



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile ed Ambientale

Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica

**VALORIZZAZIONE DI RIFIUTI ELETTRICI ED ELETTRONICI COME
ADDITIVI IN PRODOTTI CEMENTIZI: STUDIO DELLE PROPRIETÀ
FISICHE, MECCANICHE ED AMBIENTALI**

VALORIZATION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC WASTE AS ADDITIVES IN CEMENTITIOUS
PRODUCTS: STUDY OF PHYSICAL, MECHANICAL AND ENVIRONMENTAL PROPERTIES

Relatrice:

Prof.ssa Maria Letizia Ruello

Tesi di Laurea di:

Iobbi Veronica

Correlatori:

Ing. Chiara Giosuè

Dott. Alessandro Becci

A.A. 2020/2021

Indice

1.Introduzione.....	3
1.1 Scopo	
1.2 Schermi LCD	
1.3 Indio	
1.4 Additivo aerante	
2. Materiali utilizzati.....	8
2.1 Frammenti di LCD	
2.2 CEM II/A-LL 42,5 R	
2.3 Sabbia del Po	
2.4 Additivo superfluidificante Dynamon SP1	
2.5 Additivo aerante Mapeair AE2	
3.Metodi e caratterizzazione.....	12
3.1 Idoneità aggregati: cloruri e solfati	
3.2 Mix design 1	
3.2.1 Getto	
3.3 Prove sui campioni	
3.3.1 Lavorabilità	
3.3.2 Densità	
3.3.3 Modulo elastico dinamico	
3.3.4 Resistenze meccaniche	

3.4 Mix design 2

3.5 Prove sui campioni

3.5.1 Porosimetria ad intrusione di mercurio

3.5.2 Assorbimento d'acqua per capillarità

3.5.3 Microscopia elettronica a scansione

3.5.4 Test di rilascio in acqua

4. Relazioni tra risultati.....	48
5. Conclusioni.....	51
6. Appendice.....	52
7. Bibliografia e sitografia.....	61

1.Introduzione

1.1 Scopo

La circolarità e il riciclo delle materie prime sono parti integranti della transizione verso un'economia climaticamente neutra. L'estensione del ciclo di vita del prodotto e l'uso di materie prime secondarie, contribuiranno a soddisfare una quota crescente della domanda di materie prime dell'UE. Questa ricerca è incentrata sul ciclo vitale di un particolare rifiuto RAEE: gli schermi LCD (Liquid Crystal Display). Dopo una prima macinatura in impianto di trattamento gli schermi subiscono un trattamento volto al recupero dell'indio; il materiale di scarto di questo processo dovrà essere trattato e valorizzato. Lo scopo di questa ricerca è di studiare su scala pilota la possibilità di riutilizzare il materiale in uscita dal processo di lisciviazione dell'Indio come additivo aerante in malte cementizie. Per verificare la fattibilità economica e ambientale dell'intero processo vengono analizzate le proprietà fisiche, meccaniche ed ambientali del prodotto ottenuto e confrontate con le caratteristiche garantite da additivi commerciali. Nella ricerca precedente, effettuata a scala laboratorio, è stata evidenziata la necessità di dosare adeguatamente l'aerante commerciale in modo da poter fungere da riferimento ottimale per i provini sperimentali. Inoltre, sarà importante definire il dosaggio e la granulometria di LCD in grado di garantire le migliori prestazioni al prodotto finale.

1.2 Schermi LCD

Il principio di funzionamento di uno schermo LCD è basato sulle proprietà ottiche di particolari sostanze chiamate cristalli liquidi. Fra le tecnologie per realizzare gli schermi piatti, quella basata sui cristalli liquidi ha avuto negli ultimi anni una rapida evoluzione in termini di prestazioni e dimensioni trovando molte applicazioni in ambito tecnologico e informatico.

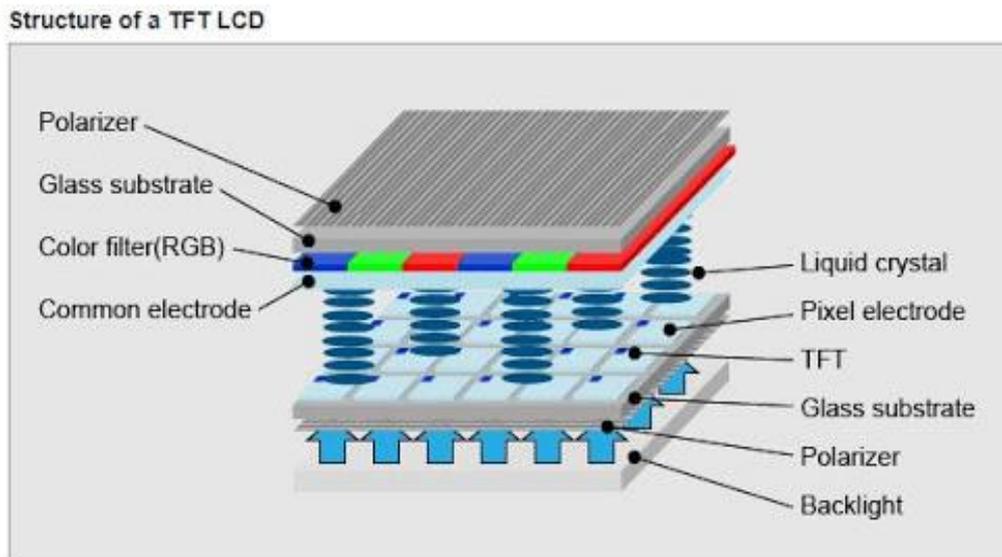


Figura 1 - struttura schermo LCD ¹

In uno schermo LCD i cristalli liquidi sono racchiusi fra due superfici vetrose, ricoperte da sottili film polimerici e ossidi di metallo, provviste di numerosissimi contatti elettrici. Ogni contatto elettrico comanda una piccola porzione del pannello identificabile come un pixel composto da tre sub-pixel, uno per ogni colore primario (rosso, verde e blu). Nelle facce esterne dei pannelli vetrosi, sono posti due filtri polarizzatori disposti su assi perpendicolari tra loro. In assenza di campo elettrico i cristalli liquidi torcono di 90° la polarizzazione della luce che arriva da uno dei polarizzatori, permettendole di passare attraverso l'altro. Quando il campo elettrico viene attivato le molecole del liquido si allineano parallelamente al campo elettrico, limitando la rotazione della luce entrante.

In questa maniera se i cristalli sono completamente allineati col campo, la luce che vi passa attraverso arriva polarizzata perpendicolarmente al secondo polarizzatore, e viene quindi bloccata del tutto facendo apparire il pixel non illuminato. Controllando la torsione dei cristalli liquidi in un pixel, si può quindi regolare la quantità di luce passante.

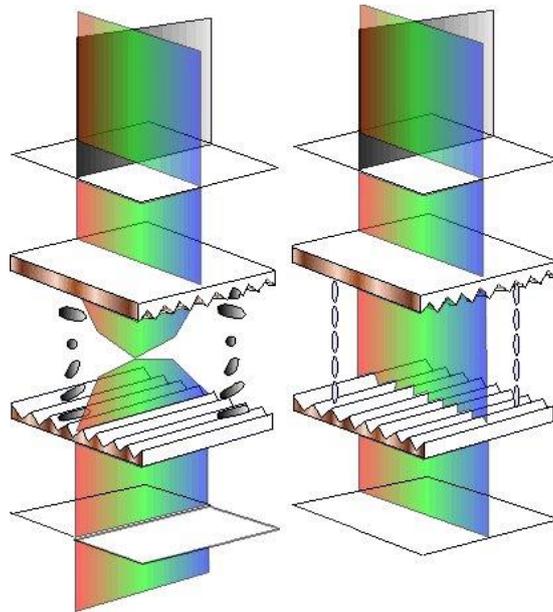


Figura 2 - meccanismo di funzionamento dei cristalli liquidi. Comportamento di un pixel in assenza e in presenza di campo elettrico ²

Gli schermi LCD possono essere usati in due modalità denominate trasmissivo e riflettivo. Gli schermi di tipo trasmissivo sono illuminati da un lato e vengono visti dall'altro. In pratica una luce viene posizionata sul retro dello schermo e i cristalli liquidi agiscono da filtro. Gli schermi LCD di tipo riflettivo usano invece la luce presente nell'ambiente che viene riflessa da uno specchio posto dietro lo schermo.

1.3 Indio

Gli schermi LCD sono composti principalmente da vetro plastica e metalli. Un metallo di particolare interesse di cui è formato il pannello è l'indio (In). L'indio è un metallo duttile, malleabile di colore bianco-argenteo, brillante e lucido piuttosto raro nella crosta terrestre. A temperatura ambiente è stabile in aria e in acqua mentre si discioglie facilmente in acidi minerali. Il quantitativo di indio consumato annualmente in tutto il mondo viene utilizzato principalmente nella produzione di pannelli a cristalli liquidi³. Ogni tre anni la Commissione Europea riesamina l'elenco delle materie prime critiche per l'UE sulla base dell'importanza economica e del rischio di approvvigionamento. L'indio è presente nella lista dei "Critical Raw Materials" del 2020 presentando una criticità in fase di trasformazione. Si confermano come principali produttori a livello mondiale Cina e Corea, l'Europa rimane però indipendente risultando esportatrice netta, grazie all'approvvigionamento interno garantito principalmente da Francia e Belgio. La sua scarsità nella crosta terrestre e il suo impiego nel campo delle applicazioni tecnologiche e delle energie rinnovabili rendono però importante trovare dei metodi di recupero efficaci⁴.

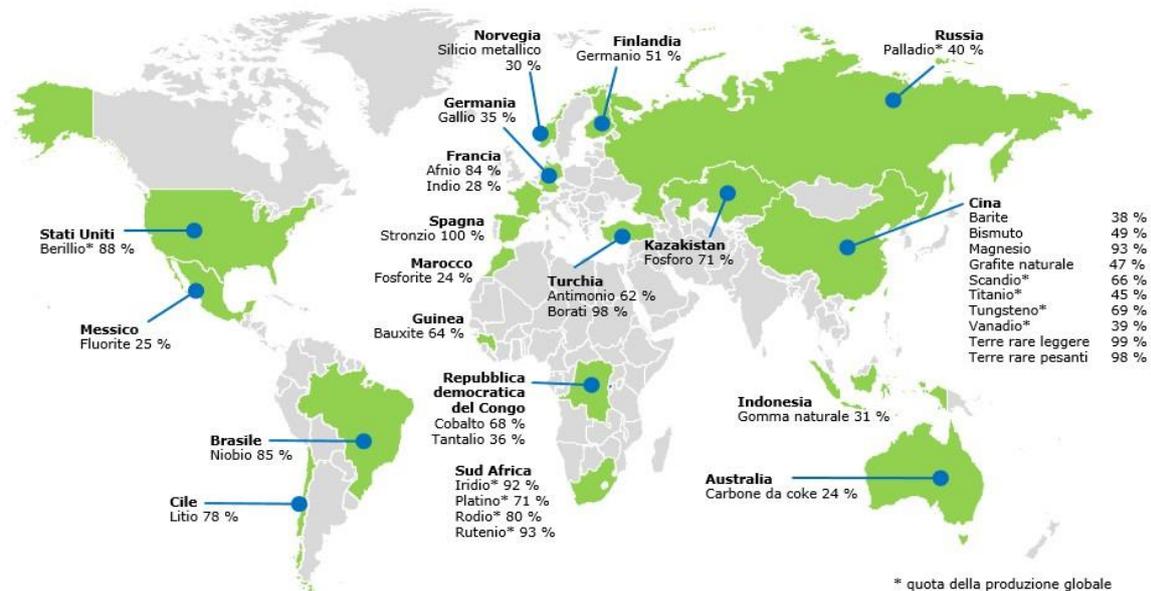


Figura 3 - Principali paesi fornitori di materie prime critiche all'UE

L'unione Europea nel 2015 finanzia il progetto "Critical Raw Material Closed Loop Recovery" per sostenere la ricerca sul recupero di materie prime critiche. In particolare, per i rifiuti RAEE, l'obiettivo è di aumentare il tasso di recupero delle materie prime in essi contenute del 20% entro il 2030 e quindi di creare flussi commerciali alternativi e sostenibili⁵.

1.4 Additivo aerante

La norma UNI EN 934-2 "Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 2: Additivi per calcestruzzo - Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura" definisce additivo per calcestruzzo un materiale aggiunto all'impasto, durante il procedimento di miscelazione, in quantità non maggiore del 5% in massa rispetto al cemento, allo scopo di modificare le proprietà della miscela allo stato fresco e/o indurito.

Gli additivi aeranti, aggiunti in piccole quantità (0,02-0,05% sul cemento), modificano la tensione superficiale dell'acqua favorendo così la formazione di microbolle di dimensioni 100-300µm. La presenza di questi micropori nella pasta cementizia ha effetti importanti sia sulle proprietà allo stato fresco che indurito. Garantiscono infatti una riduzione degli attriti tra le particelle e quindi una maggiore lavorabilità, facilitando così la messa in opera. Assicurano inoltre una maggiore resistenza ai cicli gelo-disgelo; permettono di scaricare la pressione idraulica, causata dall'acqua che gelando aumenta il suo volume, evitando così sollecitazioni di trazione interna. Ad un aumento della porosità corrisponde però una diminuzione della resistenza meccanica; ogni 1% di aria inserita equivale ad un calo del 5% della resistenza meccanica. La normativa UNI EN 206-1 stabilisce il 4% come valore massimo di aria inserita, per rimanere al di sotto del 20% di perdita di resistenza.

In questa tesi verrà utilizzato il materiale in uscita dal processo di estrazione dell'indio, con diverse granulometrie e percentuali sul peso del cemento per verificarne il possibile utilizzo come additivo aerante. Verranno analizzate quindi le proprietà allo stato fresco e lo sviluppo delle porosità e delle resistenze allo stato indurito.

2. Materiali utilizzati

2.1 Frammenti di LCD

Oggetto di questa ricerca condotta su scala pilota è il display a cristalli liquidi; questo tipo di rifiuto è stato ricevuto direttamente dall'impianto di trattamento RIMEL S.r.l. (Pollenza, Provincia di Macerata) che riceve e tratta 30 tonnellate di rifiuti RAEE al giorno, dopo essere stato sottoposto ad una macinazione primaria che ne ha ridotto le dimensioni massime a 10 cm⁶. Il materiale viene quindi macinato con un mulino a biglie e successivamente setacciato, per ottenere una dimensione massima di 1 mm. Si procede poi all'estrazione dell'indio tramite una soluzione 2M di acido solforico (H₂SO₄); processo di lisciviazione brevettato dal DISVA (Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente) dell'Università Politecnica delle Marche. Il materiale rimanente viene quindi lavato per eliminare l'acido residuo; vengono testati diversi lavaggi con durate e rapporti materiale/acqua differenti. Lo scopo infatti è quello di arrivare al processo più efficiente in termini di rimozione dell'acido, di energia consumata e di produzione di acque reflue. Questo trattamento ne permette il riutilizzo in malte cementizie evitando reazioni chimiche e fenomeni espansivi. Il materiale così ottenuto, una volta essiccato, viene diviso in una frazione tal quale e una frazione fine (<0,075mm), con le quali vengono confezionate le varie miscele.



Figura 4 - LCD umido dopo lisciviazione e lavaggi

2.2 CEM II/A-LL 42,5 R

In questa ricerca è stato utilizzato un CEM II/A-LL 42,5 R ovvero un cemento portland di miscela di tipo II, appartenente alla classe di resistenza 42,5. La norma UNI EN 197-1 “Cemento – Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni” elenca anzitutto i costituenti minerali che, possono entrare nella composizione dei cementi comuni. La norma prevede 5 tipi di cementi (I, II, III, IV, V), caratterizzati dalla percentuale decrescente del costituente principale (il clinker) 27 sottotipi e 6 classi di resistenza.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa ^{a)})											
			Costituenti principali										Costituenti secondari	
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcareo					
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 -----→										0-5	
	CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 -----→										0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 -----→					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 -----→					-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 -----→		-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 -----→		-	-	-	-	-	0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.
c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi compositi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento (per esempio vedere punto 8).

Figura 5 - Classificazione cementi (uni en 197-1)

Per ogni classe di resistenza normalizzata si definiscono due classi di resistenza iniziale (2-7 gg), pertanto secondo le UNI EN 197/1 esistono le seguenti classi di resistenza del cemento:

Classe di resistenza	Resistenza a compressione (MPa)			
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata	
	2 giorni	7 giorni	28 giorni	
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5
32,5 R	≥10,0	-		
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5
42,5 R	≥20,0	-		
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	-
52,5 R	≥30,0	-		

Figura 5 - Classi di resistenza del cemento ⁷

2.3 Sabbia del Po

È stata utilizzata come aggregato fine nelle malte cementizie la sabbia del Po. È una sabbia silicea di origine alluvionale con grani di forma arrotondata di dimensioni comprese tra 0 e 2 mm. Per controllare il contenuto d'acqua ed evitare di influenzare significativamente il rapporto a/c, la sabbia è stata distribuita su un telo e lasciata essiccare all'aria prima dell'utilizzo.

2.4 Additivo superfluidificante Dynamon-SP1

Gli additivi superfluidificanti sono prodotti per sintesi chimica e basati su polimeri idrosolubili. La quantità di additivo impiegata, rispetto alla massa del cemento, è compresa tra 0,6% -1%. L'aggiunta di superfluidificante nell'impasto determina miglioramenti prestazionali che dipendono dal suo effetto deflocculante. I vari granuli di cemento infatti tendono naturalmente ad agglomerarsi e flocculare, in presenza dei superfluidificanti, i diversi granuli sono deflocculati, cioè dispersi. Questo avviene grazie all'adsorbimento sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di superfluidificante tramite due possibili meccanismi. Per effetto della formazione di cariche elettrostatiche di segno negativo che provocano una repulsione elettrostatica (zeta potential) tra i granuli di cemento oppure per l'ingombrante presenza delle catene laterali, che impediscono ai granuli di cemento di avvicinarsi (steric hindrance) e di flocculare.

Indipendentemente dal particolare meccanismo di azione (zeta potential o steric hindrance), l'effetto deflocculante dei superfluidificanti, nei confronti degli agglomerati di cemento, può essere utilizzato in tre modi diversi:

-Mantenendo la composizione del calcestruzzo, in particolare il rapporto a/c, aumentando la fluidità della pasta e migliorando quindi la lavorabilità.

-Lasciando immutata la lavorabilità e la quantità di cemento e riducendo il contenuto d'acqua e il rapporto a/c (con un dosaggio dell'1% di additivo si può ridurre l'acqua del 15-20%).

-Mantenendo la lavorabilità ed il rapporto a/c e riducendo acqua e cemento⁸.

In questa ricerca è stato utilizzato l'additivo superfluidificante Dynamon SP1-Mapei. Questo additivo a base acrilica è stato inserito in tutte le miscele con un dosaggio inferiore all'1%.

2.5 Additivo aerante Mapeair AE2

Come evidenziato nella ricerca precedente⁶ la miscela confezionata con additivo aerante non ricade nei limiti di perdita di resistenza <20%. Si è deciso quindi di confezionare un'ulteriore miscela dimezzando il dosaggio di additivo aerante. I due provini, realizzati con additivo commerciale Mapeair AE2, sono stati presi a riferimento per confrontare le proprietà aeranti fornite dall'LCD.

3. Metodi e caratterizzazione

3.1 Idoneità aggregati: cloruri e solfati

Prima di utilizzare i frammenti di LCD nelle miscele, è necessario verificare la percentuale dello ione cloruro e dello ione solfato presenti nel materiale dopo i processi subiti. I lavaggi eseguiti devono infatti garantire il rispetto dei limiti indicati dalla normativa UNI-EN 8520-2:2016, redatta a completamento della UNI EN 12620-2:2008.

La presenza di ioni cloruro, oltre i limiti indicati, indebolisce l'armatura; accelerando la reazione di ossidazione dell'acciaio provoca una corrosione localizzata, che determina la riduzione della sezione. Gli ioni solfato sono già presenti nel cemento come regolatori di presa, ma il superamento di questi limiti può causare il degrado della struttura. Quando lo ione solfato, trasportato dall'acqua, penetra all'interno dell'elemento reagisce con alcuni componenti della matrice cementizia formando l'ettringite. Questo minerale, aumentando il volume durante la sua formazione, causa lo sgretolamento dell'elemento strutturale.

I limiti prescritti dalla normativa sono i seguenti:

Limiti per i SOLFATI presenti all'interno dell'inerte:

- 0.2% per l'inerte
- 0.8% se presente nella frazione fine

Limiti per i CLORURI presenti:

- 0.03%

Come evidenziato nelle precedenti ricerche, due lavaggi garantirebbero il rispetto dei limiti ma renderebbero il processo non vantaggioso per la quantità di acque reflue da smaltire. Il primo campione studiato, dopo 24h dalla lisciviazione, ha subito un solo lavaggio di 2 ore con un rapporto materiale/acqua 1Kg:2L seguito da essiccazione in stufa a 80°C per 24 ore. Poiché al termine dell'essiccazione il materiale risulta danneggiato, la prova è stata ripetuta prima con campione ancora umido e poi con un campione lasciato essiccare all'aria. Per la determinazione dell'idoneità come aggregati, i rapporti campione/acqua fissati dalla norma sono 1Kg/1L per i cloruri e 1Kg/2L per i solfati.

Per la prima prova la massa considerata di LCD è comprensiva di acqua, essendo il provino umido.

PROVA N.1	PROVINO 1 Cl	PROVINO 2 SO4	PROVINO 3 H2O DISTILLATA
TARA (g)	12,15	11,92	14,87
LCD (g)	20,01	20	/
ACQUA DISTILLATA (ml)	20,07	40	30
Tempo di rotazione	1h	24h	/
Velocità di rotazione	5 giri/minuto	5 giri/minuto	/

Tabella 1 - Materiali utilizzati prova n.1

Risultati ottenuti:

	PROVINO SOLFATI	PROVINO ACQUA DISTILLATA
CONCENTRAZIONE SOLFATI (mg/l)	1300	/
CONCENTRAZIONE SOLFATI (g/l)	1,3	/
SOLFATI (%)	0,52%	/
LIMITI NORMATIVA SOLFATI	<0,2%	

Tabella 2 - Risultati prova n.1

I risultati di questa prima prova mostrano un superamento significativo del limite sei solfati. Non è però un risultato attendibile in quanto essendo il provino umido, il rapporto 1Kg/2L non è stato rispettato.

È stato quindi preparato un secondo campione con il materiale lasciato essiccare all'aria:

PROVA N.2	PROVINO 1 Cl	PROVINO 2 SO4	PROVINO 3 H2O DISTILLATA
TARA (g)	/	11,29	14,87
LCD (g)	/	20	/
ACQUA DISTILLATA (ml)	/	40	30
Tempo di rotazione	1h	24h	
Velocità di rotazione	5 giri/minuto	5 giri/minuto	

Tabella 3 - Materiali utilizzati prova n.2

Risultati ottenuti:

	PROVINO SOLFATI	PROVINO ACQUA DISTILLATA
CONCENTRAZIONE SOLFATI (mg/l)	1500	/
CONCENTRAZIONE SOLFATI (g/l)	1,5	
SOLFATI (%)	0,3%	
LIMITI NORMATIVA SOLFATI	<0,2%	

Tabella 4 - Risultati prova n.2

I cloruri, come evidenziato anche nella precedente ricerca ⁶, rientrano ampiamente nei limiti imposti, non sono quindi state effettuate ulteriori analisi. Il limite dei solfati viene invece superato anche in questo caso, anche se in misura più contenuta. Tali valori non destano nessuna preoccupazione anche perché i limiti considerati per la verifica di idoneità si riferiscono all'utilizzo del materiale come aggregato, con quantitativi di utilizzo nel mix design ben superiori a quelli di un loro impiego come additivo.

3.2 Mix design 1

Con il materiale analizzato è stato eseguito un getto per l'analisi delle proprietà allo stato fresco e lo sviluppo delle resistenze meccaniche nel tempo.

Rapporti utilizzati:

- Rapporto acqua/cemento (a/c): 0,6
- Rapporto inerte/cemento (i/c): 3

Parametri utilizzati:

- Superfluidificante: da 0.6 L a 1.2 L ogni 100 kg di cemento aerante:
- Aerante: da 15 g a 100 g ogni 100 kg di cemento

Materiali utilizzati:

- Acqua (1g/cm³)
- Superfluidificante MAPEI Dynamon SP1
- Aerante MAPEI Mapeair AE2
- Aggregato: sabbia silicea del Po 0-2mm (1,460 g/cm³)
- Cemento: CEM II/A-LL 42,5 R Tecnozem (3,077 g/cm³)
- LCD fine (<0,075mm)
- LCD tal quale (0,075mm-1mm)

	ACQUA	CEMENTO	LCD <75 mm	LCD T.Q.	AGGREGATO	SUPERFLUIDIFICANTE	AE
	g	g	g	g	g	g	g
RIF	497,66	829,44	0,00	0,00	2488,32	5,47	0,00
RIF AE 0,25	497,66	829,44	0,00	0,00	2488,32	5,47	0,41
RIF AE 0,5	497,66	829,44	0,00	0,00	2488,32	5,47	0,83
LCD2% FINE	331,78	552,96	11,06	0,00	1658,88	3,65	0,00
LCD2%TQ	497,66	552,96	0,00	11,06	2488,32	3,65	0,00
LCD4%TQ	497,66	829,44	0,00	33,18	2488,32	5,47	0,00

Tabella 5 - Mix design 1

Per quanto riguarda il volume dei getti sono state prese in considerazione sia il numero di provini da realizzare necessari per l'esecuzione delle varie prove (prove di resistenza meccanica a 2/7/28 giorni), che la quantità effettiva disponibile di LCD fine.

Prove Meccaniche	2 giorni	7 giorni	28 giorni
RIF	2	2	2
RIF AE 0,25	2	2	2
RIF AE 0,5	2	2	2
LCD2% FINE	1	1	2
LCD 2%TQ	2	2	2
LCD 4%TQ	2	2	2

Tabella 6 - Numero di Provini da Realizzare

3.2.1 Getto

Il procedimento seguito per la preparazione della miscela e il confezionamento dei provini è il seguente:

1. Pesatura di tutte le diverse componenti della miscela
2. Miscelazione manuale di aggregato, legante e dove previsto LCD
3. Miscelazione manuale di acqua e additivi
4. Aggiunta nella bacinella di una parte di acqua e del materiale solido
5. Miscelazione con miscelatore elettrico per 60 secondi a velocità bassa con aggiunta graduale di acqua e additivi
6. Miscelazione manuale con cazzuola per riportare al centro la malta che aderisce alle pareti
7. Miscelazione con miscelatore elettrico ad alta velocità per 180 secondi
8. Prova di lavorabilità (prova di spandimento alla tavola a scosse)
9. Calcolo densità fresca della malta
10. La malta viene messa all'interno delle casseforme e vibrata sia manualmente che per un breve intervallo (5 secondi) con la tavola vibrante per ridurre l'aria all'interno dell'impasto.
11. L'impasto viene livellato con la cazzuola in modo da rendere la superficie più regolare
12. Sigillatura con pellicola e scotch dei casseri per mantenere l'umidità e segnatura con il pennarello del tipo di miscela usata
13. Il giorno seguente i provini vengono scasserati e lasciati maturare avvolti nella pellicola nella cella di stagionatura a temperatura controllata.



Figura 6 - Miscelazione con miscelatore elettrico

3.3 Prove sui campioni

3.3.1 Lavorabilità

La lavorabilità è la capacità di una miscela di muoversi e deformarsi sotto l'azione di una forza esterna ⁹. Per determinare la classe di consistenza di ogni miscela si esegue una prova di spandimento secondo la UNI-EN 1015-3:2007.

Si riempie con la malta fresca un tronco di cono metallico di diametro 10 cm, posizionato al centro della tavola a scosse. La malta deve essere introdotta in due strati, costipando ogni strato con brevi colpi di pestello per garantire un riempimento uniforme. Lo stampo viene quindi rimosso e si sottopone la tavola a 15 colpi. Il diametro della malta, che si è allargato a causa del fenomeno dello spandimento dinamico, deve essere misurato in due direzioni ortogonali. Il valore di spandimento è dato dalla media dei due risultati.



Figura 7 - Prova di lavorabilità

Provino	Diámetro 1(mm)	Diámetro 2(mm)	Diámetro medio(mm)	Figura
RIF	123	123	123	
RIF AE 0.25	113	124	118.5	
RIF AE 0.5	158	156	157	

LCD 2% FINE	128	127	127.5	
LCD 2% TQ	103	105	104	
LCD 4% TQ	123	124	123.5	

Tabella 7 - Risultati prova lavorabilità

In base alla UNI EN 1015-6:2007 le malte realizzate appartengono a due classi di consistenza: rigida (diametro<140mm) e plastica (140mm<diametro<200mm).

	Slump (mm)	Classe di consistenza
RIF	123	rigida
RIF AE 0,25	118,5	rigida
RIF AE 0,5	157	plastica
LCD 2% FINE	127,5	rigida
LCD 2% T.Q.	104	rigida
LCD 4% T.Q.	123,5	rigida

Tabella 8 - Classificazione miscela

Solo l'aggiunta di LCD fine causa un piccolo aumento della lavorabilità. L'aggiunta di LCD 4% tal quale non ha effetti significativi, mentre per l'LCD 2% tal quale si ha una riduzione della lavorabilità rispetto al riferimento. Da sottolineare inoltre che il provino RIF AE 0,25 non può essere preso a riferimento per questa prova com'è evidente dalla figura in tabella 7; è stato commesso un errore probabilmente in fase di miscelazione.

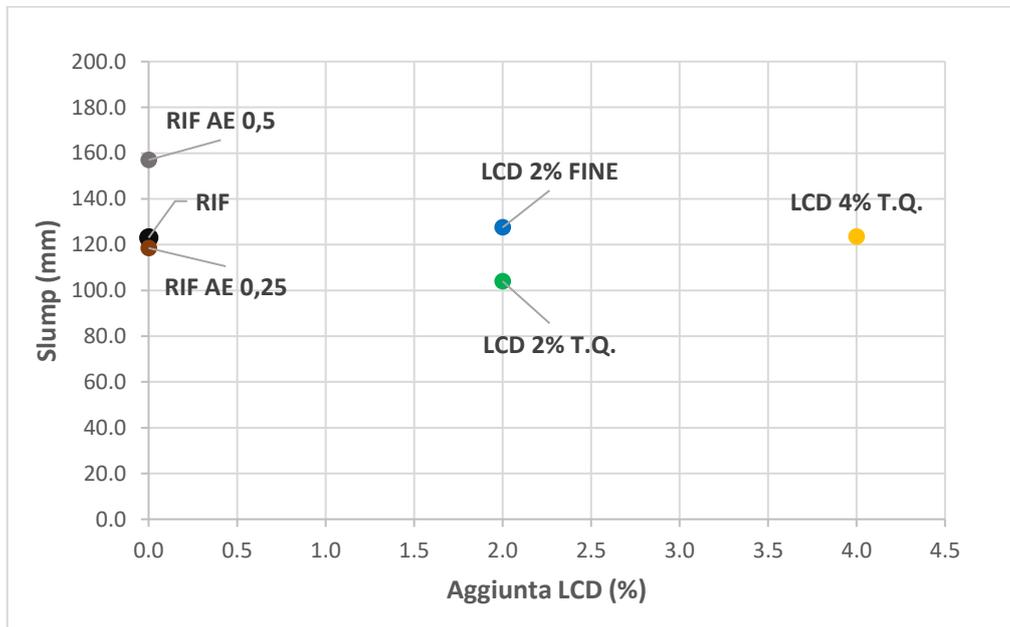


Grafico 1 - Andamento dello slump in funzione dell'aggiunta di LCD

3.3.2 Densità

Sono state calcolate sia la densità allo stato fresco sia quella allo stato indurito a 2,7,28 giorni di maturazione. Nel primo caso è stato riempito con la malta fresca un contenitore di volume e tara noti; il contenitore pieno di malta viene quindi pesato per ricavare la densità:

$$d=m/V \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Dove:

-m è la massa netta della malta

-V è il volume occupato dalla malta

Per calcolare la densità allo stato indurito, viene pesato direttamente il provino conoscendone il volume (256 cm³).

	Peso fresco (g)	Peso a 2gg (g)	Peso a 7gg (g)	Peso a 28gg (g)
RIF	209,72	542,29	535,61	516,55
RIF AE 0,25	189,65	492,91	496,58	471,40
RIF AE 0,5	192,60	490,88	485,75	460,75
LCD 2% FINE	223,60	526,55	536,15	511,28
LCD 2% T.Q.	211,24	536,97	544,20	502,88
LCD 4% T.Q.	220,33	542,89	543,78	525,07

Tabella 9 - Peso provini

	Densità fresca (g/cm ³)	Densità a 2gg (g/cm ³)	Densità a 7gg (g/cm ³)	Densità a 28gg (g/cm ³)
RIF	2,10	2,12	2,09	2,02
RIF AE 0,25	1,90	1,93	1,94	1,84
RIF AE 0,5	1,93	1,92	1,90	1,80
LCD 2% FINE	2,24	2,06	2,09	2,00
LCD 2% T.Q.	2,11	2,10	2,13	1,96
LCD 4% T.Q.	2,20	2,12	2,12	2,05

Tabella 10 - Densità

I provini con additivo commerciale, coerentemente con i risultati di lavorabilità, risultano avere un abbassamento significativo della densità allo stato fresco rispetto al riferimento. L'aggiunta di LCD invece non provoca nessuna diminuzione e anzi determina in tutti i casi un aumento della densità.

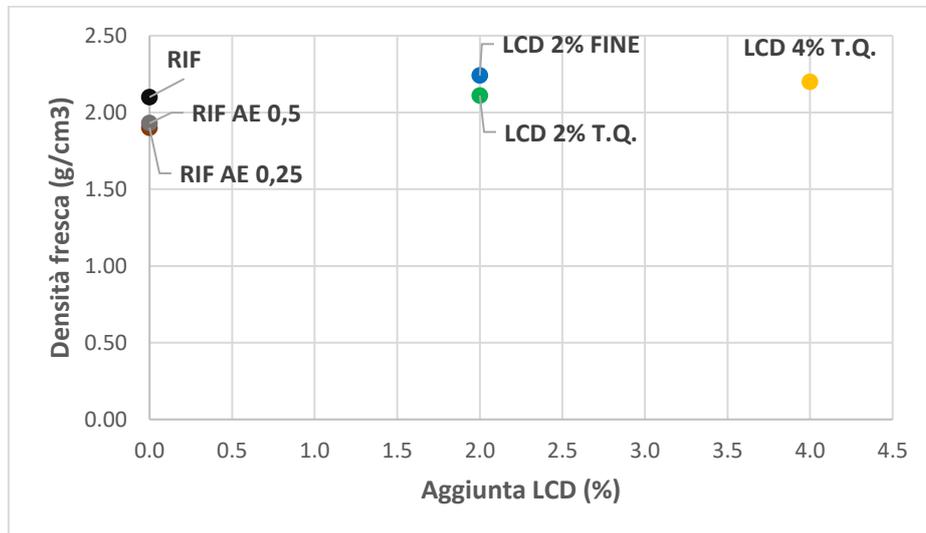


Grafico 2 - Densità fresca in funzione dell'aggiunta di LCD

L'aggiunta di un additivo aerante dovrebbe garantire una densità minore rispetto al riferimento allo stato indurito; Se osserviamo l'andamento nel tempo notiamo che questo è garantito, anche se in minima parte, dall'aggiunta del 2% di LCD, sia fine che tal quale, ma non dal 4% tal quale.

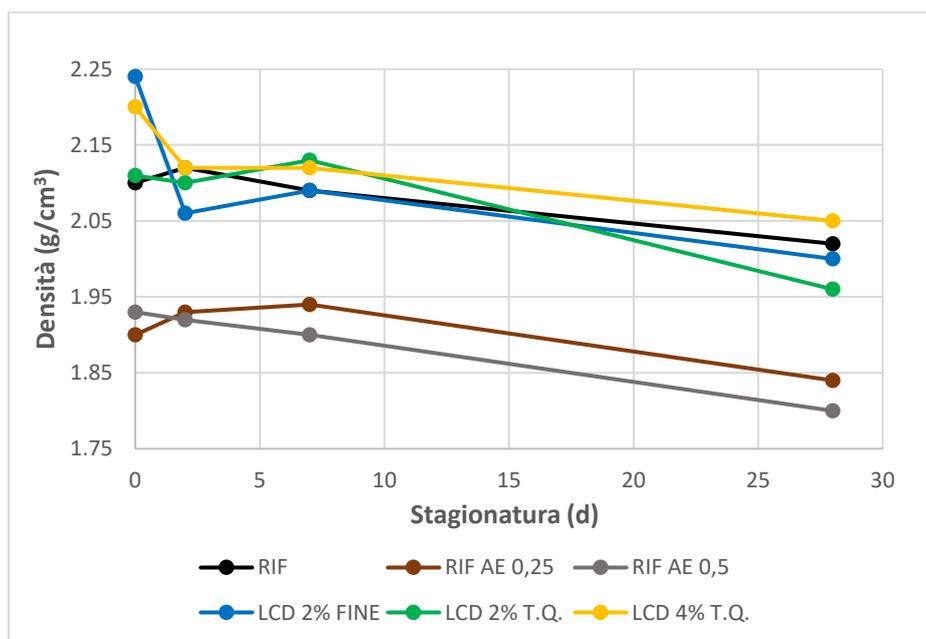


Grafico 3 - Andamento densità

3.3.3 Modulo elastico dinamico

Il modulo elastico, o modulo di Young, è un indice della rigidità del materiale e quindi delle capacità deformative e di resistenza. In questa ricerca si analizza il modulo elastico dinamico, calcolato a partire dai dati misurati attraverso l'esecuzione della prova del pundit. Tale metodologia di prova è normata dalla UNI EN 12504-4:2005 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici". Si tratta di una prova non distruttiva, mediante la quale si determina la velocità di propagazione degli impulsi delle onde ultrasoniche all'interno delle malte indurite. Il misuratore pundit è costituito da due trasduttori collegati tramite due cavi al generatore di impulsi. La prova consiste nel misurare il tempo impiegato dall'onda ad attraversare il provino, inserito tra i due trasduttori. Prima dell'inizio viene applicato uno strato di vasellina sulle facce dei trasduttori e sulle superfici del provino a contatto con essi, per garantire l'omogenizzazione del flusso. Lo strumento viene quindi tarato eseguendo la prova con un cilindro d'acciaio. Il tempo impiegato per attraversarlo deve essere di 25,3 µm; se il tempo indicato non corrisponde deve essere corretto tramite un'apposita manopola. Per garantire il corretto svolgimento queste operazioni vengono ripetute durante tutta l'esecuzione della prova. Si ricava quindi la velocità:

$$v = L / t \text{ (m/s)}$$

Dove:

-L è la lunghezza del provino di 160mm

-t è il tempo di misurato in µm

Dalla misura di velocità si ricava il modulo elastico dinamico:

$$E_{din} = \rho \cdot v^2 \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \text{ (GPa)}$$

Dove:

- ρ è la densità del provino

- v è la velocità calcolata

- ν è il modulo di Poisson del calcestruzzo che si assume pari a 0,2

La prova è stata eseguita a 7 e 28 giorni di stagionatura su ogni provino. Per il riferimento i risultati sono mediati su due provini.

	Densità (g/cm ³)	Tempo (μs)	Media tempo (μs)	Velocità (m/s)	E _{din} (GPa)
RIF E	2,10	41,1	41,1	3892,94	28,64
		40,9			
		41,2			
RIF F	2,08	42,3	42,0	3809,52	27,17
		42,0			
		41,8			
RIF AE 0,25	1,94	46,0	46,1	3470,72	21,03
		45,9			
		46,3			
RIF AE 0,5	1,90	46,2	46,1	3470,72	20,60
		46,5			
		45,7			
LCD 2% FINE	2,09	45,7	45,9	3485,84	22,86
		46,0			
		45,9			
LCD 2% T.Q.	2,13	42,4	42,2	3791,47	27,56
		42,1			
		42,2			
LCD 4% T.Q.	2,12	41,7	41,9	3818,62	27,82
		41,9			
		42,0			

Tabella 11 - Modulo elastico a 7 gg di stagionatura

	Modulo elastico dinamico (GPa)	Modulo elastico dinamico (%)
RIF	27,91	100,0%
RIF AE 0,25	21,03	-24,7%
RIF AE 0,5	20,60	-26,2%
LCD 2% FINE	22,86	-18,1%
LCD 2% T.Q.	27,56	-1,3%
LCD 4% T.Q.	27,82	-0,3%

Tabella 12 - Variazioni percentuali modulo elastico a 7 gg

Notiamo come l'aggiunta di LCD tal quale determini una minima diminuzione del modulo elastico rispetto al riferimento, non paragonabile agli effetti dell'additivo commerciale. La miscela confezionata con LCD fine invece causa una notevole diminuzione.

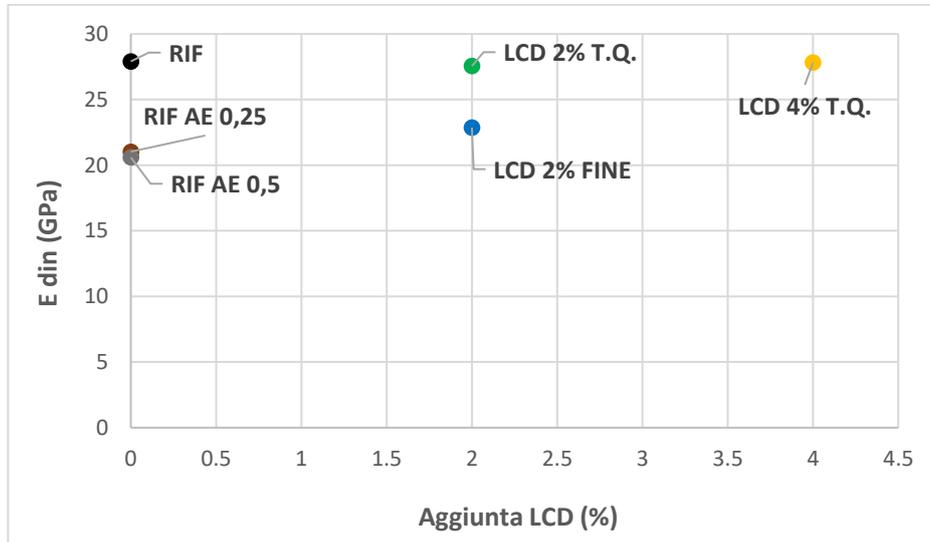


Grafico 4 - Modulo elastico a 7 gg in funzione dell'aggiunta di LCD

	Densità (g/cm ³)	Tempo (μs)	Media tempo (μs)	Velocità (m/s)	E _{din} (GPa)
RIF E	2,06	41,1	41,7	3836,93	27,30
		42,2			
		41,8			
RIF F	1,98	43,2	43,2	3703,70	24,44
		43,3			
		43,1			
RIF AE 0,25	1,84	46,6	46,7	3426,12	19,44
		46,7			
		46,8			
RIF AE 0,5	1,80	45,6	45,6	3508,77	19,94
		45,7			
		45,5			
LCD 2% FINE	2,00	45,4	45,3	3532,01	22,46
		45,3			
		45,2			
LCD 2% T.Q.	1,96	42,3	42,4	3773,59	25,12
		42,6			
		42,4			
LCD 4% T.Q.	2,05	43,1	43,1	3712,30	25,43
		43,0			
		43,3			

Tabella 13 - Modulo elastico a 28 gg di stagionatura

	Modulo elastico dinamico [GPa]	Modulo elastico dinamico [%]
RIF	25,87	100,0%
RIF AE 0,25	19,44	-24,9%
RIF AE 0,5	19,94	-22,9%
LCD 2% FINE	22,46	-13,2%
LCD 2% T.Q.	25,12	-2,9%
LCD 4% T.Q.	25,43	-1,7%

Tabella 14 - Variazioni percentuali modulo elastico a 28 gg

All'aumentare della maturazione il modulo elastico diminuisce in tutte le miscele. Le osservazioni fatte per la stagionatura a 7 giorni possono essere ripetute; i provini confezionati con LCD tal quale infatti hanno un comportamento simile al riferimento, mentre l'utilizzo della parte fine determina una diminuzione significativa del modulo elastico.

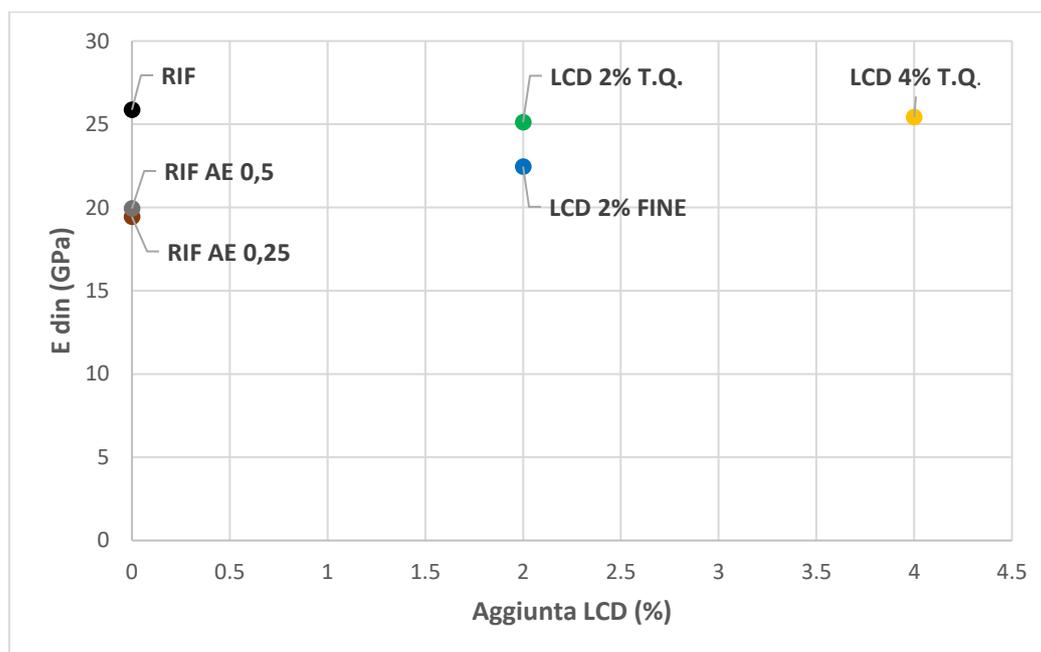


Grafico 5 - Modulo elastico a 28 gg in funzione dell'aggiunta di LCD

3.3.4 Resistenze meccaniche

La resistenza è una proprietà meccanica che indica il massimo sforzo che un generico materiale è in grado di sopportare prima di arrivare a rottura. In questa ricerca sono state eseguite prove di rottura a flessione e a compressione per determinare rispettivamente la resistenza a flessione (R_f) e a compressione (R_c) dei diversi provini. Le prove sono state eseguite secondo la UNI EN 1015-11:2007 con provini prismatici di dimensioni 40×40×160 mm³ dopo 2,7 e 28 giorni di maturazione.

Per la prova di resistenza flessione si posizionano i provini sulla piastra di carico con le due facce parallele, ovvero quelle che sono state a contatto con le pareti del cassero, sugli appoggi e disponendo l'asse longitudinale del provino normale rispetto ai supporti. La pressa idraulica porta quindi a rottura i provini, vengono registrati dal terminale i dati di sforzo e deformazione durante tutta la prova e la forza massima a rottura.

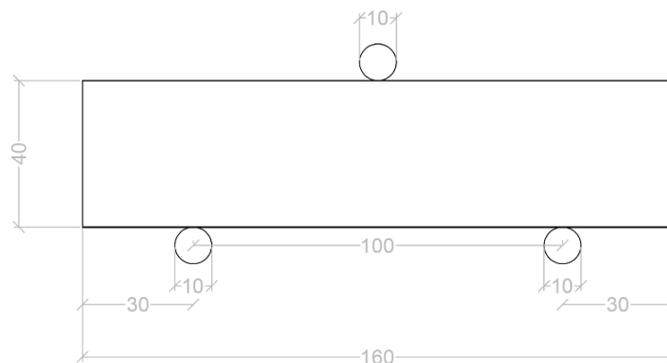


Figura 8 – Schema prova a flessione (grandezze espresse in mm)¹⁰

La resistenza a flessione si calcola con la seguente formula:

$$R_f = (1.5 \cdot F_m \cdot L) / (b \cdot h^2) \text{ (MPa)}$$

Dove:

- F_m è la forza massima registrata dal terminale, in kN ;
- L è la distanza tra i supporti inferiori dell'alloggiamento del provino, ovvero 10mm;
- b e h sono le dimensioni della sezione di provino su cui viene eseguita la prova, 40mm e 40mm.



Figura 9 - Superficie di rottura a flessione

Sono stati sottoposti a prove di flessione un provino per la miscela con aggiunta di LCD fine e due provini per tutti gli altri tipi. Delle quattro parti ottenute dalla prova di flessione ne vengono selezionate tre da sottoporre alla prova di compressione; due parti per la miscela con aggiunta di LCD fine.



Figura 10 – Provini per rottura a compressione

La prova a compressione si esegue sulla superficie quadrata 40mm x 40mm. I provini vengono inseriti nella pressa apposita per la rottura a compressione. La pressa facendo salire il supporto applica il carico che viene distribuito uniformemente dalle piastre di carico fino a rottura. La resistenza a compressione si calcola con la seguente formula:

$$R_c = F_m / A \text{ (MPa)}$$

Dove:

- F_m è la forza massima registrata dal terminale, in kN
- A è l'area della sezione su cui si esegue la prova, $40 \times 40 \text{ mm}^2$

Resistenze a flessione

		Rf (Mpa)	Fmax (KN)	Rf (Mpa)
RIF	A	0,47	2,02	0,47
	B	0,46	1,96	
RIF AE 0,25	A	0,34	1,47	0,36
	B	0,37	1,59	
RIF AE 0,5	A	0,31	1,33	0,32
	B	0,34	1,44	
LCD 2% FINE	A	0,49	2,11	0,49
LCD 2% T.Q.	A	0,45	1,92	0,38
	B	0,30	1,30	
LCD 4% T.Q.	A	0,41	1,77	0,40
	B	0,38	1,64	

Tabella 15 - Resistenze a flessione a 2gg

		Rf (Mpa)	Fmax (KN)	Rf (Mpa)
RIF	C	0,55	2,36	0,57
	D	0,59	2,50	
RIF AE 0,25	C	0,44	1,89	0,42
	D	0,40	1,71	
RIF AE 0,5	C	0,37	1,59	0,35
	D	0,32	1,38	
LCD 2% FINE	B	0,51	2,18	0,51
LCD 2% T.Q.	C	0,47	1,99	0,49
	D	0,50	2,15	
LCD 4% T.Q.	C	0,59	2,52	0,60
	D	0,61	2,58	

Tabella 16 - Resistenze a flessione a 7gg

		Rf (Mpa)	Fmax (KN)	Rf (Mpa)
RIF	E	0,76	3,25	0,76
	F	0,75	3,20	
RIF AE 0,25	E	0,61	2,62	0,63
	F	0,65	2,75	
RIF AE 0,5	E	0,58	2,48	0,59
	F	0,60	2,55	
LCD 2% FINE	C	0,86	3,67	0,87
	D	0,87	3,69	
LCD 2% T.Q.	E	0,79	3,36	0,82
	F	0,85	3,64	
LCD 4% T.Q.	E	0,91	3,86	0,90
	F	0,89	3,78	

Tabella 17 – Resistenze a flessione a 28 gg

	Rf a 2gg (Mpa)	Rf a 2gg (%)	Rf a 7gg (Mpa)	Rf a 7gg (%)	Rf a 28gg (Mpa)	Rf a 28gg (%)
RIF	0,47	100,0 %	0,57	100,0%	0,76	100,0%
RIF AE 0,25	0,36	-23,4%	0,42	-26,3%	0,63	-17,1%
RIF AE 0,5	0,32	-31,9%	0,35	-38,6%	0,59	-22,4%
LCD 2% FINE	0,49	+4,3 %	0,51	-10,5%	0,87	+14,5%
LCD 2% T.Q.	0,38	-19,2 %	0,49	-14,0%	0,82	+7,9%
LCD 4% T.Q.	0,40	-14,9 %	0,60	+5,3%	0,90	+18,4%

Tabella 18 - Variazioni percentuali delle resistenze a flessione

L'aggiunta di LCD tal quale provoca, all'aumentare del dosaggio, un aumento della resistenza a flessione per tutto il periodo di stagionatura. La miscela con l'aggiunta di LCD 4% tal quale garantisce le prestazioni migliori, arrivando a 28 gg con una resistenza maggiore del 18,4% rispetto al riferimento. Notiamo come la resistenza del provino con LCD fine si mantenga stabile nelle prime fasi di maturazione per poi arrivare a valori simili al provino con 4% tal quale. Tutte le miscele con aggiunta di LCD, pur avendo sviluppi diversi nel tempo, garantiscono resistenze a flessione maggiori del provino di riferimento.

Resistenze a compressione

		Rc (Mpa)	Fmax (KN)	Rc (Mpa)
RIF	1	20,16	32,26	20,65
	2	20,46	32,73	
	3	21,34	34,15	
RIF AE 0,25	1	14,66	23,46	14,39
	2	14,48	23,16	
	3	14,04	22,47	
RIF AE 0,5	1	13,39	21,43	13,50
	2	13,48	21,57	
	3	13,64	21,83	
LCD 2% FINE	1	18,18	29,08	18,50
	2	18,81	30,09	
LCD 2% T.Q.	1	18,53	29,65	18,01
	2	17,11	27,38	
	3	18,38	29,40	
LCD 4% T.Q.	1	19,87	31,79	21,10
	2	21,99	35,19	
	3	21,43	34,29	

Tabella 19 - Resistenza a compressione a 2gg

		Rc (Mpa)	Fmax (KN)	Rc (Mpa)
RIF	1	27,54	44,06	26,98
	2	26,89	43,03	
	3	26,51	42,41	
RIF AE 0,25	1	19,12	30,59	19,48
	2	20,08	32,12	
	3	19,25	30,80	
RIF AE 0,5	1	18,21	29,14	17,89
	2	17,56	28,10	
	3	17,90	28,64	
LCD 2% FINE	1	26,63	42,60	26,65
	2	26,68	42,69	
LCD 2% T.Q.	1	27,77	44,43	26,88
	2	28,01	44,81	
	3	24,88	39,80	
LCD 4%T.Q.	1	27,44	43,90	26,45
	2	28,58	45,72	
	3	23,33	37,33	

Tabella 20 - Resistenze a compressione a 7gg

		Rc (Mpa)	Fmax (KN)	Rc (Mpa)
RIF	1	29,07	46,51	31,92
	2	32,60	52,16	
	3	34,09	54,54	
RIF AE 0,25	1	24,87	39,79	22,24
	2	18,56	29,69	
	3	23,31	37,29	
RIF AE 0,5	1	23,08	36,92	20,87
	2	21,31	34,09	
	3	18,22	29,15	
LCD 2% FINE	1	27,11	43,37	29,23
	2	31,34	50,15	
LCD 2% T.Q.	1	25,47	40,75	29,37
	2	33,84	54,15	
	3	28,81	46,09	
LCD 4%T.Q.	1	32,74	52,39	32,99
	2	35,30	56,48	
	3	30,94	49,50	

Tabella 21 - Resistenze a compressione a 28gg

	Rc a 2gg (Mpa)	Rc a 2gg (%)	Rc a 7gg (Mpa)	Rc a 7gg (%)	Rc a 28gg (Mpa)	Rc a 28gg (%)
RIF	20,65	100,0 %	26,98	100,0%	31,92	100,0%
RIF AE 0,25	14,39	-30,3 %	19,48	-27,8%	22,24	-30,3%
RIF AE 0,5	13,50	-34,6 %	17,89	-33,7%	20,87	-34,6%
LCD 2% FINE	18,50	-10,4 %	26,65	-1,2%	29,23	-8,4%
LCD 2% T.Q.	18,01	-12,8 %	26,88	-0,4%	29,37	-8,0%
LCD 4% T.Q.	21,10	+2,7 %	26,45	-2,0%	32,99	+3,4%

Tabella 22 – Variazioni percentuali delle resistenze a compressione

Anche per la resistenza a compressione il provino confezionato con il 4% tal quale garantisce le migliori prestazioni. Come vediamo dal *grafico 6* infatti, sviluppa un andamento simile al riferimento con un valore di resistenza finale maggiore. Gli altri provini, seppur con valori inferiori, rimangono comunque ampiamente nel limite del 20% di perdita di resistenza. Il provino con aggiunta di additivo commerciale, anche se con dosaggio dimezzato, non rientra invece nei limiti.

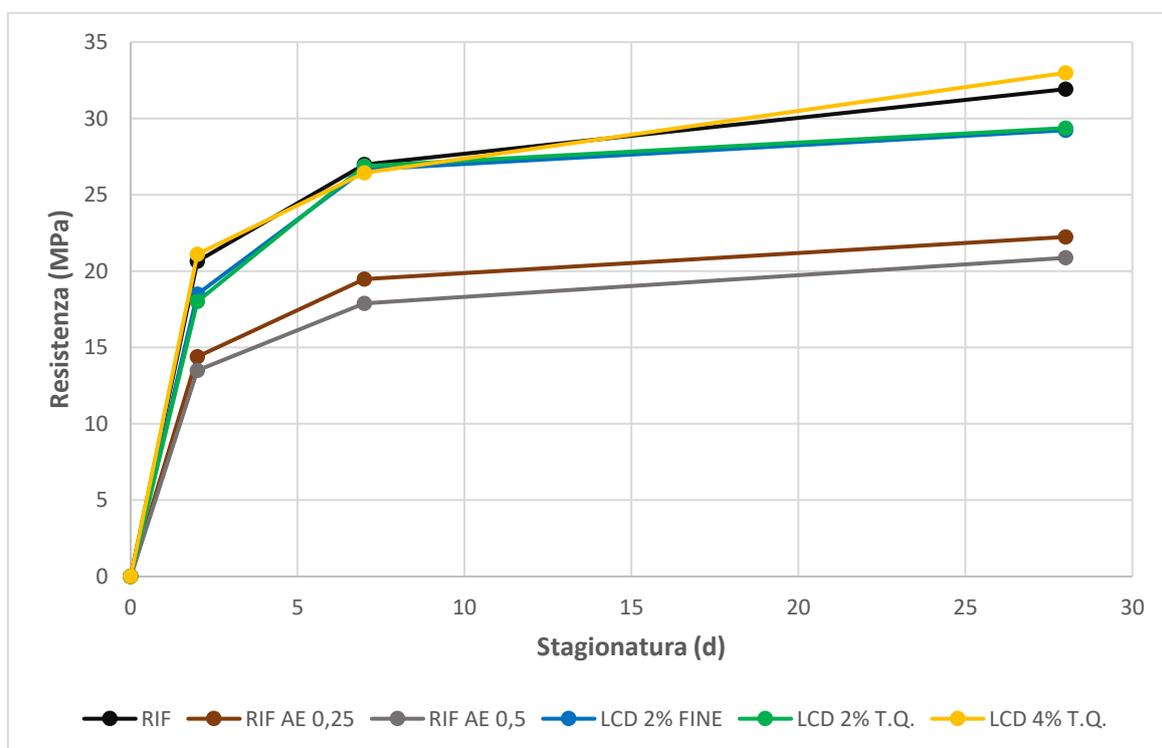


Grafico 6 – Andamento nel tempo delle resistenze a compressione

3.4 Mix design 2

I provini confezionati nella precedente ricerca⁶ sono stati utilizzati per lo studio delle proprietà fisiche e ambientali. In particolare, sono state eseguite diverse prove per analizzare lo sviluppo delle porosità e il rilascio in ambiente. In questo mix design è stata confezionata una sola miscela come riferimento aerante e un nuovo provino con LCD 4% fine.

	ACQUA	CEMENTO	LCD <75 mm	LCD T.Q.	AGGREGATO	SUPERFLUIDIFICANTE	AE
	g	g	g	g	g	g	g
RIF	447,12	745,20	0,00	0,00	2396,40	6,42	0,00
RIF AEA	447,12	745,20	0,00	0,00	2396,40	6,42	0,75
LCD 2% FINE	364,18	606,96	12,14	0,00	1951,85	5,51	0,00
LCD 2% TQ	447,12	745,20	0,00	14,90	2396,40	6,40	0,00
LCD 4% FINE	364,18	606,96	24,28	0,00	1951,85	5,51	0,00
LCD 4% TQ	447,12	745,20	0,00	29,81	2396,40	6,42	0,00

Tabella 23 - Mix design 2

I risultati ottenuti dalle prove di lavorabilità, densità e resistenze meccaniche sono riportati nella seguente tabella:

	Slump	Densità fresca	Densità a 28gg	Rf	Rc
	mm	g/cm³	g/cm³	MPa	MPa
RIF	117,5	2,25	2,07	0,66	36,87
RIF AEA	192	1,90	1,70	0,45	21,63
LCD 2% FINE	153,5	2,06	1,87	0,54	29,21
LCD 2% TQ	120,5	2,32	2,07	0,66	33,10
LCD 4% FINE	150	2,21	1,81	0,51	26,17
LCD 4% TQ	120,5	2,08	1,96	0,58	31,67

Tabella 24 - Risultati prove

3.5 Prove sui campioni

3.5.1 Porosimetria ad intrusione di mercurio

La porosità influenza molti fattori quali ad esempio l'adsorbimento, la resistenza e la densità, caratteristiche che determinano i possibili utilizzi del materiale.

La porosimetria a intrusione di mercurio è una prova fisica che viene usata per determinare il diametro e il volume totale dei pori. Il mercurio non bagna il materiale e non penetra spontaneamente nel campione per capillarità, deve essere quindi forzato ad entrare nei pori tramite l'applicazione di una pressione esterna. La pressione richiesta è inversamente proporzionale alla dimensione dei pori; quindi, per penetrare in pori grandi è richiesta solo una leggera pressione mentre valori molto maggiori sono necessari per forzare il mercurio in pori piccoli. L'intrusione del mercurio è progressiva nella struttura porosa dei campioni e avviene in condizioni di pressione strettamente controllate¹¹. Per ottenere le informazioni riguardanti la porosità caratteristica del materiale lo strumento elabora i dati di pressione del liquido utilizzando l'equazione di Washburn:

$$Pl - Pg = \frac{4\sigma \cos\theta}{Dp}$$

Dove:

- Pl è la pressione rilevata, in MPa;
- Pg è la pressione del gas presente all'interno dei pori, pari a 0 atm, in quanto il liquido viene introdotto nel campione posto sottovuoto;
- σ è la tensione superficiale del liquido, pari a 480 mN/m per il mercurio sottovuoto;
- θ è l'angolo di contatto di intrusione del liquido, approssimativamente a 140° per il mercurio
- Dp è il diametro dei pori, in μm .

Effettuando le dovute sostituzioni e approssimazioni, si ricava la seguente equazione:

$$Dp = \frac{1470}{Pl} [kPa * \mu m]$$

Quindi, ad ogni incremento di pressione del liquido inserito viene rilevato il volume incrementale dei pori (riportato in mm^3/g) e la dimensione dei pori interessati dalla rilevazione (in base al loro diametro, misurato in μm)¹³.

Le analisi vengono svolte nell'intervallo di diametro dei pori 0,01-100 μm .

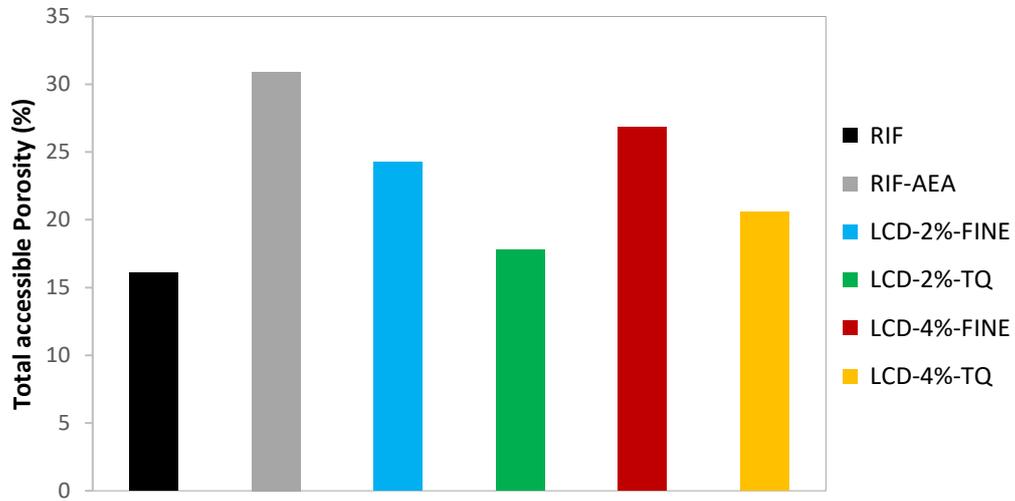


Grafico 7 - Porosità totale

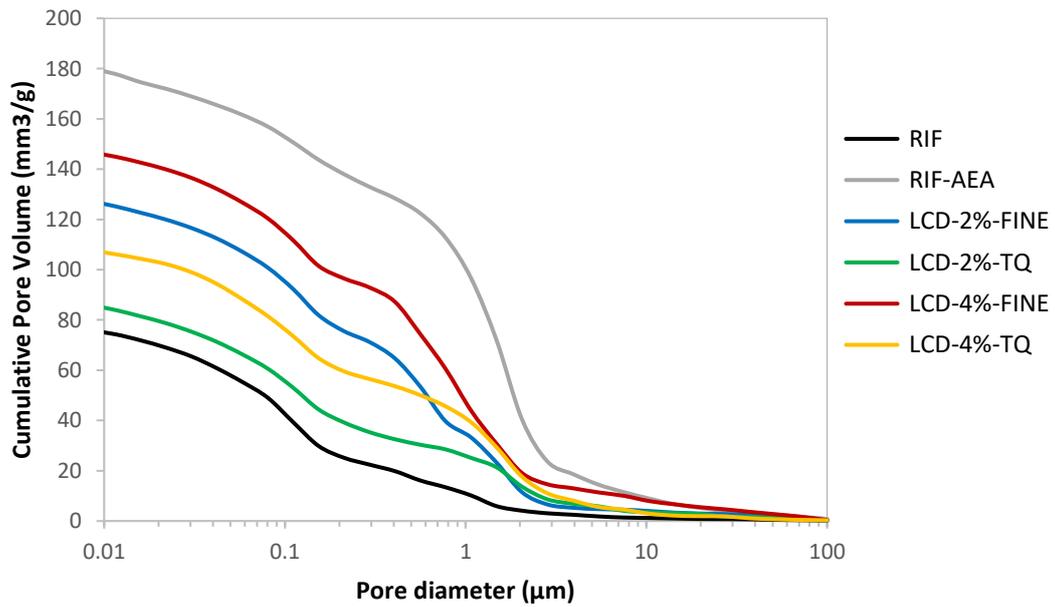


Grafico 8 - Porosità cumulativa

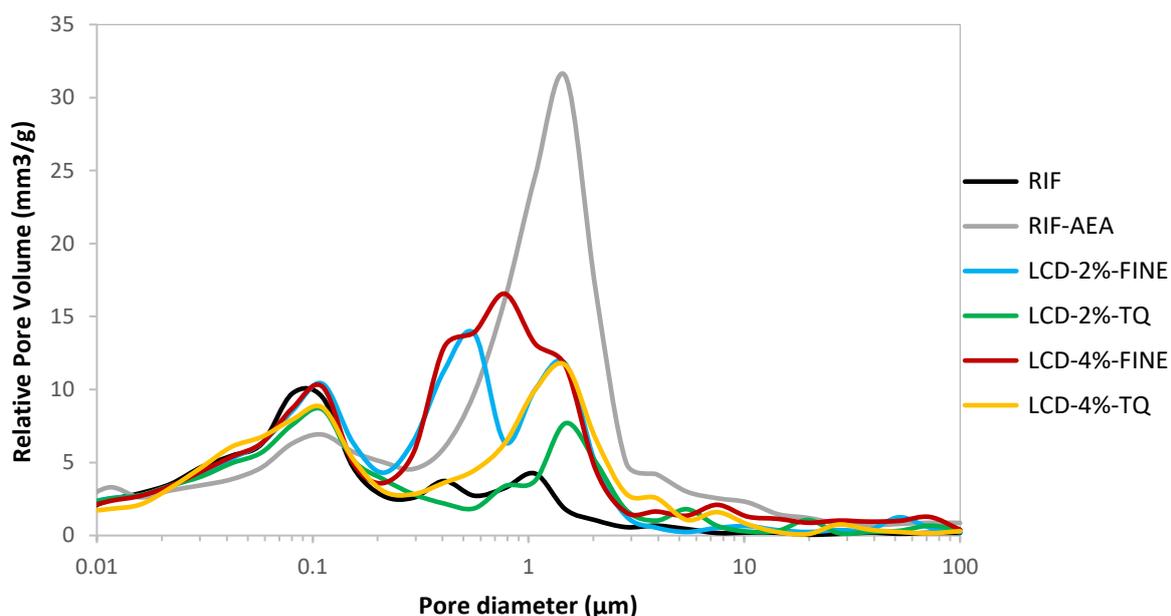


Grafico 9 - Porosità relativa

I risultati di porosità totale sono in linea con i dati di lavorabilità e resistenza meccanica. L'aggiunta di LCD fine all'impasto determina un notevole incremento della porosità totale mentre i provini con LCD tal quale hanno valori di poco superiori al riferimento. Il provino confezionato con additivo commerciale risulta avere una porosità totale maggiore rispetto a tutti gli altri. Dati confermati anche dal volume cumulativo di pori nel grafico 8, dove si osserva che il riferimento aerante ha i valori più alti mentre il provino di riferimento ha un volume di pori sempre inferiore rispetto a tutti gli altri. Dal grafico 9 osserviamo come tutti i provini presentino un picco in comune in corrispondenza di 0,1 µm per poi svilupparsi in maniera differente all'aumentare del diametro dei pori. Tutti i provini, quindi, hanno una struttura porosa simile nel range di diametro 0,01- 0,2 µm per poi variare nel range 0,2-3 µm. Il provino con LCD 2% fine presenta diversi picchi, indice di una maggiore distribuzione dei pori. Il 4% fine ha un grafico bi-modale con il secondo picco a 0,8 µm. I provini con LCD tal quale hanno comportamenti simili tra loro con un picco in corrispondenza di 1,5 µm. Anche il riferimento aerante presenta un picco molto pronunciato nello stesso range, ciò indica che è la dimensione prevalente dei pori che costituiscono il materiale.

3.5.2 Assorbimento d'acqua per capillarità

Le malte sono materiali caratterizzati da una struttura complessa e ricca di pori. Dal contenuto di pori e dalla loro distribuzione dipendono diverse caratteristiche del materiale. In particolare, dalla porosità di piccole dimensioni dipende la capacità di risalita capillare, mentre la presenza di pori più grandi e le loro dimensioni condizionano il livello di saturazione nell'assorbimento di acqua e la resistenza meccanica del materiale. L'assorbimento d'acqua all'interno di malte e calcestruzzi innesca dei meccanismi che portano al deterioramento del materiale stesso.

La prova di assorbimento d'acqua per capillarità si esegue secondo la norma UNI-EN 15801. Il metodo si basa sulla misurazione dell'aumento di massa dovuto all'assorbimento capillare di acqua, senza applicazione di una pressione esterna, in un intervallo di tempo predeterminato. Prima dell'inizio della prova i provini devono essere levigati con carta abrasiva per rendere la superficie liscia ed aprire i pori rimasti occlusi dallo strato di olio disarmante applicato in fase di getto. Vengono quindi puliti con pennello ed aria compressa per eliminare la polvere presente. Si effettuano due pesate a distanza di 24h (M_01 ; M_02), per verificare che la differenza risulti inferiore dello 0,1%.

PROVINI	M0 (g) 1	M0 (g) 2	DIFFERENZA PESO %
RIF 1	254,21	253,94	-0,001062114
RIF 2	254,38	254	-0,001493828
RIF 3	275,11	274,82	-0,001054124
RIF AE 1	201,75	201,71	-0,000198265
RIF AE 2	223,18	223,08	-0,000448069
RIF AE 3	213,58	213,52	-0,000280925
LCD 2% FINE 1	235,76	235,49	-0,001145232
LCD 2% FINE 2	251,55	251,36	-0,000755317
LCD 4% FINE 1	229,71	229,67	-0,000174133
LCD 4% FINE 2	236,84	236,77	-0,000295558
LCD 2% TQ 1	267,61	267,44	-0,000635253
LCD 2% TQ 2	273,91	273,44	-0,001715892
LCD 2% TQ 3	289,37	289	-0,00127864
LCD 4%TQ 1	220,73	220,58	-0,000679563
LCD 4% TQ 2	240,93	240,73	-0,000830117
LCD 4% TQ 3	248,75	248,61	-0,000562814

Tabella 25 - Pesi iniziali

Sulla base di un contenitore si posiziona uno strato di 5mm di carta filtro, che viene saturata con acqua distillata. I provini si posizionano all'interno del contenitore distanziati tra di loro. Durante la prova viene aggiunta acqua per mantenere la condizione di saturazione. A determinati tempi t_i (10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 4h, 6h, 24h, 48h, 76h, 100h, 148h) i provini vengono rimossi, asciugati con carta inumidita per eliminare l'acqua in eccesso e pesati per determinare le masse M_i . Tra le diverse pesate i contenitori vengono chiusi per evitare l'evaporazione dell'acqua. La prova si considera terminata quando la differenza tra due pesate successive è inferiore all'1% oppure dopo 8 giorni dall'inizio della stessa.

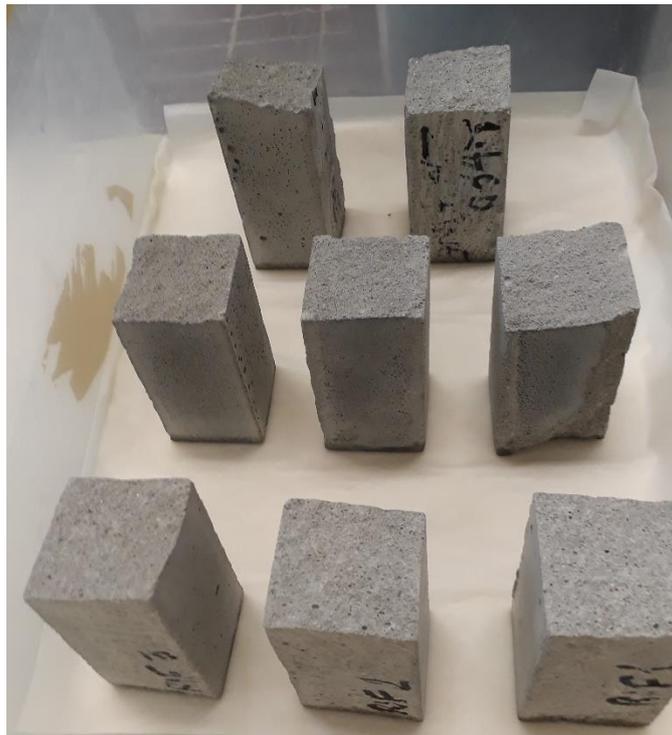


Figura 11 - Prova assorbimento d'acqua

Dai valori di peso si può ricavare la quantità d'acqua assorbita per capillarità (Q_i) per unità di area, al tempo t_i ($s^{1/2}$):

$$Q_i = \frac{M_i - M_0}{A} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Dove:

- M_i è la massa del provino al tempo t_i ($s^{1/2}$)
- M_0 è la massa del provino secco
- A è l'area del provino su cui si esegue la prova (40×40mm)

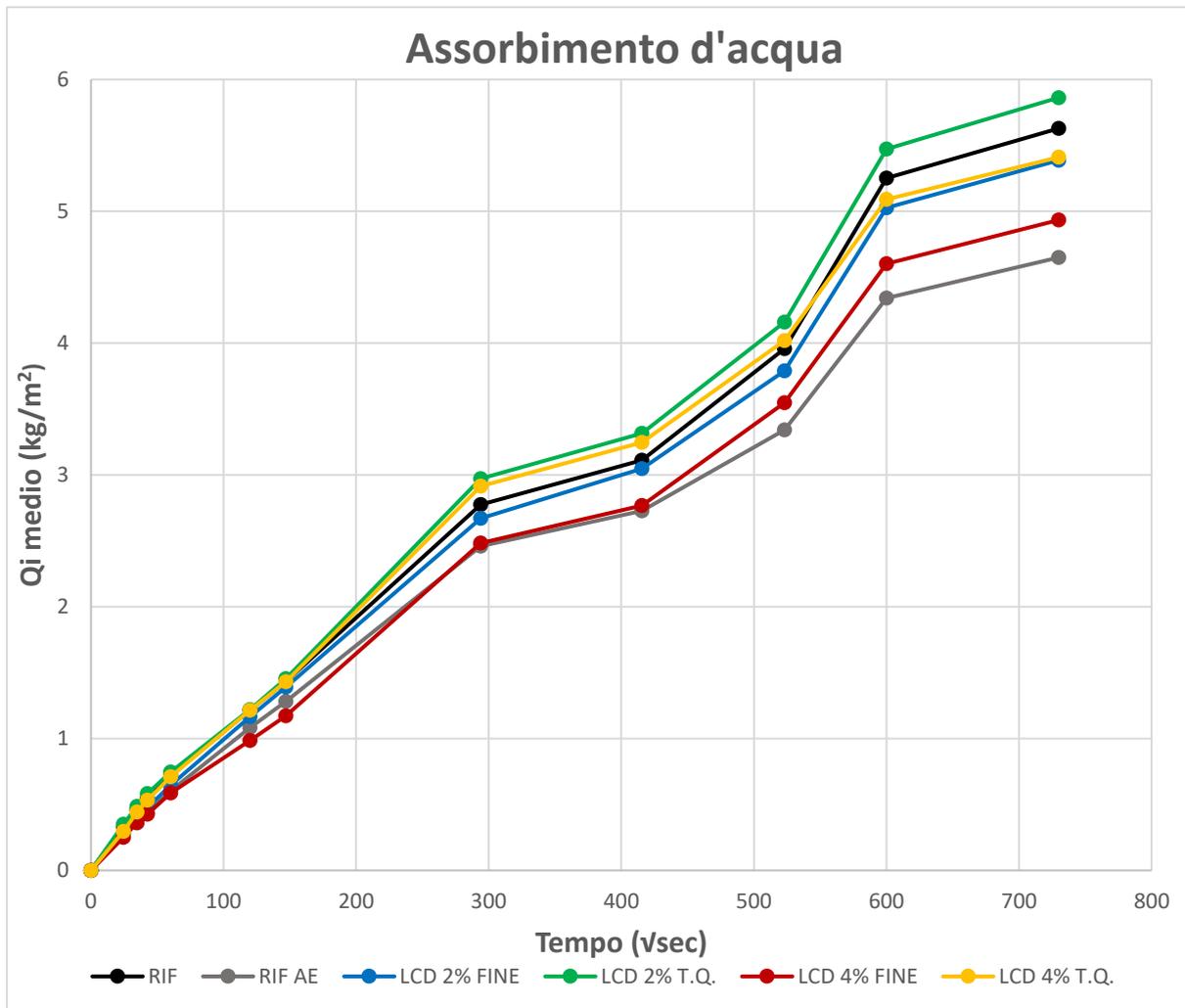


Grafico 10 – Curve di assorbimento d'acqua

L'andamento del grafico è condizionato dall'aggiunta di ulteriore acqua durante l'esecuzione della prova, per mantenere il grado di saturazione. Il riferimento aerante ha assorbito meno acqua degli altri provini. L'LCD 4% fine ha un andamento simile nella fase iniziale per poi aumentare nelle misurazioni finali. L'LCD 2% fine risulta avere un andamento simile al riferimento con valori di poco inferiori per tutta la durata della prova. Il provino con LCD 4% tal quale si mantiene superiore al riferimento per poi diminuire fino ai valori del 2% fine. Infine, il provino confezionato con 2% tal quale risulta assorbire più acqua di tutti gli altri.

3.5.3 Microscopia elettronica a scansione

La microscopia elettronica è una tecnica che sfrutta l'interazione tra un fascio di elettroni e gli atomi che compongono il campione in esame e permette di generare immagini con ingrandimenti molto elevati con una risoluzione nell'ordine dei nanometri. Una sorgente, costituita da un filamento di tungsteno, genera un fascio di elettroni che scansiona la superficie del campione. Il risultato dei segnali prodotti da questa interazione è un'immagine in bianco e nero ad elevata risoluzione e grande profondità di campo. In questa ricerca il SEM è stato utilizzato per indagare più a fondo la struttura porosa del materiale.

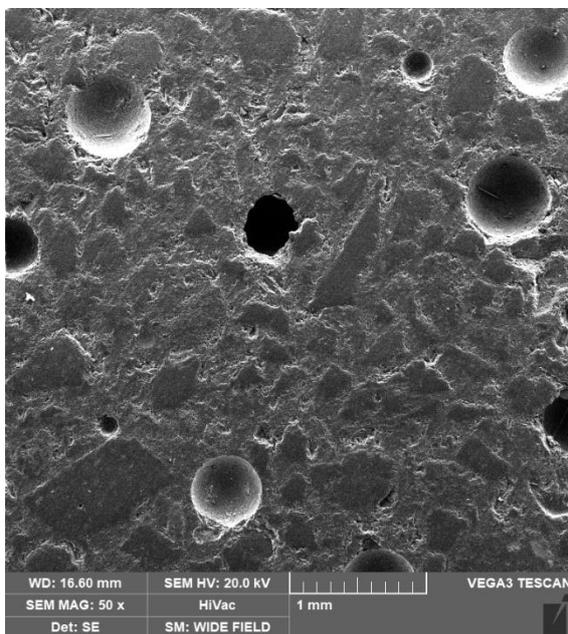


Figura 12 - Immagine SEM riferimento

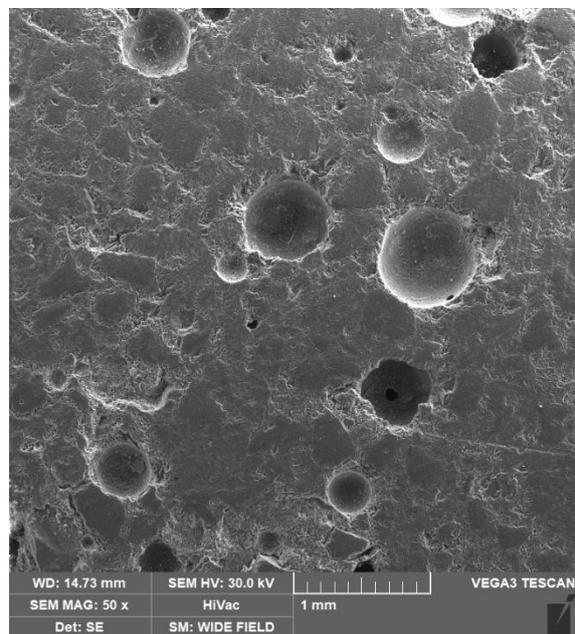


Figura 13 – Immagine SEM 4% tal quale

Dalle immagini con ingrandimento 1 mm notiamo come il provino con LCD 4% tal quale abbia una struttura porosa simile al riferimento con pochi pori di grandi dimensioni.

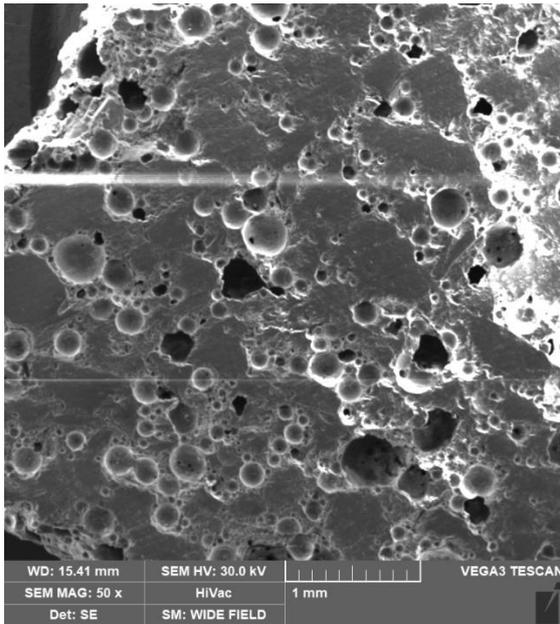


Figura 14 – Immagine SEM riferimento aerante

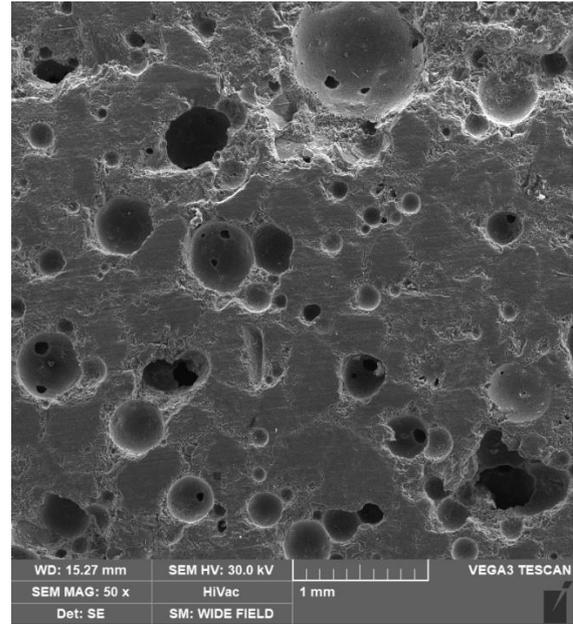


Figura 15 – Immagine SEM 4% fine

La figura 14 mostra l'elevata porosità del provino con additivo commerciale. Il provino con LCD 4% fine, in figura 15, presenta una maggiore distribuzione dei pori; la struttura porosa, infatti, è caratterizzata da pori di dimensioni dell'ordine del mm ma anche di diametro molto inferiore paragonabili a quelli generati dall'aerante commerciale.

3.5.4 Test di rilascio in acqua

Il test di cessione viene eseguito secondo la metodica prevista dalla norma Uni En 12457-2. Un campione di materiale solido viene messo a contatto con un liquido lisciviante. Questo liquido funge da solvente, facendo sì che al suo interno si concentrino (in soluzione) tutte o parte delle sostanze miscibili presenti nel campione solido iniziale. Il risultato dell'operazione è un liquido arricchito di svariati elementi e composti detto eluato, che verrà poi analizzato per valutare le potenziali emissioni in ambiente. Le sostanze mobili che costituiranno l'eluato saranno pertanto quelle che si trovavano precedentemente assorbite o adsorbite nelle porosità del campione e quelle presenti in condizioni solubili, in forma ionica o mobile.

L'eluizione dei componenti viene effettuata tramite immersione del campione in acqua deionizzata, la quale viene rinnovata ad intervalli di tempo prestabiliti, per un totale di durata della prova di 16 giorni. Il provino di dimensioni 4x4x8cm, viene posto nel recipiente e immerso completamente con un volume d'acqua pari a 5 volte il volume del solido. L'acqua del recipiente viene rinnovata dopo 2, 8, 24, 48, 80, 168, e 384 ore.

La misurazione del pH e della conducibilità avviene tramite pH-metro. Per i valori di pH il range 5,5-12 stabilito deve essere rispettato per ognuna delle soluzioni ottenute nelle 8 fasi estrattive¹². Nella seguente tabella i risultati ottenuti:

RIF 1	RIF 2	RIF AE 1	RIF AE 2	2% FINE 1	2% FINE 2
11,50	11,65	11,83	11,70	11,72	11,68
11,53	11,60	11,37	11,55	11,45	11,57
11,80	11,68	11,50	11,41	11,86	11,68
11,69	11,71	11,26	11,44	11,65	11,34
11,88	11,63	11,33	11,45	11,51	11,60
11,62	11,68	11,56	11,60	11,82	11,69
11,79	11,82	11,84	11,72	11,8	11,66
2% TQ 1	2% TQ 2	4 % FINE 1	4% FINE 2	4% TQ 1	4% TQ 2
11,53	11,73	11,63	11,60	11,50	11,75
11,32	11,42	11,23	11,28	11,51	11,40
11,52	11,67	11,26	11,20	11,31	11,46
11,42	11,46	11,44	11,66	11,55	11,45
11,24	11,32	11,35	11,40	11,55	11,53
11,23	11,66	11,42	11,58	11,49	11,55
11,85	11,6	11,57	11,64	11,83	11,75

Tabella26 - Risultati pH

Dopo la misurazione del pH e della conducibilità il campione viene acidificato con acido nitrico 1M a pH=2 per renderlo stabile. Le analisi per la ricerca dei metalli vengono effettuate su ogni soluzione ottenuta dalle otto fasi di eluizione (2, 8, 24, 48, 80, 168 e 384 ore) ricercando i parametri significativi e rappresentativi del campione in esame. Il confronto con i valori limite stabiliti viene effettuato con un valore cumulativo delle concentrazioni riscontrate nelle soluzioni. In questa ricerca è stato utilizzato uno spettrometro ICP-OES "OPTIMA 8300" per analizzare i quantitativi presenti di Ca, K, Na, Si, Al, Cr, Fe, Ni, Mn, Cu.

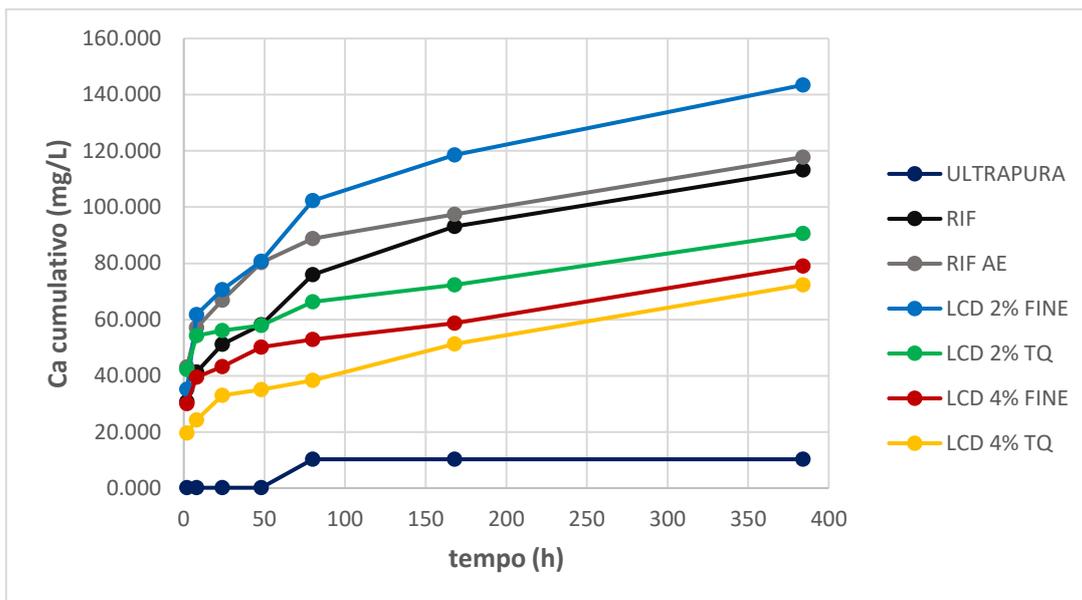


Grafico 11 - Rilascio di calcio nel tempo

Il calcio proveniente dalla matrice cementizia risulta essere l'elemento presente in quantità maggiori, arrivando a valori di concentrazione superiori a 140 mg/L. L'andamento irregolare del grafico può essere spiegato con la presenza di piccole particelle solide rimaste in sospensione e poi sciolte con l'acidificazione del campione, che generano errori nella misurazione.

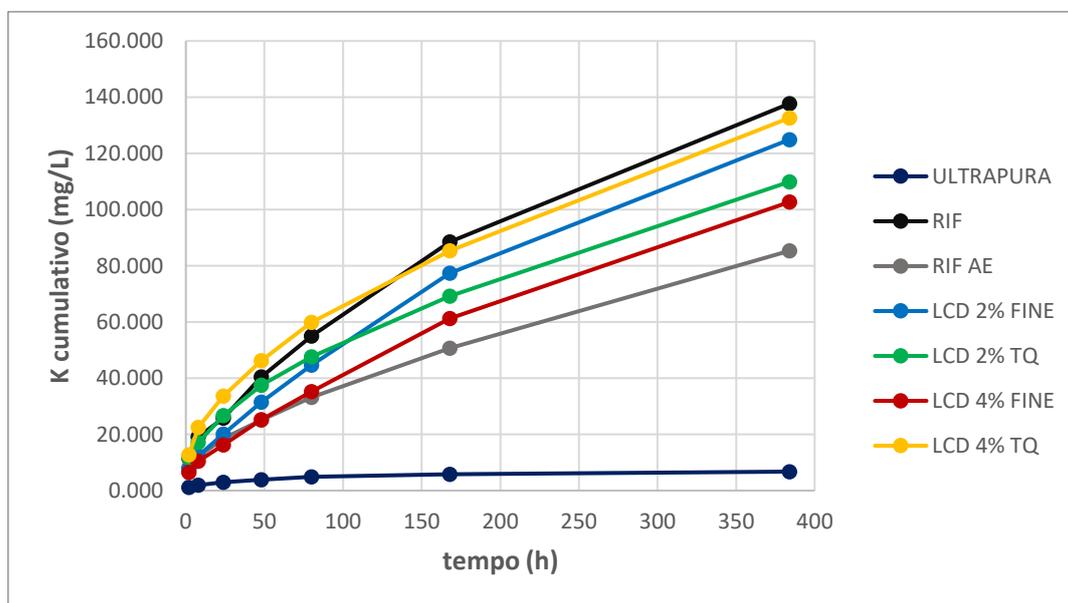


Grafico 12 - Rilascio di potassio nel tempo

Per tutti gli altri elementi l'andamento del rilascio nel tempo è più regolare, come mostra il grafico 12 relativo al potassio.

I valori di concentrazione degli altri elementi presenti in soluzione diminuiscono notevolmente, come mostra il grafico 13.

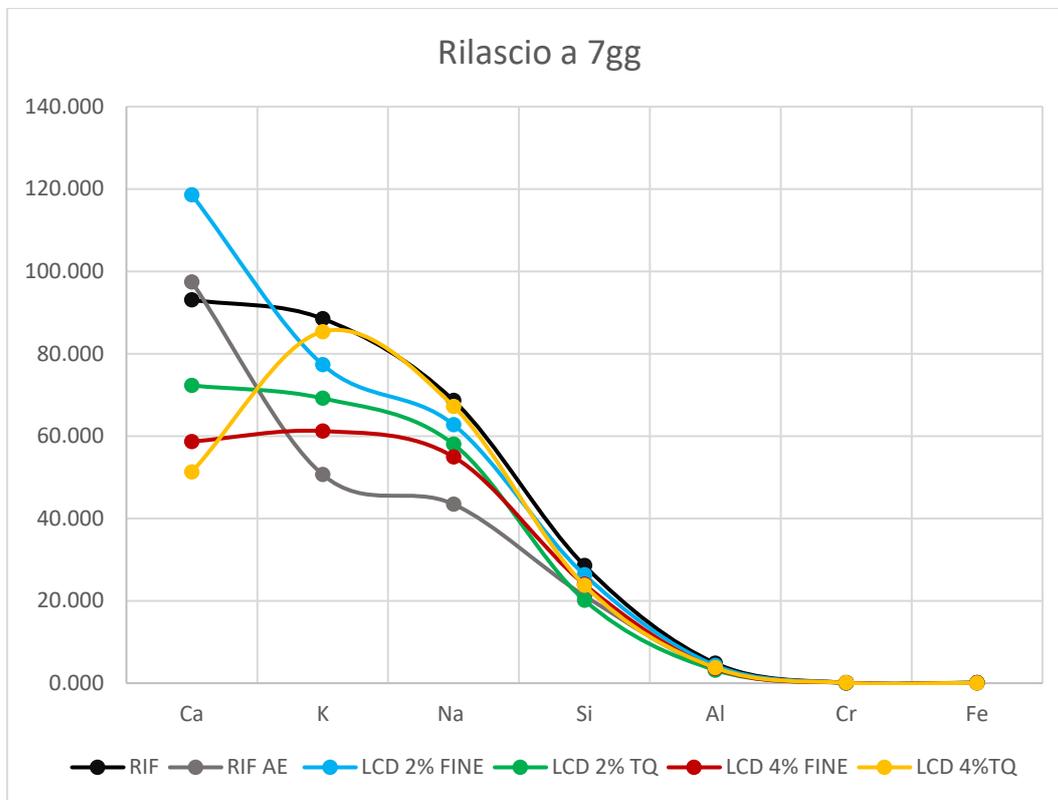


Grafico 13 - Rilascio a 7 giorni

Tra gli elementi ricercati per il test di cessione i limiti imposti sono:

Parametri	Concentrazioni limite (mg/L)
Rame	0,05
Nichel	0,01
Cromo	0,05

Tabella 27 - Valori limite¹⁴

Non sono state rilevate tracce di rame e nichel in nessuna delle provette analizzate; il limite del cromo invece viene ampiamente superato. Il rilascio di questo elemento non dipende però dall'aggiunta di LCD poiché proviene dalla matrice cementizia. Come mostra il grafico 14, infatti, anche il riferimento confezionato senza aggiunta di LCD raggiunge un valore finale di molto superiore a quello stabilito. Il provino con LCD 4% fine ha il massimo valore di rilascio, probabilmente dovuto al maggiore sviluppo delle porosità come mostrato anche dalle immagini al SEM.

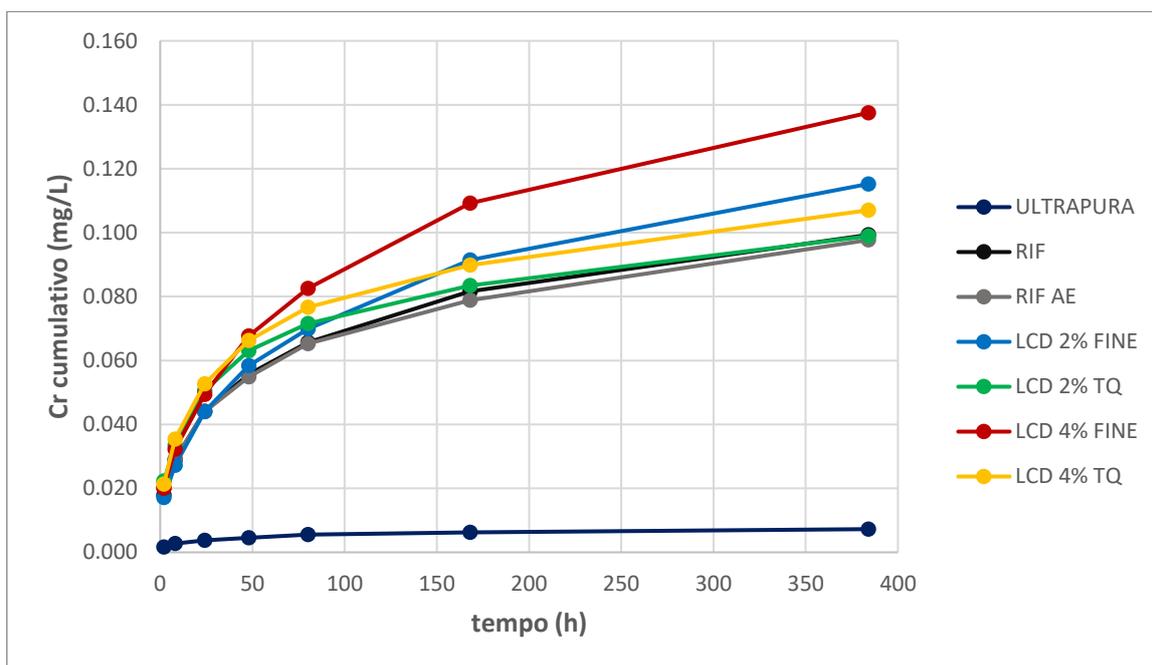


Grafico 14 - Rilascio di cromo nel tempo

4. Relazioni tra risultati

Il principale effetto dell'utilizzo di frammenti di LCD come additivo aerante dovrebbe essere l'aumento della lavorabilità seguito da una diminuzione della densità allo stato indurito e una perdita di resistenza a compressione non superiore al 20% rispetto al riferimento.

Si riportano in tabella le variazioni percentuali rispetto al riferimento dei risultati ottenuti sui provini del primo mix design:

	Slump (%)	Densità fresca (%)	Densità a 28gg (%)	Edin (%)	Rf (%)	Rc (%)
RIF	100,0	100,0	2,02	100,0	100,0	100,0
RIF AE 0,25	-3,7	-9,5	-8,9	-24,9	-17,1	-30,3
RIF AE 0,5	+27,6	-8,1	-10,9	-22,9	-22,4	-34,6
LCD 2% FINE	+3,7	+6,7	-1,0	-13,2	+14,5	-8,4
LCD 2%TQ	-15,4	+0,5	-3,0	-2,9	+7,9	-8,0
LCD 4%TQ	+0,4	+4,8	+1,5	-1,7	+18,4	+3,4

Tabella 28 - Risultati prove mix design 1

Notiamo come il provino confezionato con LCD 2% tal quale pur avendo risultati accettabili in termini di resistenza e perdita di densità ha un valore di lavorabilità troppo basso, inferiore al riferimento. L'aggiunta di LCD 4% tal quale anche se garantisce buone prestazioni meccaniche non migliora significativamente la lavorabilità dell'impasto e non rende il materiale finale più leggero. Il provino con LCD 2% fine ha un valore di densità fresca molto elevato che però diminuisce notevolmente dopo il periodo di stagionatura; pur non cambiando la classe di consistenza del materiale provoca un aumento della lavorabilità dovuto allo sviluppo delle porosità come confermato dal modulo elastico; garantisce inoltre buone prestazioni meccaniche rientrando ampiamente nel limite di perdita di resistenza.

	Slump (%)	Densità fresca (%)	Densità a 28gg (%)	R _f (%)	R _c (%)	Porosità (%)	Q _i medio (%)
RIF	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
RIF AEA	+63,4	-15,6	-17,9	-31,8	-41,3	+92,3	-17,4
2% FINE	+30,6	-8,4	-9,7	-18,2	-20,8	+50,9	-4,3
2% TQ	+2,6	+3,1	0,0	0,0	-10,2	+10,4	+4,1
4% FINE	+27,7	-3,1	-12,6	-22,7	-29,0	+67,0	-12,4
4% TQ	+2,6	-7,6	-5,3	-12,1	-14,1	+27,9	-3,9

Tabella 29 - Risultati prove mix design 2

Le prove svolte sui provini del secondo mix design confermano i risultati ottenuti. Il più basso valore di porosità spiega come l'aggiunta di LCD 2% tal quale non abbia significativi effetti aeranti. Presenta inoltre il massimo valore di assorbimento capillare, superiore anche al riferimento. Il 4% tal quale garantisce buone prestazioni meccaniche e piccoli effetti su lavorabilità e densità. Il provino con LCD 4% fine pur avendo ottimi risultati in tutte le prove non rientra nei limiti imposti arrivando ad una perdita di resistenza rispetto al riferimento del 29%; questo può essere determinato dallo sviluppo di porosità come confermato dal valore ottenuto dalla porosimetria e dalle immagini al SEM. Il 2% fine conferma significativi effetti su lavorabilità e densità dato il maggiore sviluppo delle porosità, con una perdita di resistenza di poco superiore al limite del 20%.

Dai risultati ottenuti è evidente il legame tra lo sviluppo delle resistenze meccaniche e la porosità del materiale. Indipendentemente dall'aggiunta di LCD, all'aumentare dei pori diminuisce la resistenza a compressione del provino.

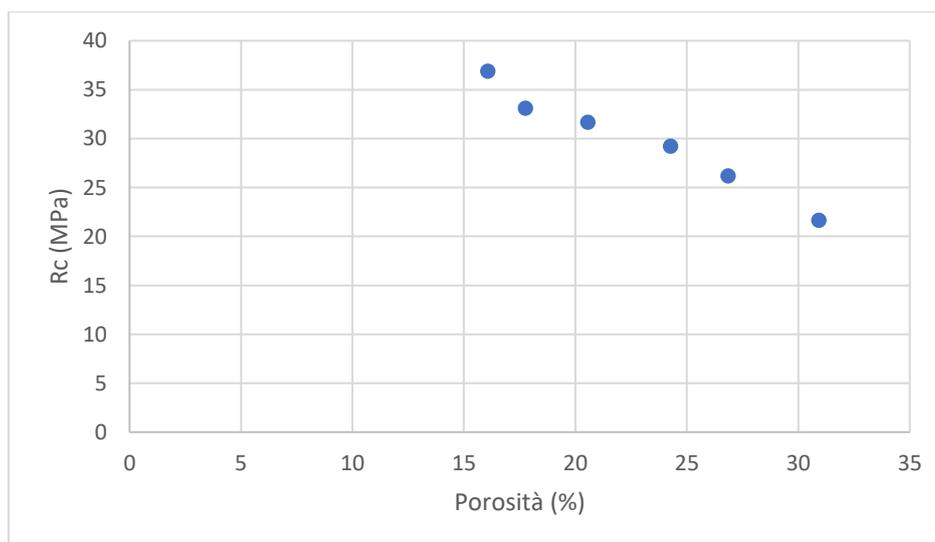


Grafico 15 - Resistenza a compressione in funzione dell'aumento della porosità

Non tutti i provini hanno evidenziato un legame diretto tra porosità e rilascio in ambiente come invece ci si poteva aspettare. Il grafico 16 mostra come all'aumentare della porosità corrisponda un aumento del rilascio di cromo, unico elemento al di sopra dei limiti, con l'unica eccezione per il provino di riferimento aerante.

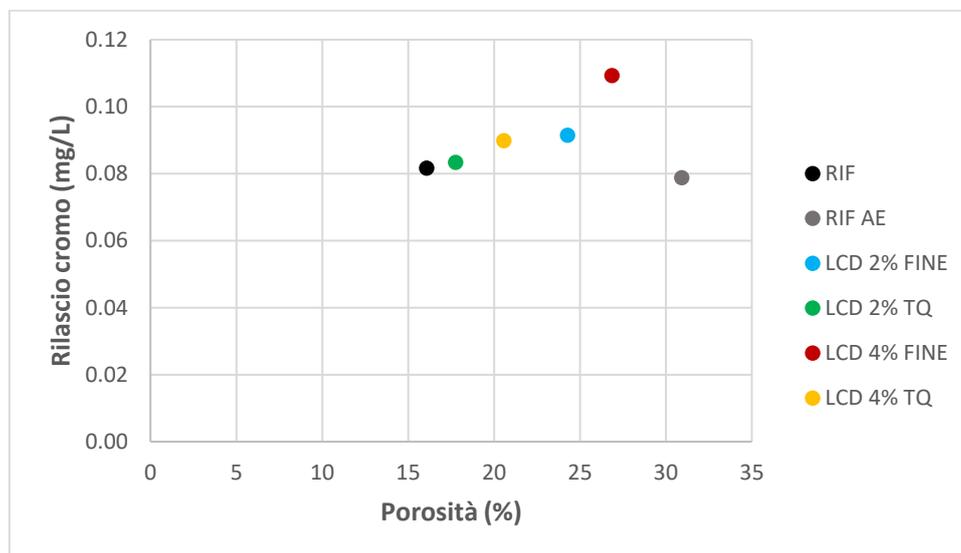


Grafico 16 - Rilascio di cromo in funzione dell'aumento della porosità

Si evidenzia una possibile correlazione, con l'unica eccezione del provino con LCD 2% tal quale, tra il Qi medio e il rilascio di sodio e potassio. Per tutti gli altri elementi non sembra esserci un legame tra l'assorbimento d'acqua e il loro rilascio in ambiente.

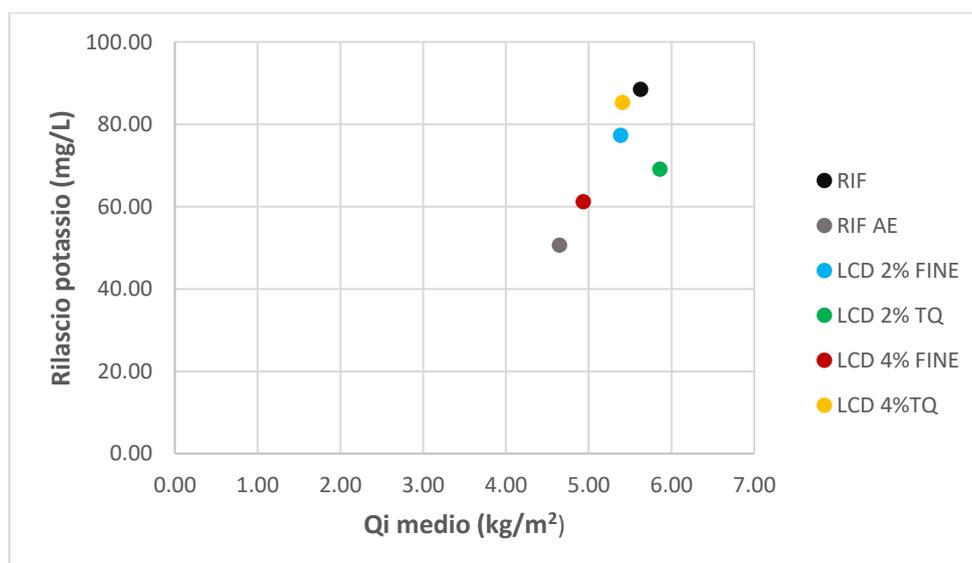


Grafico 17 - rilascio di potassio in funzione dell'assorbimento d'acqua

5. Conclusioni

Questa tesi conferma la possibilità di utilizzare frammenti di LCD come additivo aerante in malte cementizie. È evidente come l'utilizzo del materiale con granulometria $>0,075$ mm o della sola parte fine determini caratteristiche differenti nel prodotto finale.

- LCD fine

L'aggiunta di LCD 2% fine si avvicina più di tutti a rispettare i requisiti richiesti; garantisce infatti significativi effetti aeranti mantenendo contenuta la perdita di resistenza meccanica. L'aumento del dosaggio al 4% determina un miglioramento delle caratteristiche aeranti che si avvicinano maggiormente a quelle garantite da un additivo commerciale ma determina anche elevate perdite di resistenza. Da valutare, nell'ottica di una produzione industriale, l'influenza della necessaria setacciatura del materiale sull'intero processo produttivo.

- LCD tal quale

L'utilizzo di LCD tal quale ovvierebbe al problema della setacciatura, evitando inoltre di creare ulteriori flussi di rifiuti. È evidente però come l'aggiunta di questa frazione abbia effetti aeranti inferiori. L'utilizzo del 2% tal quale non favorisce lo sviluppo di porosità e quindi non determina effetti significativi su lavorabilità e densità. L'aumento del dosaggio al 4% migliora solo in parte le caratteristiche aeranti garantendo però le migliori prestazioni meccaniche.

6. Appendice

Sono riportate le schede tecniche dei materiali commerciali utilizzati.

Scheda Tecnica
TECNOCEM 42,5
R
CEM II/A-S 42,5 R

Descrizione

Il TECNOCEM A-S 42,5 R è un cemento Portland alla loppa tipo II ad alta resistenza normalizzata e a resistenzainiziale elevata.

Composizione

Il cem TECNOCEM 42,5 R contiene, conformemente alla composizione prescritta dalla norma UNI EN 197-1 (riferita cioè alla massa del cemento ad esclusione del solfato di calcio e degli additivi), 80% ÷ 94% di clinker, mentre la restante parte è costituita da loppa di altoforno (S) ed eventuali costituenti secondari.

Requisiti di norma (UNI EN 197-1)

REQUISITI CHIMICI*

Solfati (come SO ₃)	≤ 4,0%
Cloruri	≤ 0,10%

REQUISITI FISICI*

Tempo di inizio presa	≥ 60 min
Espansione	≤ 10 mm

REQUISITI MECCANICI*

Resistenze alla compressione

2 giorni	≥ 20,0 MPa
28 giorni	≥ 42,5 MPa

*Valori caratteristici

Utilizzo

Le alte resistenze meccaniche, particolarmente elevate alle brevi stagionature, ne rendono ideale l'impiego per:

- strutture prefabbricate (con e senza ciclo termico);
- strutture gettate in opera precomprese;
- strutture non precomprese in elevazione o morfologicamente snelle;
- getti faccia a vista;
- manufatti e/o getti che necessitano di scasserature veloci;
- elementi per l'arredo urbano;
- premiscelati, malte.

Vantaggi

Il ritiro igrometrico e il calore d'idratazione, entrambi contenuti in rapporto allo sviluppo delle resistenze meccaniche, consentono l'impiego in realizzazioni impegnative dal punto di vista progettuale, dove tuttavia, in presenza di spessori critici, l'uso di un cemento di classe superiore potrebbe essere sconsigliabile.

La prontezza nel raggiungere resistenze meccaniche elevate offre, d'altro canto, il vantaggio di un suo utilizzo in luogo di un cemento di classe inferiore ove si fosse in presenza, in fase di realizzazione delle opere, di basse temperature ambientali.

Il contenuto di loppa, inoltre, fornisce un contributo alle lunghe scadenze sia in termini di resistenze meccaniche che di resistenza alla porosità con riflessi positivi sulle caratteristiche di durabilità.

Confezionamento e stoccaggio

Il periodo di conservazione è riportato sul D.D.T ed eventualmente, ove disponibile, sul sacco.

Prodotto a uso professionale. L'uso del prodotto dovrà essere basato su valutazioni, prove e verifiche proprie dell'applicatore.

Italcementi
i.lab (Kilometro Rosso)
Via Stezzano, 87
24126 Bergamo – Italia
Tel. +39 035 396 111
www.italcementi.it

Assistenza Tecnica
N° Verde 800 820 116
sat@italcementi.net

Scheda aggiornata a ottobre 2021

LINEA SABBIE E INERTI UMIDI

SABBIA SILICEA PO CLASSICA DEL FIUME PO



Scheda Tecnica rev. 01-2019



GRANULOMETRIA
0,00 ÷ 2,00 mm

CERTIFICAZIONI
UNI EN 12620
UNI EN 13139
UNI EN 13043
UNI EN 13242



DESCRIZIONE PRODOTTO:

Sabbia silicea Po Classica è un aggregato naturale umido lavato e vagliato, proveniente esclusivamente da cave di sabbia finalizzate alle riqualificazioni delle aree golenali del Po, con marcatura CE per impieghi in edilizia.

SETTORI DI IMPIEGO:

Ideali per la produzione di:

- Malte da muratura;
- Intonaci;
- Malte per faccia a vista;
- Getti in calcestruzzo.

CERTIFICAZIONI:

Prodotto naturale marcato CE in conformità alle norme tecniche vigenti:

- **UNI EN 12620** – Aggregati per calcestruzzo;
- **UNI EN 13139** – Aggregati per malta;
- **UNI EN 13043** – Aggregati per miscele bituminose;
- **UNI EN 13242** – Aggregati per materiali legati e non con leganti idraulici per opere di ingegneria civile.

CONFEZIONI:

Sabbia silicea Po Classica può essere fornita:

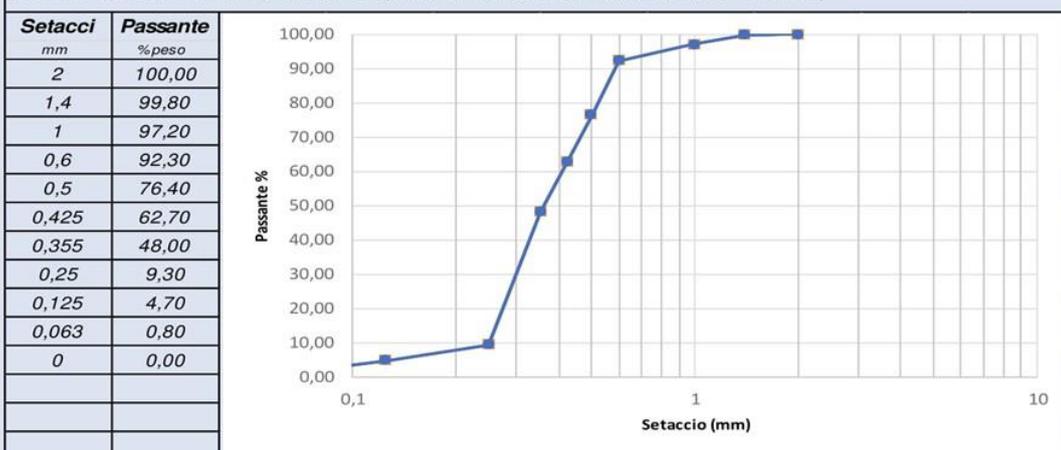
- **S102SAC** – sacco da 25 kg su pallet da 70 pz (1750 kg);
- **S102BIG** – bigbag da 1500 kg su pallet (a richiesta);
- **S102SFU** – sfusa.

CODICI EAN:



Scheda Tecnica rev. 01-2019

DATI TECNICI:			
Nome Commerciale		Sabbia SILICEA PO CLASSICA	
Tipo di Sabbia		Sabbia Silicea Umida 0,00 ÷ 2,00 mm	
Peso specifico		1460 kg/m ³ (variabile secondo l'umidità relativa)	
Umidità		Variabile	
Forma		Granuli tondeggianti	
Durezza MOHS		6	
pH		7	
ANALISI CHIMICA (fluorescenza a raggi X – valori indicativi)			
Silice (SiO ₂)	79.8%	Magnesio (MgO)	2.18%
Ferro (Fe ₂ O ₃)	2.42%	Sodio (Na ₂ O)	2.00%
Alluminio (Al ₂ O ₃)	3.28%	Potassio (K ₂ O)	1.96%
Calcio (CaO)	4.60%		

ANALISI GRANULOMETRICA (ottenuta mediante vibrosetacciatura meccanica a secco)**AVVERTENZE**

Stoccaggio e Conservazione	Conservare preferibilmente al riparo dalla luce solare diretta.
Data di confezionamento	Stampata sul fronte del sacco.

La presente scheda tecnica è redatta in base alle nostre migliori conoscenze tecniche ed applicative attuali, ha valore puramente indicativo e non può essere considerata come garanzia del risultato finale delle lavorazioni ottenute dall'impiego del prodotto stesso. Non potendo intervenire direttamente sulle condizioni dei cantieri e sull'esecuzione dei lavori le nostre indicazioni hanno un carattere generale che non vincolano in alcun modo la Bacchi S.p.A. e non dispensano l'utilizzatore dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per verificare che siano idonei o meno all'uso previsto assumendosi ogni responsabilità che possa derivarne dall'uso. L'utilizzatore è inoltre tenuto a verificare che la presente Scheda Tecnica sia valida per la partita di prodotto di suo interesse e non sia superata in quanto sostituita da edizioni successive. Nel dubbio l'utilizzatore può contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico. La Bacchi S.p.A. si riserva il diritto di apportare modifiche tecniche di qualsiasi genere senza alcun preavviso. La presente revisione annulla e sostituisce ogni altra precedente.



Dynamon SP1



Superfluidificante a base acrilica per calcestruzzi da prefabbricazione

DESCRIZIONE DEL PRODOTTO

Dynamon SP1 è un additivo a base acrilica specifico per il settore della prefabbricazione, appartenente al sistema MAPEI **Dynamon SP**.

CAMPI DI APPLICAZIONE

Grazie alla loro elevata lavorabilità (classe di consistenza S4 o S5 secondo norma UNI EN 206-1), i calcestruzzi confezionati con **Dynamon SP1** risultano di facile posa in opera allo stato fresco e di elevate prestazioni meccaniche allo stato indurito.

Dynamon SP1 è particolarmente indicato nel settore della prefabbricazione ed ovunque esista la necessità di una forte riduzione d'acqua, accompagnata da una buona accelerazione della resistenza meccanica alle brevi stagionature, in qualsiasi classe di consistenza e con temperature di maturazione superiori ai 15 gradi e con maturazione accelerata dei getti.

Le sue prestazioni lo rendono particolarmente idoneo anche per il confezionamento di calcestruzzi autocompattanti, in quanto **Dynamon SP1** è in grado di garantire un'elevata fluidità e nello stesso tempo non produce significativi rallentamenti dello sviluppo delle resistenze meccaniche del calcestruzzo a breve stagionatura.

I maggiori campi di applicazione di **Dynamon SP1** sono il confezionamento di calcestruzzi:

- per la produzione di travi in cemento armato precompresso, caratterizzati da alti valori di lavorabilità o da una resistenza meccanica a compressione R_{ck} al taglio dei trefoli, minima, di 35 N/mm²;
- per la produzione di tegoli di copertura in cemento armato precompresso, caratterizzati da alti valori di lavorabilità, da una resistenza meccanica a compressione R_{ck} minima, al taglio dei trefoli, di 35 N/mm² e ottimo lacciatista;

- per la produzione di pannelli di tamponamento, caratterizzati da un elevato grado di lavorabilità e di finitura superficiale in combinazione ad un ottimo lacciatista in opera;
- autocompattanti per la prefabbricazione. **Dynamon SP1**, in combinazione con l'additivo modificatore di viscosità **Viscofluid SCC/10** o **Viscostar 3K**, consente di ottenere calcestruzzi autocompattanti che possono essere posti in opera senza alcuna vibrazione, con un'elevata velocità di getto, grazie alle proprietà di scorrevolezza e di resistenza alla segregazione.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Dynamon SP1 è una soluzione acquosa di polimeri acrilici (privi di formaldeide), capaci di disperdere efficacemente i granuli di cemento.

MODALITÀ DI IMPIEGO

Dynamon SP1 sviluppa la massima azione disperdente se aggiunto dopo gli altri componenti dell'impasto (cemento, aggregati, aggiunte minerali o filler ed almeno l'80% dell'acqua dell'impasto) e prima di **Viscofluid SCC/10** o **Viscostar 3K**.

COMPATIBILITÀ CON ALTRI PRODOTTI

L'additivo **Dynamon SP1** è compatibile con altri prodotti per la produzione di calcestruzzi speciali ed in particolare con:

- gli additivi acceleranti di indurimento privi di cloruri della gamma **Mapofast**, per il raggiungimento di altissime resistenze meccaniche a breve stagionatura;
- gli additivi aeranti della gamma **Mapoair AE** per la produzione di calcestruzzi resistenti ai cicli gelo-disgelo.
- gli additivi modificatori di viscosità **Viscofluid SCC/10** o **Viscostar 3K**, per il confezionamento di calcestruzzi autocompattanti;

Dynamon SP1

DATI TECNICI (valori tipici)

DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO

Aspetto:	liquido
Colore:	ambrato
Massa volumica secondo ISO 758 (g/cm ³):	1,06 ± 0,02 a +20°C
Azione principale:	aumento della lavorabilità e/o riduzione dell'acqua d'impasto e rapido sviluppo delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature a temperature > 16°C
Classificazione secondo UNI EN 934-2:	riduttore d'acqua ad alta efficacia, superfluidificante, accelerante di indurimento, prospetti 3.1, 3.2 e 7
Classificazione secondo ASTM C494:	tipo F e tipo C
Classificazione secondo ASTM C1017:	tipo I
Cloruri solubili in acqua secondo EN 480-10 (%):	< 0,1 (assenti secondo UNI EN 934-2)
Contenuto di alcali (Na ₂ O equivalente) secondo EN 480-12 (%):	< 3,0
pH secondo ISO 4316:	6,5 ± 1,0

- l'additivo in polvere **Mapeplast SF** a base di microsilice per la produzione di calcestruzzi "top-quality" per resistenza meccanica, impermeabilità e durabilità;
- l'agente espansivo **Expaccrete** per la produzione di calcestruzzi a ritiro compensato;
- la cenere volante per la produzione di calcestruzzi tradizionali ed autocompattanti;
- filler calcarei e di altra natura per il confezionamento di calcestruzzi autocompattanti e di qualsiasi tipo che necessitano tale aggiunta;
- disarmanti **DMA** e **Mapeform Eco**, per la sfornatura del calcestruzzo dai casseri;
- gli stagionanti della gamma **Mapecure** per la protezione dalla rapida evaporazione dell'acqua d'impasto da strutture in calcestruzzo non casserate (pavimentazioni).

CONSUMO

Dosaggio in volume:

da 0,6 a 1,2 l per ogni 100 kg di cemento.

Dosaggi diversi da quelli indicati devono essere previamente testati mediante prove in calcestruzzo e, in ogni caso, dopo aver consultato l'assistenza tecnica MAPEI.

CONFEZIONI

Dynamon SP1 viene fornito sfuso, in fusti da 200 l, cisternette da 1000 l.

IMMAGAZZINAGGIO

Dynamon SP1 si conserva per 12 mesi in recipienti chiusi e protetti dal gelo. L'esposizione ai raggi solari diretti può provocare una variazione cromatica,

senza che ciò pregiudichi in alcun modo le caratteristiche prestazionali del prodotto.

ISTRUZIONI DI SICUREZZA PER LA PREPARAZIONE E LA MESSA IN OPERA

Dynamon SP1 non è considerato pericoloso ai sensi delle attuali normative sulla classificazione delle miscele. Si raccomanda di indossare guanti e occhiali protettivi e di utilizzare le consuete precauzioni per la manipolazione dei prodotti chimici. Per ulteriori e complete informazioni riguardo l'utilizzo sicuro del prodotto si raccomanda di consultare l'ultima versione della Scheda Dati Sicurezza.

PRODOTTO PER USO PROFESSIONALE.

AVVERTENZA

Le informazioni e le prescrizioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere confermate da esaurienti applicazioni pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intenda farne uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità che possa derivare dal suo uso.

Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito www.mapei.com

Le referenze relative a questo prodotto sono disponibili su richiesta e sul sito Mapei www.mapei.it e www.mapei.com

D. A. S. 0574

La riproduzione di testi, foto e illustrazioni di questo pubblicazione è vietata e viene perseguita ai sensi di legge.

671-3-2014



IL PARTNER MONDIALE DEI COSTRUTTORI



Mapeair AE 2

Aerante per calcestruzzi e malte cementizie

DESCRIZIONE

Additivo tensioattivo per l'inglobamento di microbolle d'aria in malte e calcestruzzi esposti a cicli di gelo-disgelo.

CAMPI DI APPLICAZIONE

Mapeair AE 2 può essere vantaggiosamente utilizzato nei seguenti campi applicativi:

- calcestruzzi durabili esposti alle alternanze termiche intorno a 0°C;
- calcestruzzi magri (dosaggio di cemento inferiore a 250 kg/m³) e carenti di sabbie fini che debbano essere pompati;
- calcestruzzi con aggregati leggeri per migliorare l'omogeneità dell'impasto, la lavorabilità e la messa in opera;
- malte da intonaco per murature per migliorare la tixotropia, la plasticità e l'adesione, oltre alla resistenza ai cicli di gelo-disgelo se applicate in ambienti esterni esposti ai climi freddi.

Alcuni esempi di applicazione

Tra i vari esempi applicativi si possono menzionare:

- opere idrauliche (quali dighe, canali, piscine, serbatoi) esposte ai climi freddi;
- pavimentazioni, solette, gallerie, parcheggi esposti all'azione dell'acqua piovana ed ai climi freddi;
- manufatti in calcestruzzo leggero strutturale (pannelli, solai, ecc.);

- rivestimenti con malte tissotropiche e termoisolanti.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Le principali caratteristiche tecniche dei conglomerati cementizi con agenti aeranti sono:

- la resistenza ai cicli di gelo-disgelo;
- la migliore pompabilità dei calcestruzzi magri con sabbie carenti di fini;
- la riduzione di segregazione nei calcestruzzi con aggregati leggeri.

Le malte e i calcestruzzi, anche se confezionati con basso rapporto acqua/cemento e quindi durabili in ambienti aggressivi, non sono in grado di resistere alle sollecitazioni cicliche derivanti dai fenomeni alternati di gelo e disgelo. Infatti la formazione di ghiaccio, che avviene con aumento di volume (circa 9%), provoca delle tensioni dirompenti nelle malte e nei calcestruzzi saturi di acqua come vengono a trovarsi questi materiali nelle opere idrauliche o più in generale nelle costruzioni esposte all'azione delle acque piovane (parcheggi all'aperto, piste aeroportuali, gallerie, ecc.). In questi casi, la prevenzione più efficace per contrastare la rottura a fatica derivante dai cicli di gelo-disgelo – ribadita anche dalla normativa UNI EN 206-1 – consiste nell'inglobare un minimo volume di aria (3-6%) sotto forma di microbolle stabili del diametro di 100-300 µm e tra loro uniformemente spaziate di 100-300 µm: in queste condizioni, allorché si formano i primi germi cristallini di ghiaccio, l'aumento di volume che ne consegue spinge l'acqua liquida non

Mapeair AE 2

DATI TECNICI (valori tipici)

DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO

Aspetto:	liquido
Colore:	giallo chiaro
Massa volumica secondo ISO 758 (g/cm ³):	1,02 ± 0,02 a +20°C
pH secondo ISO 4316:	7,8 ± 1,0
Azione principale:	aerante
Azioni collaterali:	fluidificante, coadiuvante di pompaggio ed anti-segregante per calcestruzzi leggeri
Classificazione secondo UNI EN 934-2:	additivo aerante secondo prospetto 5
Cloruri solubili in acqua secondo EN 480-10 (%):	< 0,1 (assenti secondo UNI EN 934-2)
Contenuti di alcali (Na ₂ O equivalente) secondo EN 480-12 (%):	< 2,0

ancora congelata nelle microbolle adiacenti provocando un benefico allentamento delle tensioni interne. Nella fase successiva di disgelo, per effetto della suzione capillare, l'acqua risale dalle microbolle verso i pori della circostante pasta cementizia lasciando le microbolle vuote pronte ad ospitare nuovamente l'acqua nella fase di congelamento del successivo ciclo termico naturale.

Accanto alla benefica azione contro gli effetti dirompenti derivanti dalla formazione del ghiaccio, l'inglobamento delle microbolle d'aria provoca purtroppo una diminuzione di circa il 20% della resistenza meccanica. Pertanto, qualora questa diminuzione di resistenza meccanica non sia compatibile con la resistenza meccanica di progetto occorre ridurre il rapporto acqua/cemento per compensare la diminuzione provocata dall'inglobamento di aria.

Per questo motivo, l'impiego di **Mapeair AE 2**, destinato ai calcestruzzi resistenti ai cicli di gelo-disgelo, deve essere sempre accompagnato da un additivo superfluidificante della gamma **Dynamon** o **Chronos**.

Negli altri campi di applicazione **Mapeair AE 2**, grazie allo sviluppo di microbolle d'aria sferiche e deformabili, sopperisce all'eventuale carenza nelle sabbie del

materiale fine (100-300 µm) indispensabile al pompaggio soprattutto dei calcestruzzi magri con basso dosaggio di cemento; inoltre, l'inglobamento di aria nei calcestruzzi con argilla espansa o polistirolo riduce la tendenza al "galleggiamento" degli aggregati (segregazione) in virtù di una minore differenza tra la massa volumica di questi ultimi e quella della pasta cementizia che risulta anch'essa alleggerita: ne consegue una maggiore omogeneità del conglomerato e quindi una maggiore uniformità delle caratteristiche termo-isolanti.

AVVISI IMPORTANTI

Non impiegare **Mapeair AE 2** se non si controlla il volume di aria sviluppato nel calcestruzzo mediante porosimetro. Non impiegare **Mapeair AE 2** in impasti troppo asciutti (con classe di consistenza S1) per la difficoltà a sviluppare aria in queste condizioni: occorre che la classe di consistenza del calcestruzzo fresco sia almeno S3.

MODALITÀ D'IMPIEGO

Per la produzione di calcestruzzi resistenti ai cicli di gelo e disgelo, il dosaggio di **Mapeair AE 2** per ottenere il volume di aria richiesto deve essere stabilito con prove preliminari presso l'impianto di betonaggio utilizzando gli stessi materiali (cemento, sabbia, aggregato grosso, ecc.) che verranno impiegati nella costruzione dell'opera.

Generalmente il dosaggio di **Mapeair AE 2** varia da 15 a 100 g per 100 kg di legante (cemento più eventuale cenere o fumo di silice). L'esatto dosaggio per ottenere il volume di aria prefissato dipende dai seguenti parametri:

- forma degli aggregati (tondi o frantumati);
- granulometria della sabbia;
- lavorabilità;
- tempi ed efficacia di mescolamento;
- tempo di trasporto;
- modalità di costipazione.

È consigliabile introdurre l'additivo **Mapeair AE 2** insieme all'acqua di impasto e mescolare efficacemente per qualche minuto al fine di favorire lo sviluppo dell'aria prefissato. L'effetto aerante, da controllare con il porosimetro, è tanto più efficace quanto più il calcestruzzo è fluido. Si raccomanda di aggiungere al calcestruzzo **Mapeair AE 2** separatamente dagli altri additivi.

Nel caso si impieghino ceneri volanti o prodotti a base di fumo di silice occorre prevedere un dosaggio di **Mapeair AE 2** leggermente superiore per ottenere lo stesso volume di aria di un calcestruzzo ordinario.

COMPATIBILITÀ CON ALTRI PRODOTTI

Mapeair AE 2 è compatibile con altri additivi per la produzione di calcestruzzi di qualità ed in particolare:

- gli additivi acceleranti di indurimento della gamma **Mapofast**, per il raggiungimento di elevate resistenze meccaniche a breve stagionatura anche in climi freddi;
- additivo in polvere **Mapoplast SF** a base di silice fume per la produzione di calcestruzzi "top-quality" per resistenza meccanica, impermeabilità, durabilità;
- gli additivi espansivi e riduttori del ritiro **Expancrete** e **Mapecure SRA 25**, per la produzione di calcestruzzi a ritiro compensato;
- disarmanti **Mapeform Eco** e **DMA** per la sformatura del calcestruzzo dai casseri;
- gli stagionanti della gamma **Mapecure** per la protezione dalla rapida evaporazione dell'acqua d'impasto da strutture in calcestruzzo non casserate.

CONSUMO

Mapeair AE 2 va dosato da 15 a 100 g per 100 kg di legante per la produzione di calcestruzzi resistenti ai cicli di gelo-disgelo. Dosaggi leggermente maggiori possono essere previsti nel caso di calcestruzzi contenenti cenere volante, fumo di silice o altre aggiunte.

Nella produzione di malte tissotropiche per murature (da allettamento e da intonaco) il dosaggio raccomandato di **Mapeair AE 2** è di 0,1-0,3% sul peso del legante (cemento, calce, cenere, ecc.).

CONFEZIONI

Mapeair AE 2 è disponibile sfuso in cisternette da 1000 l, fusti da 200 l, in taniche da 1, 5, 10 e 25 kg.

IMMAGAZZINAGGIO

Mapeair AE 2 si conserva per 12 mesi in recipienti chiusi e protetti dal gelo.

ISTRUZIONI DI SICUREZZA PER LA PREPARAZIONE E LA MESSA IN OPERA

Mapeair AE 2 è corrosivo e può causare danni oculari. Durante l'applicazione indossare guanti e occhiali protettivi e utilizzare le consuete precauzioni per la manipolazione dei prodotti chimici. In caso di contatto con gli occhi o la pelle, lavare immediatamente e abbondantemente con acqua e consultare un medico. Per ulteriori e complete informazioni riguardo l'utilizzo sicuro del prodotto si raccomanda di consultare l'ultima versione della Scheda Dati Sicurezza.

PRODOTTO PER USO PROFESSIONALE.

AVVERTENZA

Le informazioni e le prescrizioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere confermate da esaurienti applicazioni pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intenda farne uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità che possa derivare dal suo uso.

Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito www.mapei.com

Le referenze relative a questo prodotto sono disponibili su richiesta e sul sito Mapei www.mapei.it e www.mapei.com

Bibliografia e sitografia

1. Orient Display, <https://www.orientdisplay.com/it/knowledge-base/tft-basics/how-does-tft-displays-work/>
2. Elettronica open source, <https://it.emcelettronica.com/introduzione-alla-tecnologia-lcd-e-utilizzo-con-modulo-engicam-gea-m6425>
3. Lenntech. Lenntech BV. [Online] 2019.
<https://www.lenntech.it/periodica/elementi/in.htm>
4. Commissione Europea, “Resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità” (2020)
5. Commissione Europea, “Critical raw material closed loop recovery” (2015)
6. Giacomo Maccari, Valorizzazione e riuso di frammenti LCD da rifiuti RAEE nei materiali da costruzione in seguito all'estrazione dell'indio (2021)
7. <https://www.wup-cementi.it/innovazione/la-norma-uni-en-197-1/>
8. Encosrl, <https://www.encosrl.it/superfluidificanti-ed-altri-additivi-calcestruzzo/>
9. Collepari, Mario, Collepari, Silvia e Troli, Roberto. Il nuovo calcestruzzo. Ponzano Veneto: ENCO srl, 2009
10. Michela Mengucci, Valorizzazione dei rifiuti RAEE in diverse catene di valore: effetto dell'impiego di frammenti LCD in materiali da costruzione (2019)
11. Alfatest, <https://alfatest.it/tecniche/porosimetria-hg>
12. Valentina Scaramucci, Additivi da rifiuto per malte e calcestruzzi sostenibili (2020)
13. Test di cessione in gazzetta ufficiale,
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaArticolo?art.progressivo=0&art.idArticolo=1&art.versione=1&art.codiceRedazionale=098A3052&art.dataPubblicazioneGazzetta=19980416&art.idGruppo=0&art.idSottoArticolo1=10&art.idSottoArticolo=1&art.flagTipoArticolo=3
14. <http://www.tecnorifiuti.it/>