolti nella plastica, pronti per essere conservati nella camera climatica per 27gg.

4.5. Applicazione del prodotto innovativo

Dopo 27 giorni, sui tre provini designati è stato applicato il prodotto innovativo.

L'applicazione del prodotto è stata effettuata con un pennello, in 3 mani, avendo cura che ogni strato di prodotto sia stato ben assorbito prima dell'applicazione dello strato successivo.

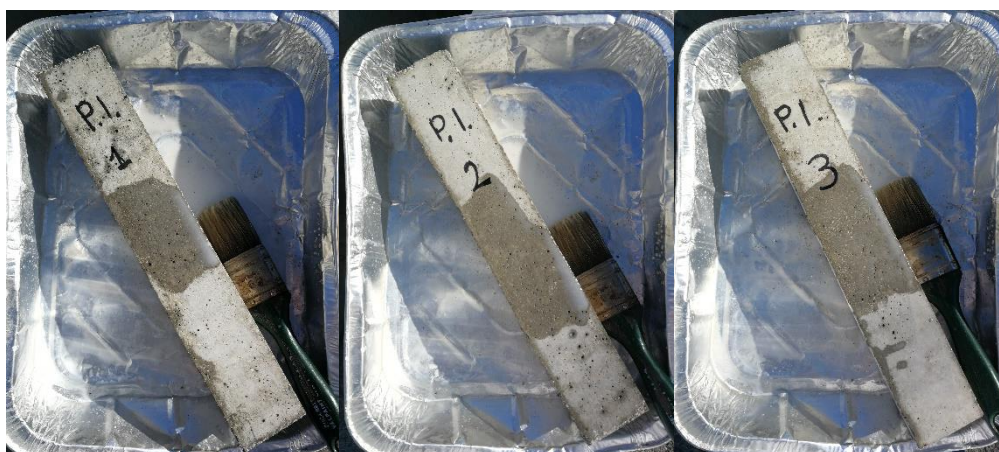


Figura 17. Applicazione del prodotto innovativo

Per assicurarsi della corretta asciugatura del prodotto sulla superficie dei provini, questi sono stati conservati per circa 1 ora nella camera climatica.

Dopo 1 ora, tutti i provini, sia quelli di riferimento che quelli con il prodotto innovativo, sono stati pesati uno alla volta.

Provino	Massa [g]	
	Scassero	28 gg
RIF. 1	1654.61	1623.46
RIF. 2	1665.4	1634.11
RIF. 3	1695.5	1667.42
P.I. 1	1618.15	1568.78
P.I. 2	1659.76	1635.54
P.I. 3	1675.97	1649.82

Tabella 5. Masse provini a 28 gg

4.6. Massa asciutta al forno

I provini sono stati messi ad asciugare in forno ad una temperatura di 80°C per circa 24 ore.



Tabella 6. Provini messi ad asciugare in forno

Dopo 24 ore, sono stati rimossi dal forno e lasciati raffreddare all'aria secca ad una temperatura tra i 20 ed i 25°C.

Prima di pesare i provini, è stato nuovamente applicato il prodotto con la stessa procedura già seguita in precedenza.

A questo punto, i provini sono stati pesati uno alla volta, designando così la **massa asciutta al forno (A)**.

Provino	Massa [g]		
	Scassero	28 gg	A
RIF. 1	1654.61	1623.46	1560.4
RIF. 2	1665.4	1634.11	1573.92
RIF. 3	1695.5	1667.42	1604.38
P.I. 1	1618.15	1568.78	1535.16
P.I. 2	1659.76	1635.54	1579.02
P.I. 3	1675.97	1649.82	1592.36

Figura 18. Massa asciutta al forno (A)

4.7. Massa satura dopo immersione

I provini sono stati immersi in acqua ad una temperatura di 21°C per circa 72 ore.



Figura 19. Provini immersi in acqua

Dopo 72 ore, i provini sono stati asciugati in superficie e pesati, poi sono stati subito rimmersi in acqua (**B1**).

Provino	Massa [g]			
	Scassero	28 gg	A	B1
RIF. 1	1654.61	1623.46	1560.4	1667.09
RIF. 2	1665.4	1634.11	1573.92	1676.99
RIF. 3	1695.5	1667.42	1604.38	1706.88
P.I. 1	1618.15	1568.78	1535.16	1600.09
P.I. 2	1659.76	1635.54	1579.02	1623.74
P.I. 3	1675.97	1649.82	1592.36	1668.55

Tabella 7. Peso provini dopo 72 ore di immersione

Dopo ulteriori 24 ore, i provini sono stati nuovamente asciugati in superficie e pesati. Dato che i valori di massa ottenuti delle due misurazioni successive concordano strettamente, viene designata così la **massa satura dopo immersione (B)**.

Provino	Massa [g]			
	Scassero	28 gg	A	B
RIF. 1	1654.61	1623.46	1560.4	1667.94
RIF. 2	1665.4	1634.11	1573.92	1677.24
RIF. 3	1695.5	1667.42	1604.38	1707.9
P.I. 1	1618.15	1568.78	1535.16	1607.11
P.I. 2	1659.76	1635.54	1579.02	1629.87
P.I. 3	1675.97	1649.82	1592.36	1676.33

Tabella 8. Peso provini dopo 96 ore di immersione

A questo punto è stata calcolata la percentuale di **assorbimento dopo l'immersione**:

$$\% = \left[\frac{B - A}{A} \right] \times 100$$

Equazione 1. Percentuale di assorbimento dopo immersione

Ne risulta:

Provino	Assorbimento dopo immersione
RIF. 1	7%
RIF. 2	7%
RIF. 3	6%
P.I. 1	5%
P.I. 2	3%
P.I. 3	5%

Tabella 9. Percentuali di assorbimento dopo immersione

Dai calcoli effettuati risulta una modesta differenza tra i provini di riferimento e quelli su cui è stato applicato il prodotto innovativo, quindi il prodotto è risultato efficace all'idrorepellenza.

4.8. Massa satura dopo ebollizione

I provini sono stati posizionati in un contenitore, coperti d'acqua e messi a bollire in forno a 80°C per 5 ore.



Figura 20. Provini messi a bollire in forno

I provini sono stati messi a raffreddare per circa 14 ore, fino ad ottenere una temperatura finale di 20-25°C.

Una volta raffreddati sono stati pesati, designando, così, la **massa satura dopo ebollizione (C)**.

Provino	Massa [g]				
	Scassero	28 gg	A	B	C
RIF. 1	1654.61	1623.46	1560.4	1667.94	1669.6
RIF. 2	1665.4	1634.11	1573.92	1677.24	1678.86
RIF. 3	1695.5	1667.42	1604.38	1707.9	1708.95
P.I. 1	1618.15	1568.78	1535.16	1607.11	1621.18
P.I. 2	1659.76	1635.54	1579.02	1629.87	1648.89
P.I. 3	1675.97	1649.82	1592.36	1676.33	1686.15

Tabella 10. Massa satura dopo ebollizione

A questo punto è stata calcolata la percentuale di **assorbimento dopo immersione ed ebollizione**:

$$\% = \left[\frac{C - A}{A} \right] \times 100$$

Equazione 2. Percentuale di assorbimento dopo ebollizione

Ne risulta:

Provino	Assorbimento dopo immersione ed ebollizione
RIF. 1	7%
RIF. 2	7%
RIF. 3	7%
P.I. 1	6%
P.I. 2	4%
P.I. 3	6%

Tabella 11. Percentuali di assorbimento dopo ebollizione

Dai calcoli effettuati risulta esserci sempre una differenza tra i provini di riferimento e quelli su cui è stato applicato il prodotto innovativo, ma nei provini con il prodotto la percentuale di assorbimento è aumentata.

4.9. Commento dei risultati

Osservando i risultati ottenuti è possibile affermare che c'è differenza tra i provini di riferimento e quelli sui cui è stato applicato il prodotto innovativo, come è possibile osservare nelle tabelle con le percentuali di assorbimento. Pertanto, si ritiene il test effettuato soddisfacente, anche se ci si aspettava una differenza più consistente.

5. Capacità di mitigazione/annullamento delle reazioni alcali-aggregato

Per la valutazione di tale proprietà ci si è avvalsi della norma americana **ASTM C 1260-14 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”**.

5.1. Progetto della miscela

Per la valutazione di tale proprietà è stata progettata una miscela considerando una classe di consistenza S4 e un rapporto acqua – cemento (a/c) pari a 0.47.

In particolare, si specifica che per il quantitativo di materiali secchi da utilizzare, non è stato scelto quello risultante dal mix design, ma la proporzione “1 parte di cemento e 2.25 parti di aggregato” come richiesto dalla norma ASTM 1260-14.

Inoltre, nel progetto di questa miscela è stato aggiunto il vetro per le ragioni precedentemente descritte.

Tipo di miscela	a/c	Classe lavorabilità	Prodotto innovativo	% P.I. in massa	% Vetro	Acqua [g/l]	Cemento [g/l]	Sabbia [g/l]	Vetro [g/l]
Standard di riferimento	0.47	S4	NO	0%	0%	250	532	1197	0
Vetro			NO	0%	75%	250	532	299.25	897.75
Vetro + Prodotto innovativo			SI	0%	75%	250	532	299.25	897.75
Vetro + P.i. in massa 1%			SI	1%	75%	247.5	532	299.25	897.75
Vetro + P.i. in massa 3%			SI	3%	75%	242.5	532	299.25	897.75
Vetro + P.i. in massa 5%			SI	5%	75%	237.5	532	299.25	897.75

Tabella 12. Mix Design miscele per test ASTM C1260-14

5.2. Preparazione della miscela

Il legante impiegato è il cemento Portland al calcare 42.5R (resistenza a compressione iniziale a 2 giorni ≥ 20 MPa), mentre l’aggregato utilizzato è costituito interamente da sabbia passante al setaccio 0.85 mm e peso specifico di 2.65 kg/l.

Nel terzo tipo di miscela il prodotto innovativo è stato applicato in superficie, come descritto dalla scheda tecnica del prodotto.

Negli ultimi tre tipi di miscela il prodotto innovativo è stato aggiunto in massa, per l'1%, il 3% e il 5% rispetto al peso del cemento.

Per ogni miscela tutti gli ingredienti sono stati pesati separatamente e mescolati in un miscelatore elettrico per un tempo utile all'ottenimento di un impasto omogeneo.



Figura 21. Miscelatore utilizzato per la preparazione delle miscele

Si precisa che nella preparazione della miscela con l'aggiunta di vetro, dopo la miscelazione il composto è risultato molto denso, quindi sono stati aggiunti altri 100 g di acqua per ogni miscela.

5.3. Getto

Sono stati realizzati 18 provini in casseri di acciaio di dimensioni 4x4x16 cm. Tali casseri sono predisposti a blocchi di tre e fissati su una piastra di acciaio che funge da base. Quindi con ogni cassero è possibile produrre 3 provini, di conseguenza sono stati preparati sei casseri.

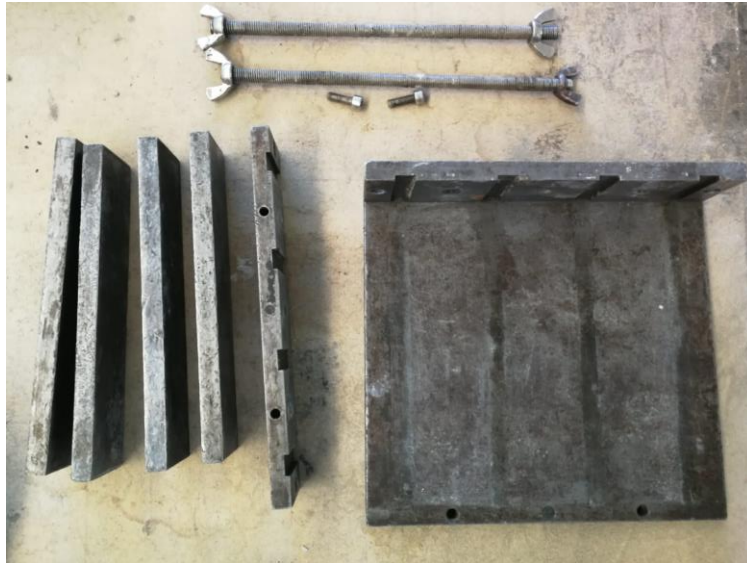


Figura 22. Elementi costituenti i casseri

I casseri utilizzati per questa prova sono predisposti per l'aggiunta di perni alle estremità, necessari per la misurazione con il micrometro. Tali perni sono costituiti da un elemento che viene annegato nella malta, ed una vite che ne permette l'ancoraggio al cassero.



Figura 23. Perna annegati nella malta



Figura 24. Cassero pronto per il getto

Dunque, i getti effettuati sono: uno per i 3 provini di riferimento, uno per i 3 provini con il vetro, uno per i 3 provini con vetro sui quali verrà applicato il prodotto innovativo, uno per i 3 provini con prodotto in massa all'1%, uno per i 3 provini con prodotto in massa al 3% ed uno con prodotto in massa al 5%.

Avendo a disposizione solo due casseri, sono stati realizzati prima i 3 provini di riferimento, il giorno dopo i restanti provini quelli con vetro. In un secondo tempo sono stati realizzati, in due turni, i provini con il prodotto in massa.

Una volta effettuato il getto (utilizzando anche la pedana vibrante per evitare che si verifichi il fenomeno della segregazione), gli stampi sono stati coperti con della pellicola trasparente e conservanti nella camera climatica per circa 24 ore.



Figura 25. Pedana vibrante

5.4. Scassero

Il giorno seguente al getto i provini sono stati scasserati e identificati.



Figura 26. Provini prima della scasseratura



Figura 27. Provini di riferimento scasserati e identificati

5.5. Applicazione prodotto innovativo

Dopo l'identificazione, sui tre provini designati è stato applicato il prodotto innovativo.

L'applicazione del prodotto è stata effettuata con un pennello, in 3 mani, avendo cura che ogni strato di prodotto sia stato ben assorbito prima dell'applicazione dello strato successivo.



Figura 28. Applicazione del prodotto innovativo con il pennello

5.6. Memoria iniziale e lettura

Dopo 1 ora, tutti e 18 i provini sono stati misurati con un calibro.

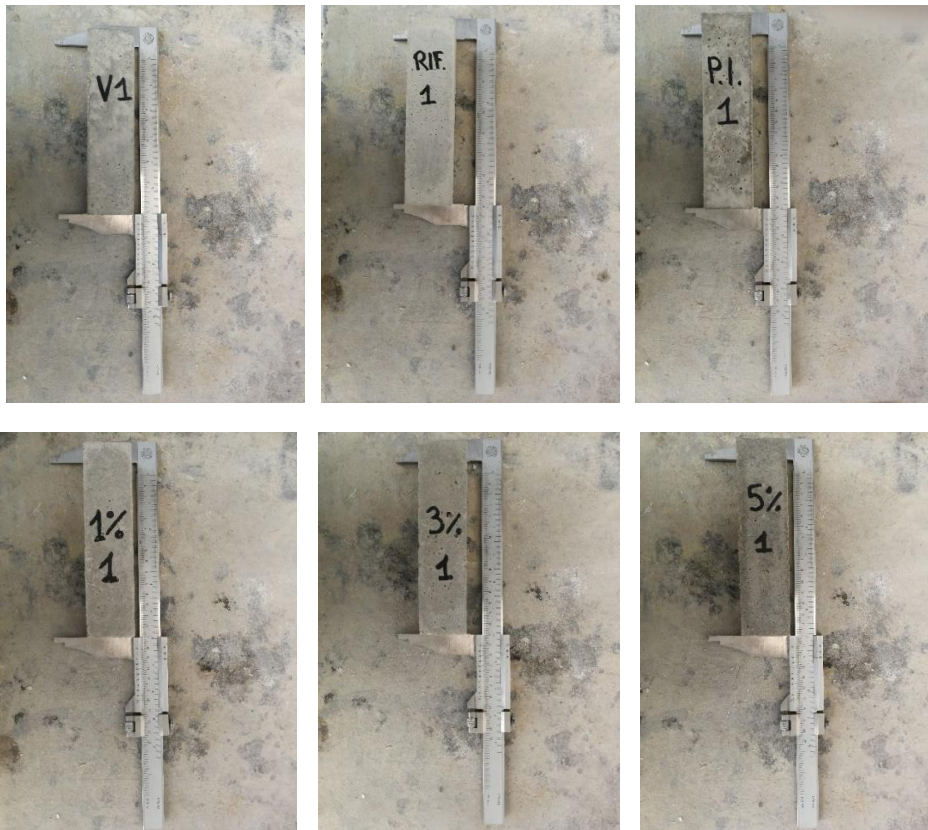


Figura 29. Provini misurati con il calibro

Provino	Lunghezza iniziale
RIF. 1	16.1
RIF. 2	16.05
RIF. 3	16.05
V1	16.07
V2	16.07
V3	16.08
P.I. 1	16.07
P.I. 2	16.07
P.I. 3	16.07
PI 1% 1	16.05
PI 1% 2	16.05
PI 1% 3	16.05
PI 3% 1	16.05
PI 3% 2	16.05
PI 3% 3	16.05
PI 5% 1	16.07
PI 5% 2	16.05
PI 5% 3	16.05

Tabella 13. Lunghezze provini prese con calibro

Poi è stata effettuata una prima lettura comparativa, avendo cura di proteggere i provini dalla perdita di umidità. L'esecuzione e la registrazione delle letture seguono le procedure di misurazione del cambio di lunghezza C490/C490M.



Figura 30. Lettura del comparatore



Figura 31. Lettura dei provini

Provino	Prima lettura			
	A	Comp.	Diff.	Esp.
RIF. 1	5.53	6.97	-1.44	0%
RIF. 2	5.15	6.97	-1.82	0%
RIF. 3	5.1	6.97	-1.87	0%
V1	5.52	6.97	-1.45	0%
V2	5.45	6.97	-1.52	0%
V3	5.92	6.97	-1.05	0%
P.I. 1	5.37	6.97	-1.6	0%
P.I. 2	5.56	6.97	-1.41	0%
P.I. 3	6.11	6.97	-0.86	0%
PI 1% 1	5.09	6.98	-1.89	0%
PI 1% 2	5.16	6.98	-1.82	0%
PI 1% 3	5.13	6.98	-1.85	0%
PI 3% 1	5.2	6.99	-1.79	0%
PI 3% 2	4.81	6.99	-2.18	0%
PI 3% 3	4.76	6.99	-2.23	0%
PI 5% 1	5.21	6.98	-1.77	0%
PI 5% 2	5.39	6.98	-1.59	0%
PI 5% 3	4.95	6.98	-2.03	0%

Tabella 14. Prima lettura effettuata con il micrometro

Dopo aver fatto la prima lettura, i provini sono stati immersi totalmente in un contenitore con acqua di rubinetto ad una temperatura di circa 23 °C.



Figura 32. Provini immersi in acqua

Il contenitore è stato sigillato e posizionato in forno a 80 °C.



Figura 33. Contenitore sigillato e posizionato nel forno

5.7. Lettura zero

Dopo 24 ore, il contenitore è stato rimosso dal forno e i provini sono stati presi, asciugati in superficie e misurati uno alla volta e molto rapidamente. L'esecuzione e la registrazione delle letture seguono le procedure di misurazione del cambio di lunghezza C490/C490M.



Figura 34. Asciugatura in superficie dei provini

Provino	Lettura 0				
	A	Comp.	Diff.	Esp.	Peso
RIF. 1	5.6	6.98	-1.38	6%	566.09
RIF. 2	5.23	6.98	-1.75	7%	566.87
RIF. 3	5.16	6.96	-1.8	7%	569.65
V1	5.59	6.96	-1.37	8%	543.13
V2	5.52	6.96	-1.44	8%	569.13
V3	5.99	6.96	-0.97	8%	567.78
P.I. 1	5.42	6.96	-1.54	6%	545.44
P.I. 2	5.61	6.96	-1.35	6%	563.57
P.I. 3	6.22	6.96	-0.74	12%	549.06
PI 1% 1	5.11	6.98	-1.87	2%	527.5
PI 1% 2	5.21	6.98	-1.77	5%	544.8
PI 1% 3	5.19	6.98	-1.79	6%	541.4
PI 3% 1	5.24	6.98	-1.74	5%	544.9
PI 3% 2	4.87	6.98	-2.11	7%	547.36
PI 3% 3	4.82	6.98	-2.16	7%	539.06
PI 5% 1	5.25	6.98	-1.73	4%	537.89
PI 5% 2	5.44	6.98	-1.54	5%	539.48
PI 5% 3	4.99	6.98	-1.99	4%	550.09

Tabella 15. Lettura 0 effettuata con il micrometro

Con i valori ottenuti dalle misurazioni per tutte le letture è stato costruito un grafico dell'espansione in funzione delle rispettive letture.

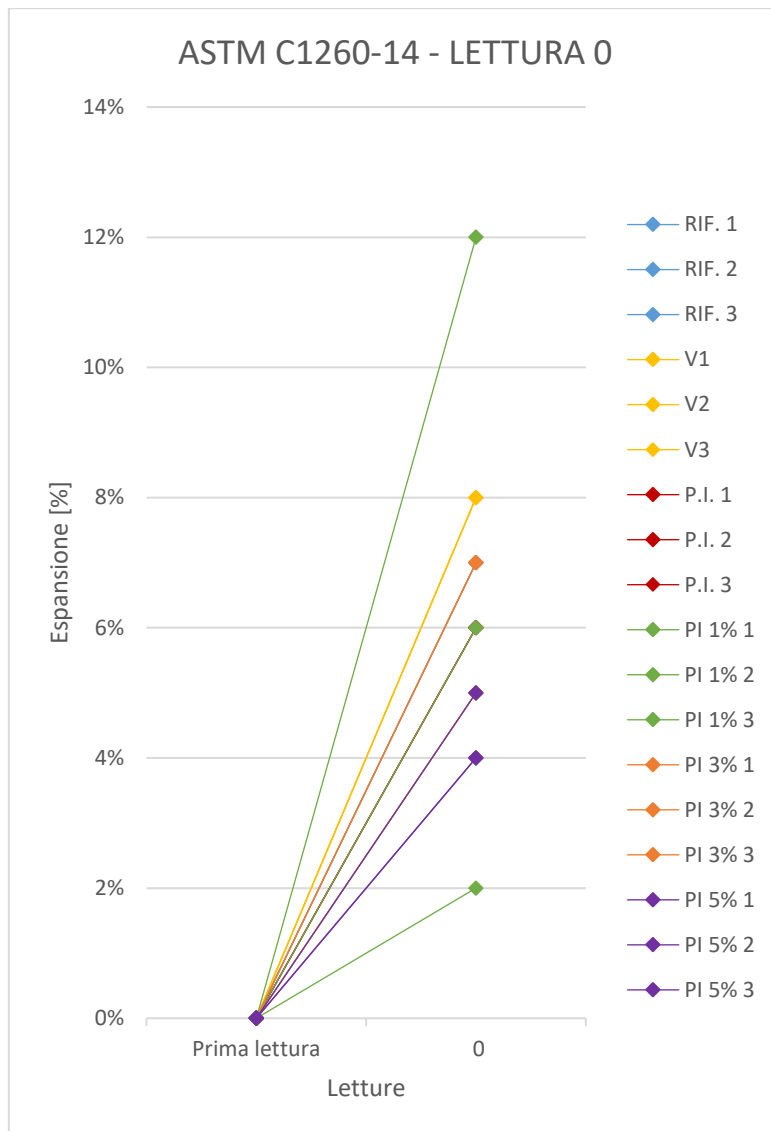


Grafico 3. Espansione alla lettura 0

Dalla “Lettura 0” risulta una modesta espansione iniziale di tutti i provini rispetto alla “Prima lettura”.

Dopo aver concluso tutte le misurazioni, i provini sono stati collocati in un contenitore con NaOH 1N sufficiente a immergerli completamente.



Figura 35. NaOH utilizzato per l'immersione dei provini

Il contenitore è stato sigillato e reinserto in forno a 80 °C.

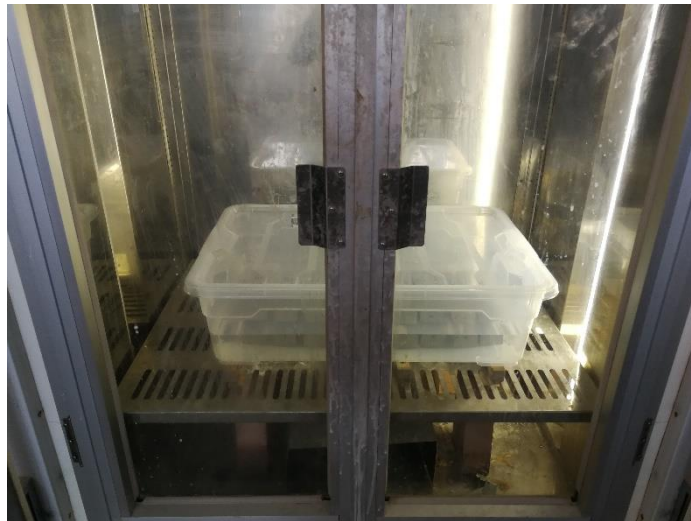


Figura 36. Contenitore in forno a 80 °C

5.8. Conservazione e successive misurazioni

Dopo aver immerso totalmente i provini nella soluzione di NaOH e averli inseriti in forno a 80°, sono state effettuate 6 misurazioni successive ogni 3/4 giorni.

La procedura seguita per le misurazioni è la stessa utilizzata la “Lettura 0”.

Lettura 3 gg

Provino	Lettura 3 gg				
	A	Comp.	Diff.	Esp.	Peso
RIF. 1	5.64	6.99	-1.35	9%	567.78
RIF. 2	5.27	6.99	-1.72	10%	568.44
RIF. 3	5.2	6.99	-1.79	8%	570.96
V1	5.62	6.99	-1.37	8%	544.15
V2	5.54	6.99	-1.45	7%	570.17
V3	6.01	6.99	-0.98	7%	568.83
P.I. 1	5.45	6.99	-1.54	6%	546.27
P.I. 2	5.63	6.99	-1.36	5%	564.56
P.I. 3	6.24	6.99	-0.75	11%	550.02
PI 1% 1	5.13	6.97	-1.84	5%	532.05
PI 1% 2	5.21	6.97	-1.76	6%	549.35
PI 1% 3	5.17	6.97	-1.8	5%	545.72
PI 3% 1	5.24	6.97	-1.73	6%	548.47
PI 3% 2	4.85	6.97	-2.12	6%	550.55
PI 3% 3	4.81	6.97	-2.16	7%	542.06
PI 5% 1	5.23	6.97	-1.74	3%	541.28
PI 5% 2	5.42	6.97	-1.55	4%	542.58
PI 5% 3	4.97	6.97	-2	3%	552.91

Tabella 16. Lettura effettuata con il micrometro a 3 gg

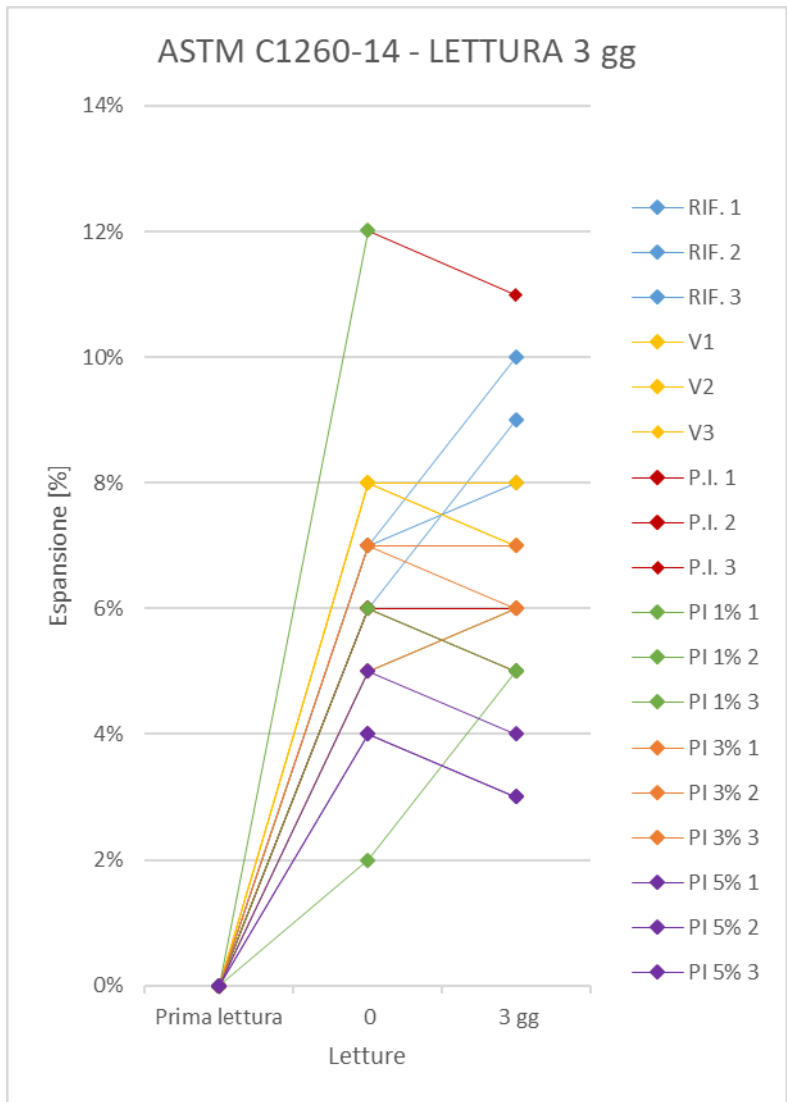


Grafico 4. Espansione fino alla Lettura 3 gg

I provini di riferimento hanno subito delle modeste espansioni, mentre tutti gli altri sono rimasti più o meno costanti.

Lettura 6 gg

Provino	Lettura 6 gg				
	A	Comp.	Diff.	Esp.	Peso
RIF. 1	5.66	6.98	-1.32	12%	567.44
RIF. 2	5.27	6.98	-1.71	11%	568.2
RIF. 3	5.19	6.98	-1.79	8%	571.04
V1	5.6	6.98	-1.38	7%	544.72
V2	5.52	6.98	-1.46	6%	570.71
V3	5.99	6.98	-0.99	6%	569.12
P.I. 1	5.42	6.98	-1.56	4%	547.03
P.I. 2	5.61	6.98	-1.37	4%	565.28
P.I. 3	6.22	6.98	-0.76	10%	550.58
PI 1% 1	5.13	6.97	-1.84	5%	532.4
PI 1% 2	5.23	6.97	-1.74	8%	549.69
PI 1% 3	5.17	6.97	-1.8	5%	546.02
PI 3% 1	5.23	6.97	-1.74	5%	548.92
PI 3% 2	4.85	6.97	-2.12	6%	551.13
PI 3% 3	4.81	6.97	-2.16	7%	542.53
PI 5% 1	5.24	6.97	-1.73	4%	541.72
PI 5% 2	5.42	6.97	-1.55	4%	542.88
PI 5% 3	4.98	6.97	-1.99	4%	553.27

Tabella 17. Lettura effettuata con il micrometro a 6 gg

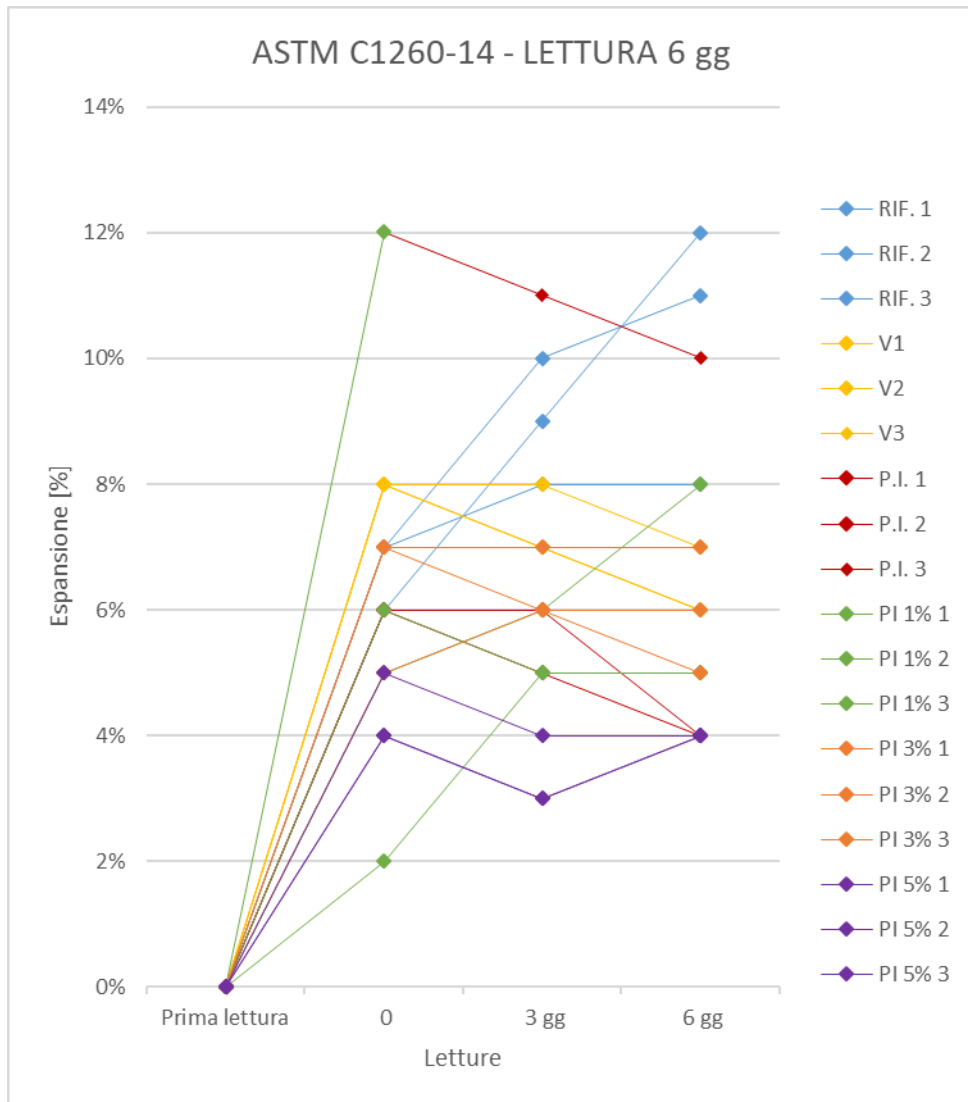


Grafico 5. Espansione fino alla Lettura 6 gg

I provini di riferimento hanno subito delle modeste espansioni, mentre tutti gli altri sono rimasti più o meno costanti.

Lettura 10 gg

Provino	Lettura 10 gg				
	A	Comp.	Diff.	Esp.	Peso
RIF. 1	5.7	6.98	-1.28	16%	567.99
RIF. 2	5.31	6.98	-1.67	15%	569
RIF. 3	5.14	6.98	-1.84	3%	572.16
V1	5.61	6.97	-1.36	9%	545.17
V2	5.54	6.97	-1.43	9%	570.81
V3	6	6.97	-0.97	8%	569.33
P.I. 1	5.43	6.97	-1.54	6%	547.56
P.I. 2	5.62	6.97	-1.35	6%	565.75
P.I. 3	6.24	6.97	-0.73	13%	551
PI 1% 1	5.13	6.97	-1.84	5%	532.43
PI 1% 2	5.22	6.97	-1.75	7%	549.59
PI 1% 3	5.17	6.97	-1.8	5%	546.03
PI 3% 1	5.23	6.97	-1.74	5%	548.85
PI 3% 2	4.85	6.97	-2.12	6%	551.03
PI 3% 3	4.81	6.97	-2.16	7%	542.57
PI 5% 1	5.24	6.97	-1.73	4%	541.76
PI 5% 2	5.42	6.97	-1.55	4%	542.93
PI 5% 3	4.98	6.97	-1.99	4%	553.31

Tabella 18. Lettura effettuata con il micrometro a 10 gg

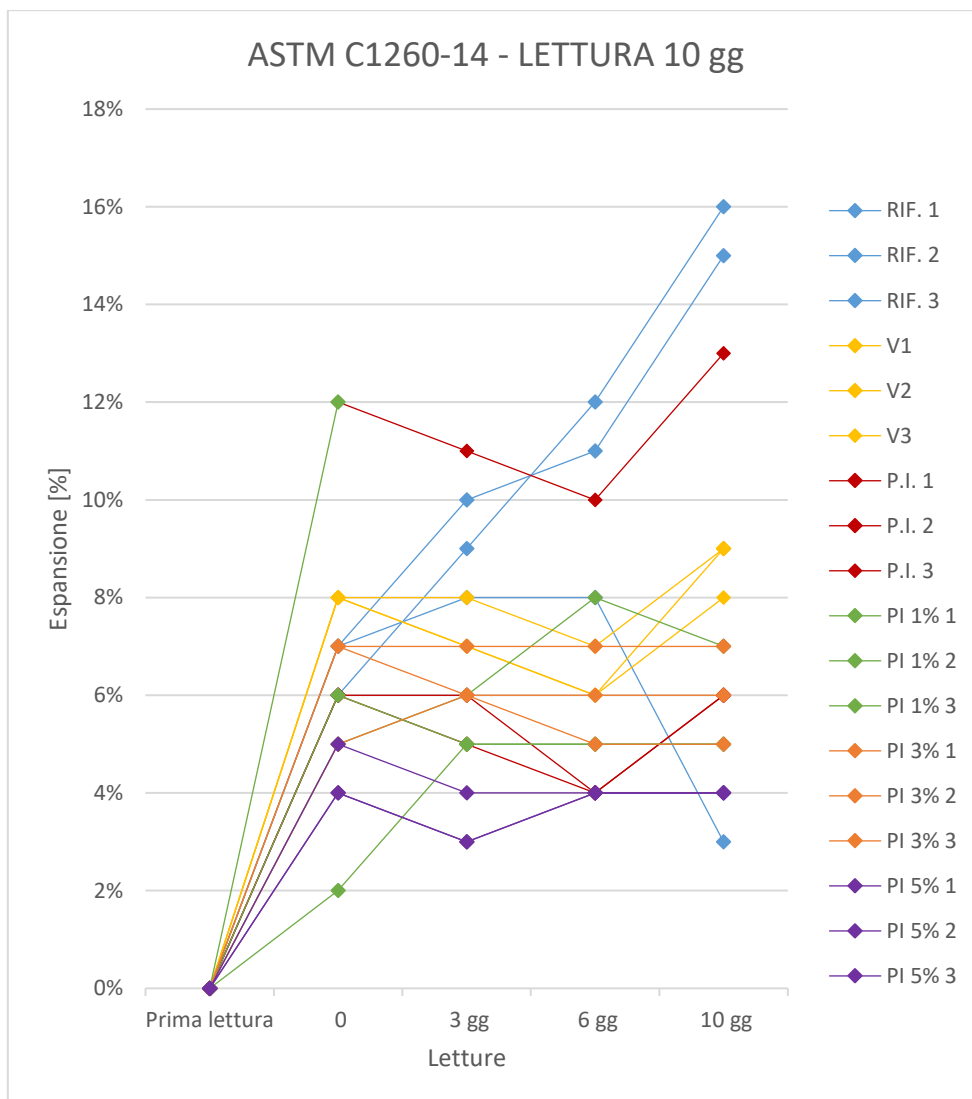


Grafico 6. Espansione fino alla Lettura 10 gg

Nei provini di riferimento, in quelli con il vetro ed in quelli su cui è stato applicato il prodotto innovativo sono state registrate delle modeste espansioni; mentre in quelli con il prodotto in massa, le espansioni sono rimaste più o meno costanti.

Lettura 13 gg

Provino	Lettura 13 gg				
	A	Comp.	Diff.	Esp.	Peso
RIF. 1	5.75	6.96	-1.21	23%	568.25
RIF. 2	5.34	6.96	-1.62	20%	569.42
RIF. 3	5.14	6.97	-1.83	4%	572.45
V1	5.61	6.97	-1.36	9%	545.39
V2	5.54	6.97	-1.43	9%	571.1
V3	6	6.97	-0.97	8%	569.61
P.I. 1	5.43	6.97	-1.54	6%	547.84
P.I. 2	5.63	6.97	-1.34	7%	565.95
P.I. 3	6.24	6.97	-0.73	13%	551.17
PI 1% 1	5.12	6.96	-1.84	5%	532.92
PI 1% 2	5.21	6.96	-1.75	7%	549.8
PI 1% 3	5.17	6.96	-1.79	6%	546.45
PI 3% 1	5.23	6.96	-1.73	6%	553.47
PI 3% 2	4.85	6.96	-2.11	7%	551.47
PI 3% 3	4.81	6.96	-2.15	8%	542.9
PI 5% 1	5.24	6.96	-1.72	5%	542.12
PI 5% 2	5.42	6.96	-1.54	5%	542.77
PI 5% 3	4.98	6.96	-1.98	5%	549.16

Tabella 19. Lettura effettuata con il micrometro a 13 gg

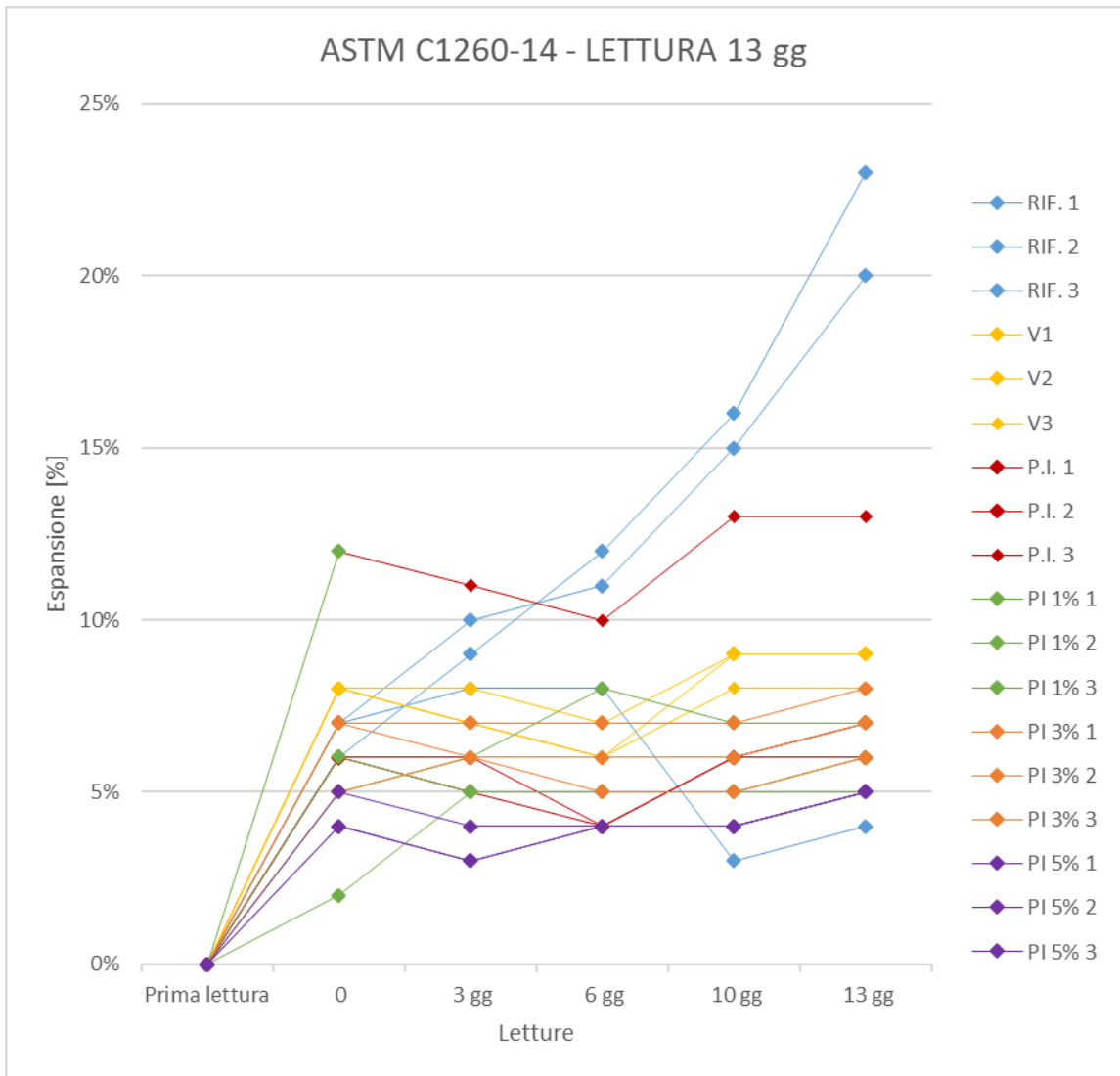


Grafico 7. Espansione fino alla Lettura 13 gg

L'espansione dei provini di riferimento è molto elevata, mentre in tutti gli altri i valori si mantengono costanti, a parte qualche lieve incremento in quelli con il prodotto in massa al 3% e al 5%.

Lettura 17 gg

Provino	Lettura 17 gg				
	A	Comp.	Diff.	Esp.	Peso
RIF. 1	5.77	6.97	-1.2	24%	568.33
RIF. 2	5.38	6.97	-1.59	23%	569.38
RIF. 3	5.18	6.97	-1.79	8%	572.46
V1	5.62	6.97	-1.35	10%	545.45
V2	5.55	6.97	-1.42	10%	571.04
V3	6	6.97	-0.97	8%	569.58
P.I. 1	5.44	6.97	-1.53	7%	547.74
P.I. 2	5.64	6.97	-1.33	8%	565.95
P.I. 3	6.24	6.97	-0.73	13%	551.17
PI 1% 1	5.13	6.97	-1.84	5%	532.68
PI 1% 2	5.22	6.97	-1.75	7%	549.81
PI 1% 3	5.17	6.97	-1.8	5%	546.35
PI 3% 1	5.24	6.97	-1.73	6%	549.1
PI 3% 2	4.85	6.97	-2.12	6%	551.25
PI 3% 3	4.81	6.97	-2.16	7%	542.77
PI 5% 1	5.24	6.97	-1.73	4%	541.83
PI 5% 2	5.42	6.97	-1.55	4%	543.08
PI 5% 3	4.98	6.97	-1.99	4%	553.63

Tabella 20. Lettura effettuata con il micrometro a 17 gg

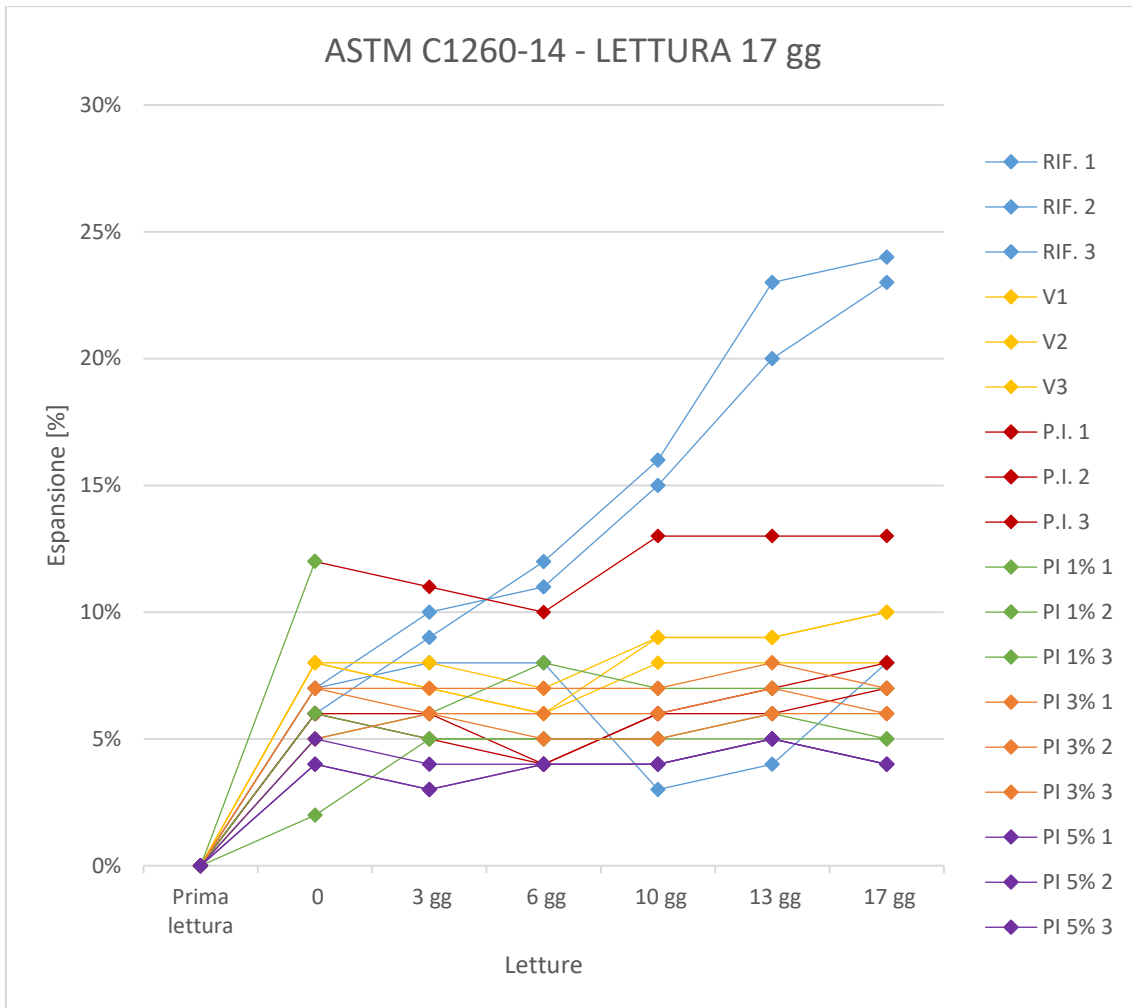


Grafico 8. Espansione fino alla Lettura 17 gg

L'espansione aumenta modestamente nei provini di riferimento, mentre in tutti gli altri rimane più o meno costante.

Lettura 20 gg

Provino	Lettura 20 gg				
	A	Comp.	Diff.	Esp.	Peso
RIF. 1	5.8	6.98	-1.18	26%	568.81
RIF. 2	5.41	6.98	-1.57	25%	569.47
RIF. 3	5.21	6.98	-1.77	10%	572.72
V1	5.61	6.97	-1.36	9%	545.84
V2	5.54	6.97	-1.43	9%	571.59
V3	5.99	6.97	-0.98	7%	570.09
P.I. 1	5.43	6.97	-1.54	6%	548.16
P.I. 2	5.62	6.97	-1.35	6%	566.24
P.I. 3	6.23	6.97	-0.74	12%	551.48
PI 1% 1	5.13	6.97	-1.84	5%	532.45
PI 1% 2	5.18	6.92	-1.74	8%	549.62
PI 1% 3	5.13	6.92	-1.79	6%	546.23
PI 3% 1	5.19	6.92	-1.73	6%	549.09
PI 3% 2	4.81	6.92	-2.11	7%	551.28
PI 3% 3	4.76	6.92	-2.16	7%	542.8
PI 5% 1	5.19	6.92	-1.73	4%	542.03
PI 5% 2	5.38	6.92	-1.54	5%	543.18
PI 5% 3	4.93	6.92	-1.99	4%	553.54

Tabella 21. Lettura effettuata con il micrometro a 20 gg

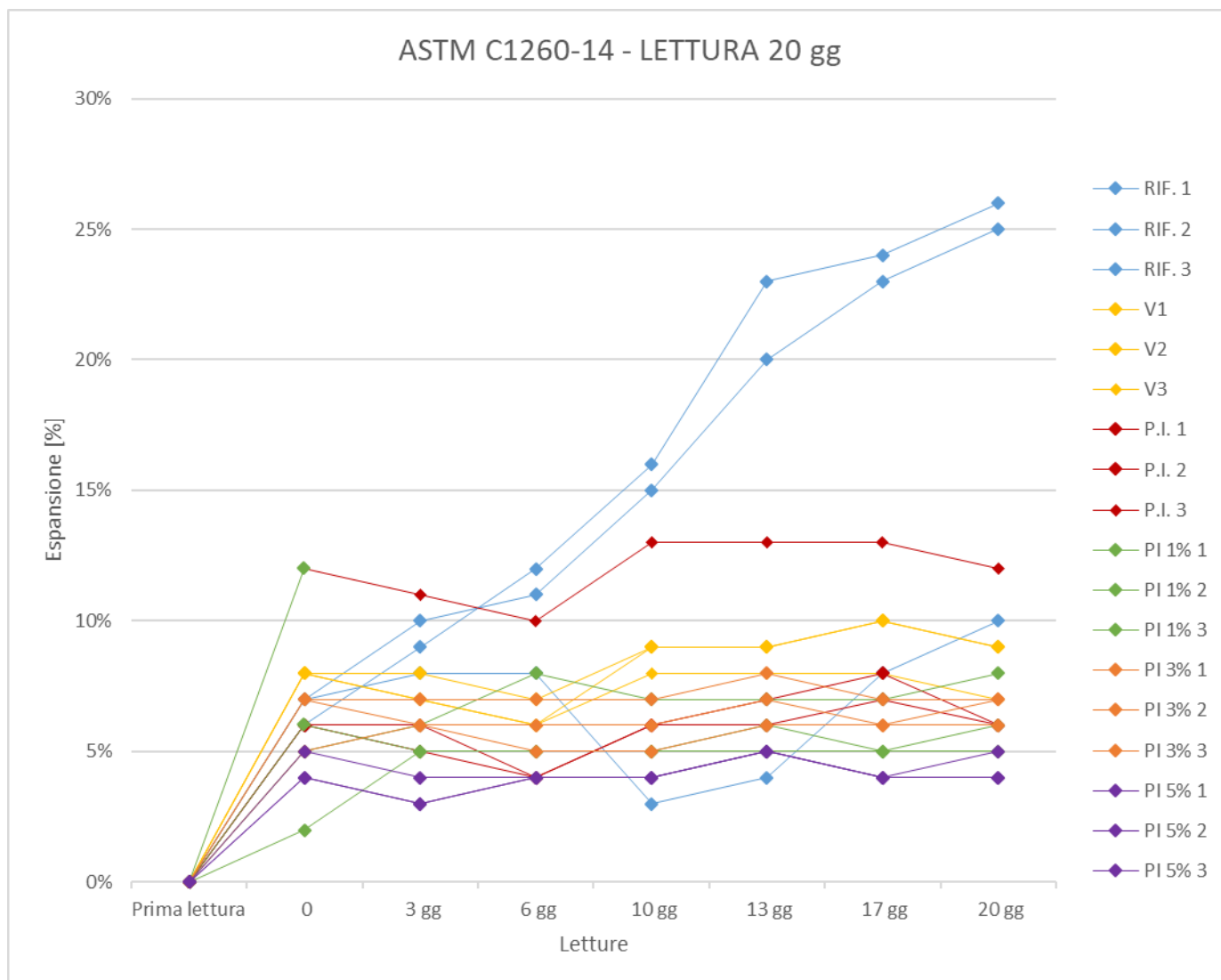


Grafico 9. Espansione fino alla Lettura 20 gg

L'espansione continua ad aumentare nei provini di riferimento, si registra invece una lieve diminuzione nei valori relativi ai provini con vetro e con prodotto innovativo in superficie; invece, rimane più o meno costante l'espansione nei provini con il prodotto in massa.

5.9. Commento dei risultati

Osservando i risultati ottenuti è possibile affermare che c'è un'evidente differenza tra i provini di riferimento e quelli con il prodotto innovativo, sia esso applicato in superficie che inserito nella miscela.

L'utilizzo del vetro, però, non ha portato ai risultati attesi. Tale esito può essere attribuito soprattutto alla granulometria del vetro utilizzata. Infatti, studi dimostrano che non si rivela alcuna evidenza di espansione ASR quando si aggiunge polvere di vetro (con granulometria fino a 0.3 mm) alla miscela di malta; gli effetti più evidenti si hanno, invece, con una granulometria maggiore di 8 mm e in sostituzione totale (100%) della sabbia. Avendo utilizzato un vetro trasparente in sostituzione al 75% e con Dmax di 4 mm costituito in buona percentuale da parte fine, ne consegue un'espansione ASR molto più limitata, come emerge dalle letture effettuate.

Pertanto, nonostante la bassa espansione riscontrata con l'utilizzo del vetro, si ritiene il test effettuato soddisfacente, in quanto risulta un'evidente differenza nei provini con il prodotto innovativo rispetto ai provini di riferimento.

6. Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di testare un prodotto innovativo idrorepellente e di mitigazione/annullamento della reazione alcali-aggregato.

La scheda tecnica del prodotto prevede l'applicazione in superficie in più strati, ma per avere un quadro più generale e risultati il più completi possibile, in un test si è deciso di utilizzare il prodotto anche nella miscela in tre diversi punti percentuale calcolati rispetto al legante.

Dall'osservazione e dalle analisi dei risultati ottenuti in entrambe le prove, si può affermare che il prodotto risponde correttamente ai requisiti di "capacità idrorepellente" e "mitigazione/annullamento della reazione alcali-aggregato".

L'utilizzo del vetro trasparente, invece, non ha portato agli effetti previsti (come descritto in precedenza), ma risulta comunque una evidente differenza tra i provini di riferimento e quelli con il prodotto; pertanto, si può ritenere soddisfacente il risultato raggiunto con il presente lavoro.

7. Bibliografia

- https://www.colacem.com/it/it/cem_ii_all_425_r
- <http://esincalce.com/prodotti/sabbia-0-3/>
- C642-13 – “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete
- C1260-14 – “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”
- ASTM C490/C490M – “Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete”
- “Reuse of recycled glass in mortar manufacturing” di Valeria Corinaldesi, Alessandro Nardinocchi & Jacopo Donnini (2016)

8. Ringraziamenti

Al termine di questo percorso, non posso non ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato fino a questo traguardo e che hanno contribuito alla mia crescita personale oltre che professionale.

Prima di tutto ci tengo a dare un sentito ringraziamento alla professoressa **Valeria Corinaldesi**, per avermi guidato e supportato nella fase più importante del mio percorso accademico.

Un immenso grazie all'Ing. **Jacopo Donnini**, correlatore di tesi, per il supporto costante, le dritte indispensabili e la sua complicità nella realizzazione di ogni passaggio del mio lavoro di tesi.