



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 e riuso di frammenti LCD da rifiuti RAEE nei materiali da costruzione in seguito all'estrazione dell'indio

Valorization and reuse of LCD scraps from WEEE waste in construction materials after indium extraction

Relatrice

Prof.ssa Maria Letizia Ruello

Tesi di Laurea di

Maccari Giacomo

Correlatori

Ing. Chiara Giosué

Dott. Alessandro Becci

Anno Accademico

2020/2021

Indice

1. Introduzione	4
1.1 Contesto sostenibile	4
1.2 Scopo della tesi e ricerche precedenti	4
1.3 Numeri e quantità	5
1.4 Schermi LCD	6
1.5 Indio	7
1.6 Additivo aerante	8
2. Materiali	9
2.1 LCD	9
2.2 CEM II/A-LL 42,5 R	10
2.3 Sabbia del Po	11
2.4 Additivo superfluidificante Dynamon SP1	12
2.5 Additivo aerante Mapeair AE2	12
3. Metodi e caratterizzazione dei materiali	13
3.1 Caratterizzazione LCD in arrivo da impianto	13
3.1.1 Materiali usati	13
3.1.2 Metodi	14
3.1.3 Risultati e osservazioni	16
3.2 Macinazione del rifiuto	23
3.2.1 Materiali usati	23
3.2.2 Metodo	23
3.2.3 Risultati e osservazioni	25
3.3 Estrazione dell'indio	26
3.3.1 Metodo	26
3.3.2 Risultati e osservazioni	26
3.3.3 Lavaggio dei frammenti	28
3.4 Analisi di solfati e cloruri	29
3.4.1 Metodo	30
3.4.2 Risultati e osservazioni	31
3.5 Mix Design	33
3.5.1 Caratterizzazione LCD trattato	33
3.5.2 Caratterizzazione della sabbia silicea del Po	36
3.5.3 Mix Design delle malte	39

3.5.4	Gettata dei provini	40
3.5.5	Prova di lavorabilità.....	45
3.5.6	Misura della densità	45
3.5.7	Calcolo delle resistenze meccaniche.....	46
4.	Risultati e osservazioni.....	51
4.1	Caratterizzazione fisica delle malte.....	51
4.1.1	Risultati lavorabilità	51
4.1.2	Risultati densità.....	55
4.1.3	Risultati resistenze meccaniche	57
4.2	Relazioni tra i risultati	60
5.	Conclusioni	62
5.1	Estrazione indio.....	62
5.2	Riutilizzo LCD nei materiali da costruzione	62
5.2.1	Lavaggio.....	62
5.2.2	Additivo aerante.....	62
6.	Appendice	64

1. Introduzione

1.1 Contesto sostenibile

Nel 2018 l'Unione Europea ha pubblicato il Pacchetto Economia Circolare contenente delle direttive volte a modificarne alcune già esistenti in materia di rifiuti, seguito nel marzo 2020 da un piano di azione. Questo piano delinea una strategia concertata per un'economia climaticamente neutra, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva; l'estensione dell'economia circolare dai precursori agli operatori economici tradizionali è necessaria per raggiungere l'ambizioso ma fondamentale, in luce delle evidenze scientifiche sui cambiamenti climatici e le loro conseguenze, obiettivo della neutralità climatica entro il 2050 e della dissociazione della crescita economica dall'uso delle risorse, garantendo nel contempo la competitività a lungo termine dell'UE senza lasciare indietro nessuno¹.

Il concetto di economia circolare, nonostante sostanzialmente si rifaccia a correnti di pensiero già presenti da molto tempo in altri ambiti, ha avuto un primo sviluppo teorico negli anni Settanta del Novecento; ma come è possibile evincere dalle iniziative dell'UE precedentemente citate solo recentemente sono stati fatti dei passi concreti verso l'attuazione di tale principio, a causa di una sempre maggiore, ma comunque tardiva, consapevolezza riguardo al tema dei cambiamenti climatici, le loro conseguenze e ciò che la scienza propone per tentare di arginare il fenomeno. Perciò la progettazione a monte dei prodotti in un'ottica di un'economia circolare è un fenomeno ancora recentissimo e di conseguenza la maggior parte dei rifiuti che ci troviamo a trattare oggi derivano da prodotti concepiti all'interno di un'ottica di economia lineare. La tempestività d'intervento necessaria per raggiungere gli obiettivi di neutralità carbonica passa dunque anche dal trattamento di questi rifiuti, come è nel caso qui trattato di recupero e riciclo di rifiuti speciali, in particolare di schermi LCD. La circolarità e il riciclo delle materie prime da tecnologie a basse emissioni di carbonio sono parti integranti della transizione verso un'economia climaticamente neutra².

1.2 Scopo della tesi e ricerche precedenti

Questa ricerca si svolge su scala pilota e ha l'obiettivo di individuare ed indagare la fattibilità di un processo di trattamento dei rifiuti da schermi LCD che parte dalla macinazione primaria in impianto di trattamento, passa per l'estrazione dell'indio e si conclude con la valorizzazione dell'intera parte restante come additivo nei materiali da costruzione, nello specifico nella realizzazione di malte alleggerite, quindi la possibilità di utilizzarlo come additivo aerante e fluidificante. Questo processo vuole essere reso il più semplice possibile per minimizzare i costi sia ambientali che economici riducendo al minimo il numero di step e di risorse utilizzate nel trattamento.

Sono diverse le ricerche sull'uso della polvere di LCD in sostituzione dell'aggregato^{21,7} o del cemento⁷ nei materiali da costruzione, meno numerose invece quelle sull'uso della stessa come additivo aerante.

Alcuni progetti di ricerca precedenti interni all'UNIVPM hanno investigato su scala minore l'argomento, mentre in questo caso si porta la ricerca ad uno step successivo lavorando in scala pilota, trattando dunque una quantità di materiale significativa proveniente da un impianto di trattamento rifiuti.

1.3 Numeri e Quantità

Secondo il rapporto annuale 2020 del CdC RAEE³ i rifiuti RAEE raccolti ricadenti nella categoria R3, ovvero schermi tv e monitor (CER 200135*-160213*), ammontano a 62.272 tonnellate annue, con un aumento del 4,02% rispetto all'anno precedente. Solo in parte questi rifiuti saranno costituiti da schermi LCD; parte di quelli conferiti ai centri di raccolta infatti sono vecchi schermi che utilizzano altre tecnologie (schermi a tubo catodico). È però facile immaginare che con il passare degli anni la percentuale di schermi riferibili alla tecnologia LCD aumenti a discapito delle vecchie.

La produzione di calcestruzzo in Italia registrata per l'anno 2019 si attesta sui 28,4 milioni di m³ secondo il rapporto di filiera 2019 della Federbeton⁴ (ovvero circa 68 milioni di tonnellate). Risulta evidente come la produzione di calcestruzzo nel paese si collochi su una scala di diversi ordini di grandezza superiore alla quantità disponibile di schermi LCD da poter avviare al riciclo. Quindi potrebbe essere più significativo pensare al riciclo di rifiuti da LCD sotto forma di additivo aerante (che implica una presenza al max del 5% in peso del legante all'interno dell'impasto) in una filiera come quella della produzione, ad esempio, di calcestruzzi alleggeriti che rappresenta una fetta minoritaria della produzione totale.



Figura 1³ - Quantità raccolte nel 2020 di rifiuti RAEE appartenenti alla categoria R3 e aumento in percentuale rispetto all'anno precedente

1.4 Schermi LCD

Quella LCD (Liquid Crystal Display) è una tecnologia che a partire dagli anni 2000 si è imposta come la più usata per la realizzazione di display grazie alla sua maggiore qualità, la buona durata e un prezzo accessibile. Ad oggi è ampiamente usata per realizzare schermi di televisori e smartphone e monitor dei computer.

Il principio di funzionamento dei display LCD si basa sostanzialmente sulle proprietà ottiche dei cristalli liquidi, composti organici che si trovano in fasi intermedie tra quella solida cristallina e quella liquida. La proprietà fondamentale di questo tipo di molecole è rappresentata dalla possibilità di cambiarne l'ordine e l'orientamento per mezzo di un campo elettrico; di conseguenza controllando la torsione dei cristalli liquidi è possibile alterare la polarizzazione della luce e quindi filtrarla. Lo strato centrale di cristalli liquidi si trova tra due lastre di vetro ricoperte da sottili film polimerici e ossidi di metallo, sulle quali sono presenti numerosi contatti necessari per applicare il campo elettrico. Ogni contatto elettrico controlla una piccola sezione del pannello chiamata pixel, composto da tre sub-pixel, uno per ogni colore primario (rosso, verde e blu) rappresentabile in 256 diverse sfumature. La combinazione delle sfumature permette un'ampia gamma di colori per ogni singolo pixel e l'insieme dei pixel va poi a formare l'immagine sullo schermo. Inoltre, se il display LCD è di tipo trasmissivo, sarà presente una sorgente di luce di retroilluminazione. I display LCD di tipo riflettivo invece sfruttano la luce ambientale riflessa da uno specchio sul retro dello schermo, permettendo un notevole risparmio energetico a discapito però di un contrasto e di una luminosità minori.

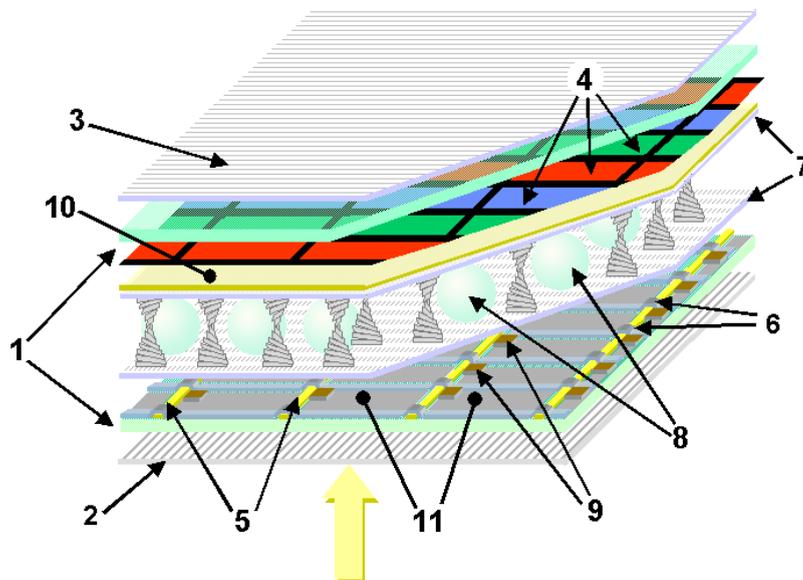


Figura 2: schema schermo LCD. 1-Piastra di vetro; 2,3-Filtri polarizzatori orizzontali e verticali; 4-Matrice colori RGB; 5,6-Linee di comando orizzontali e verticali; 7-Strato di polimeri; 8-Separatori; 9-Strati di semiconduttore attivo (TFT-Thin Film Transistor); 10-Elettrodo anteriore; 11-Elettrodo posteriore¹¹

La vita utile tendenzialmente lunga degli schermi LCD e l'arrivo sul mercato relativamente recente degli stessi hanno come conseguenza che ad oggi una parte sostanziale dei display conferiti come rifiuti RAEE siano dotati di tecnologie precedenti. È comunque facilmente prevedibile che con il passare degli anni la

quantità di schermi LCD raccolti come rifiuti sia destinata ad aumentare, anche per l'eventuale sviluppo di nuove tecnologie, e dunque lo smaltimento e soprattutto il recupero delle componenti di questi display è attualmente un argomento di forte interesse.

1.5 Indio

Analizzando le componenti di un display LCD notiamo che alcuni materiali, come il vetro e la plastica, sarebbero facilmente riciclabili con le tecniche correnti. Ma uno dei materiali che suscita l'interesse maggiore si trova nel sottile strato di ossidi metallici: si tratta dell'indio (In). L'indio è un metallo morbido, duttile, malleabile e brillante. È di colore bianco argenteo ed ha una struttura tetragonale a facce-centrate. È liquido in una vasta gamma di temperature, è stabile in aria ed in acqua ma si dissolve in acidi⁵. Questo metallo viene utilizzato nei display a cristalli liquidi prevalentemente sotto forma di ossido di indio dopato con stagno come sottile strato semi-conduttore applicato sulla lastra di vetro⁶.

La Commissione Europea stila ogni tre anni una lista di “Critical Raw Materials”, ovvero un elenco delle materie prime più importanti dal punto di vista economico e che presentano un elevato rischio di approvvigionamento da parte dei paesi dell'UE. Tali materie prime sono essenziali per il funzionamento e l'integrità di una vasta gamma di ecosistemi industriali e svolgono dunque un ruolo primario e delicato nell'economia europea.²

L'indio figura nella lista dei “Critical Raw Materials” del 2020. Le ragioni principali del suo inserimento sono la sua importanza per settori fondamentali come quello delle industrie elettronica, digitale e delle energie rinnovabili e la sua scarsa abbondanza nella crosta terrestre con una concentrazione di 0.45 nmol per grammo⁶. Nonostante i principali paesi produttori a livello mondiale si trovino fuori dall'UE (Cina e Corea), l'Europa riesce a non essere dipendente dalle importazioni grazie ad alcuni paesi che permettono un approvvigionamento interno (principalmente Francia e Belgio), tanto che l'UE risulta esportatrice netta di indio. Rimane in ogni caso molto importante un suo recupero dai rifiuti RAEE considerando che secondo quanto riportato proprio nel documento sui “Critical Raw Materials” nel caso delle materie prime impiegate nelle tecnologie per le energie rinnovabili o in applicazioni altamente tecnologiche, come le terre rare, il gallio o l'indio, la produzione secondaria rappresenta soltanto un contributo marginale; per quanto riguarda l'indio nello specifico la percentuale di domanda interna di materie prime soddisfatta dal riciclo, ovvero il tasso di riciclo, è nullo (0%). Si tratta di un'enorme perdita di valore potenziale per l'economia dell'UE e di una fonte di stress evitabile per l'ambiente e il clima².

La maggior parte dei rifiuti da LCD a fine vita viene trattata con metodologie standard, quali la discarica e l'incenerimento. Sono stati fatti numerosi studi su come riciclare tali scarti, ma ancora non è stata messa a punto alcuna misura o processo di recupero e riciclaggio applicabile su larga scala che sia conveniente⁷. A causa della sua bassa concentrazione nei rifiuti da schermi LCD, infatti, il recupero del solo indio non è sostenibile né sul piano economico né su quello ambientale senza poi il successivo recupero e valorizzazione della restante frazione del rifiuto⁸.

1.6 Additivo Aerante

Come descritto dalla UNI EN 934-2 gli aeranti sono additivi che consentono, modificando la tensione superficiale dell'acqua, di incorporare una quantità controllata di microbolle d'aria omogeneamente distribuite durante la fase di miscelazione del calcestruzzo fresco, che permangono anche dopo l'indurimento diventando parte della matrice legante. Le bolle devono essere non comunicanti tra loro né con l'esterno. Gli additivi aeranti vengono aggiunti agli impasti di calcestruzzo per migliorarne, allo stato indurito, la resistenza ai cicli di gelo e disgelo, specialmente in quelli sottoposti a costanti bagnature o saturi d'acqua. Per capirne il meccanismo è necessario illustrare i diversi tipi di porosità che possono essere trovate in un calcestruzzo. Passando dalle piccole alle più grandi in termini dimensionali, le porosità possono essere suddivise in: pori di gel, porosità capillari e pori d'aria. I pori di gel e le porosità capillari si formano per reazione di idratazione del cemento con l'acqua. I pori di gel sono i più piccoli, da 0,5 a 10 nm e la loro dimensione e percentuale è poco influenzata dalla composizione del calcestruzzo. Le porosità capillari, le cui dimensioni variano dai 10 - 5 nm ai 10 μm sono le porosità che si formano tra i vari granuli di cemento che si idratano. Questo tipo di porosità è fortemente legato al rapporto acqua-cemento ed alla quantità di prodotti di idratazione, quindi alla composizione ed alla stagionatura del calcestruzzo, ed è responsabile di molti dei fenomeni che influenzano il degrado, come il ritiro e la permeabilità. Infine, la porosità di maggiori dimensioni, da 0,1 a 5 mm, è la porosità dovuta all'inglobamento dell'aria durante la confezione del calcestruzzo. Con l'utilizzo di un additivo aerante si vanno a creare delle microbolle d'aria di dimensioni ottimali che occludono i pori capillari fungendo da cuscinetto nei cicli gelo-disgelo, ovvero assorbendo le tensioni generate dalla pressione idraulica che si forma in seguito ai passaggi di stato dell'acqua presente nei pori che passa dallo stato liquido a quello solido espandendosi. Inoltre, l'aria che si forma all'interno della pasta migliora le proprietà del calcestruzzo fresco: le bolle d'aria diminuiscono gli attriti tra le particelle favorendo la fluidità e la lavorabilità. Un non trascurabile effetto ulteriore causato dagli additivi aeranti è la diminuzione della resistenza meccanica, a parità di rapporto acqua-cemento, rispetto ad un calcestruzzo non aerato. La diminuzione di resistenza non deve comunque mai superare il 20%.

In questa tesi verrà indagata la possibilità di usare i rifiuti da LCD in seguito all'estrazione dell'indio, opportunamente macinati e lavati, come additivo aerante; il compito di aerante sarebbe svolto in particolare dai tensioattivi presenti nei cristalli liquidi rimasti anche dopo il lavaggio e che svolgerebbero una funzione da additivi schiumogeni⁷.

2. Materiali

2.1 LCD

Il materiale soggetto di questa ricerca 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) dopo essere stato sottoposto ad una macinazione primaria che ne ha ridotto le dimensioni massime a 10 cm. L'impianto della RIMEL riceve e tratta 30 tonnellate di rifiuti RAEE al giorno. A differenza delle precedenti ricerche⁷ in questo caso, dunque, non c'è stato uno smontaggio manuale e puntuale del display dal suo supporto e la quantità di materiale a disposizione è maggiore essendo questa ricerca condotta su scala pilota.



Figura 3 – Sacchi di LCD macinato forniti dall'impianto di trattamento RIMEL

Il materiale è stato poi macinato e setacciato per ottenere una dimensione massima di 1 mm. Sulla sabbia di LCD così ottenuta si è svolta l'estrazione dell'indio attraverso la lisciviazione con acido solforico 2M. Il materiale, una volta lavato per eliminare l'acido residuo (3.3.3 lavaggio dei frammenti), è stato ulteriormente setacciato con setaccio di apertura 75 μm per dividere la frazione più fine (<0,075 mm). Questo sarà utile nella preparazione delle miscele perché sarà interesse di questa ricerca indagare se utilizzare l'intera frazione tal quale dia risultati equiparabili al solo utilizzo della frazione fine sotto i 75 μm .

Per la caratterizzazione specifica del materiale si rimanda al capitolo 3.

2.2 CEM II/A-LL 42,5 R

Il cemento è il componente fondamentale della miscela di calcestruzzi e malte. È un legante idraulico, ovvero una sostanza che miscelata con l'acqua sviluppa caratteristiche adesive. Può essere miscelato con acqua e aggregato fine (sabbia), ottenendo una malta cementizia, oppure con acqua e aggregati di diverse dimensioni, ottenendo il calcestruzzo. Vista la possibilità di ottenere cementi con caratteristiche diverse tra loro, la norma UNI EN 196 si occupa di classificare i cementi individuandone 5 tipi differenti e la norma UNI EN 197-1:2011 definisce 6 classi di resistenza meccanica.

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	-		

Tabella 1 – Classi di resistenza dei cementi (UNI EN 197-1:2011)⁹

Il cemento più utilizzato è quello Portland di tipo II che si ottiene dalla miscelazione di clinker, una miscela di minerali ed argille che deve contenere silicati di calcio e ossido di alluminio, e minerali solfatici (gesso o anidrite), che fungono da regolatori di presa e permettono il trasporto del composto, aggiunti con percentuali fino al 35%.

lasciata essiccare all'aria prima di essere utilizzata. La caratterizzazione granulometrica è riportata nel capitolo 3 e la scheda tecnica della sabbia silicea Po classica umida si trova nel capitolo 6, Appendice.

2.4 Additivo Superfluidificante Dynamon SP1

Gli additivi sono definiti dalla norma UNI EN 934-2 come “un materiale da aggiungere durante il confezionamento del calcestruzzo in quantità non superiore al 5% in massa sul contenuto di cemento”. Nello specifico gli additivi superfluidificanti contengono sostanze polimeriche idrosolubili con proprietà disperdenti. Queste sostanze, che contengono gruppi funzionali carichi in genere negativamente, si adsorbono sulla superficie dei granuli parzialmente idratati di cemento dotando i granuli stessi della carica elettrica; in questo modo le particelle di cemento, che solitamente tendono ad aggregarsi e flocculare, si respingono tra loro e si disperdono nell'acqua. Grazie a questo meccanismo gli additivi superfluidificanti permettono, senza influenzare la lavorabilità rispetto ad un calcestruzzo non additivato, di ridurre il contenuto di acqua nella miscela (riduzione del rapporto a/c di almeno il 12%) oppure a parità d'acqua di aumentarne la lavorabilità, caratteristica principale del calcestruzzo fresco che può essere misurata attraverso il metodo della consistenza al cono di Abrams o slump.

Data la natura dei componenti utilizzati nella miscela, come la sabbia fine, è stato aggiunto un dosaggio di additivo superfluidificante Dynamon SP1-Mapei in tutte le miscele, un additivo composto da una soluzione acquosa di polimeri acrilici.

2.5 Additivo Aerante Mapeair AE2

Questo additivo è stato aggiunto in un solo tipo di miscela, ovvero quella di riferimento con aerante. L'idoneità della polvere di LCD come additivo aerante verrà valutata confrontando dunque i suoi effetti con quelli di un comune additivo aerante in commercio.

3. Metodi e caratterizzazione dei materiali

In questo capitolo verranno trattate tutte le modalità di preparazione e trattamento dei materiali e delle malte, nonché le metodologie di analisi condotte sugli stessi materiali e i risultati della caratterizzazione.

3.1 Caratterizzazione LCD in arrivo da impianto

L'obiettivo di quest'analisi è arrivare a definire la caratterizzazione del rifiuto in arrivo dall'impianto di trattamento prima che venga ulteriormente lavorato; questa consiste di una caratterizzazione fisica, che è rappresentata dall'analisi granulometrica, e di una merceologica. Lo scopo di questa prima analisi è ottenere informazioni sul rifiuto in arrivo dall'impianto per stabilirne la qualità e per poterlo poi confrontare con lo stesso rifiuto sottoposto ad ulteriori trattamenti volti in primis al recupero dell'indio contenuto al suo interno e successivamente a migliorare la qualità della parte restante in ottica di un suo riciclo come additivo aerante per la realizzazione di malte cementizie alleggerite.

3.1.1 Materiali usati

Il materiale da caratterizzare ricade sotto la categoria dei rifiuti RAEE, nello specifico rifiuti da schermi LCD, provenienti da un impianto di trattamento. In impianto i display LCD arrivano come rifiuti speciali pericolosi con i codici CER 200135* 160213*; successivamente gli schermi vengono disassemblati dal supporto, bonificati dalle componenti pericolose e sottoposti ad una macinatura primaria. È importante sottolineare la variabilità di questa tipologia di rifiuti che dipende prevalentemente dall'avanzamento costante della tecnologia nel settore degli schermi, soprattutto per quanto riguarda gli schermi degli smartphone e dei computer portatili, e che i rifiuti conferiti agli impianti di smaltimento sono riconducibili a tecnologie di qualche anno precedente; infatti si può considerare la vita utile media in Italia paria a 18-24 mesi per gli smartphone e 4 anni circa per i computer portatili (Bakker et al. 2014)¹². Al momento della caratterizzazione è fondamentale considerare che dal rifiuto in ingresso è stata già rimossa tramite setacciatura la parte fine (<1 mm), che perciò non sarà considerata nella seguente analisi.

3.1.2 Metodi

Precedentemente all'analisi merceologica si è approntata la preparazione di un campione rappresentativo del materiale a partire dall'intero lotto di 4,820 kg, da cui è importante ricordare che era già stato rimosso il materiale fine passante ad 1 mm. Si è seguito il procedimento standard di inquartamento che viene usato per la preparazione dei campioni rappresentativi di RSU e descritto nella metodologia CNR ma con un quantitativo minore di materiale. La totalità del materiale è stata disposta sopra un piano pulito in modo da formare una torta circolare di altezza pari a 7 cm e diametro pari a 50 cm; la torta è stata poi divisa in quattro quadranti di eguali dimensioni di cui ne sono stati selezionati due diagonalmente opposti e scartati gli altri due. Il materiale selezionato viene nuovamente disposto sul piano formando una torta di 50 cm di diametro e di altezza pari a 3 cm e il processo precedente viene ripetuto. In questo modo a partire dai 4,820 kg iniziali si è ottenuto un campione rappresentativo omogeneo di 1,154 kg. Il campione ottenuto è stato nuovamente disposto sul piano e diviso manualmente in due parti: una destinata all'analisi merceologica (0,622 kg) e l'altra all'analisi granulometrica (0,530 kg).



Figura 4 – Prima torta circolare ($h=7$ cm, $d=50$ cm) per il processo di inquartamento



Figura 5 – Campione rappresentativo omogeneo (1,154 kg)

L'analisi merceologica è stata effettuata manualmente e sono state individuate inizialmente otto categorie merceologiche: vetro, film polimerici con frammenti di vetro adesi, metalli, schede elettroniche, polietilene ad alta densità (HDPE), cavi e gomma, carta, altro. Durante la selezione manuale si è deciso di aggiungere la categoria del materiale fine (1 mm – 4 mm) ottenuto tramite setacciatura con setaccio a maglie di apertura pari a 4 mm vista la difficoltà nel selezionare manualmente e distinguere le diverse categorie merceologiche quando le dimensioni del materiale erano troppo ridotte. I materiali appartenenti alle diverse categorie sono stati riposti in contenitori diversi, che erano già stati precedentemente pesati per stabilirne la tara, per poi essere singolarmente pesati per ottenere la percentuale in peso di ogni categoria merceologica.

Per l'analisi granulometrica ci si è avvalsi di una batteria di dieci diversi setacci tutti precedentemente pesati per stabilirne la tara. Il materiale designato per l'analisi è stato diviso in tre parti omogenee per ottenere tre distinte curve granulometriche. Ogni frazione è stata versata dall'alto nella batteria di setacci disposti in ordine da quello con apertura maggiore (32 mm) a quello con apertura minore (1 mm) seguito da un contenitore di fondo per raccogliere l'eventuale frazione fine (< 1 mm). Dopo aver vibrato la batteria di setacci per favorire il passaggio dei frammenti, ogni setaccio è stato pesato singolarmente con il suo trattenuto. Dopo la pulizia dei setacci l'operazione è stata ripetuta per le altre due parti. Per costruire le curve cumulative si è passati dalla percentuale di trattenuto cumulativo alla percentuale di passante cumulativo.

3.1.3 Risultati ed osservazioni

Considerando i risultati dell'analisi merceologica è importante evidenziare che le percentuali delle varie frazioni sono espresse in peso. Vista la differenza di peso specifico tra i materiali considerati (tabella 3) i risultati sarebbero diversi considerando la percentuale in volume

Materiale	Peso Specifico
	Kg/m ³
Vetro	2400-2700
HDPE	940
Carta	970
CTA - PVA	1190-1320
Gomma	1700-2200
Alluminio	2700

Tabella 3 - Pesì specifici materiali relativi alle varie frazioni merceologiche



Figura 6 - Vetro



Figura 7 - plastica



Figura 8 - Metallo



Figura 9 – Schede



Figura 10 – HDPE



Figura 11 – Cavi e gomma

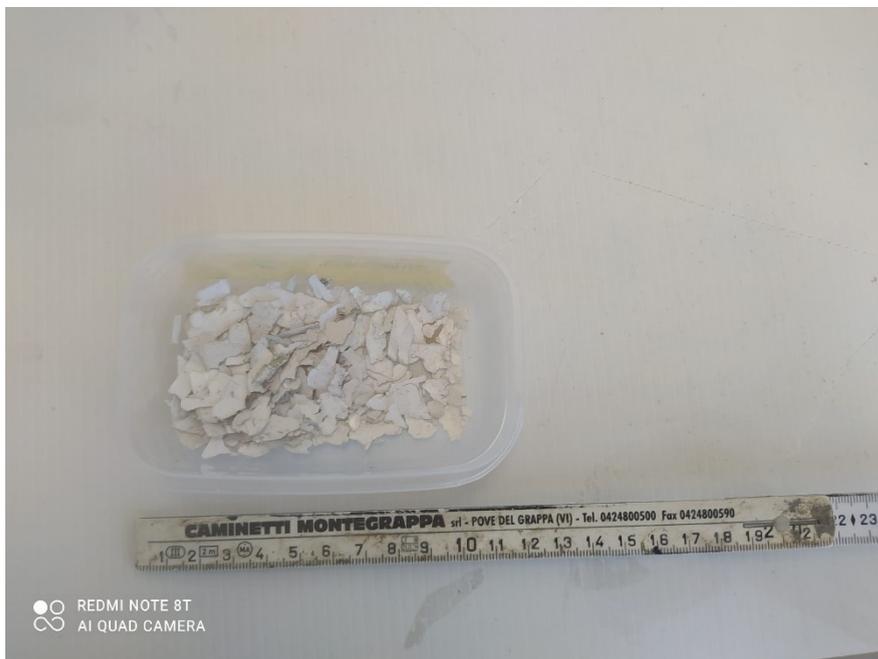


Figura 12 – Carta



Figura 13 – Altro

Per considerare le percentuali delle varie categorie si è tenuto conto della totalità del materiale di partenza, inclusa la frazione fine rimossa prima dell'analisi merceologica, che per questo particolare lotto ammonta al 12% del peso totale. La frazione che risulta nettamente prevalente è quella del vetro che costituisce la metà in peso del campione (50,6%), seguita dal film polimerico (9,4%) principalmente composto da triacetato di cellulosa (CTA) e alcool polivinilico (PVA)¹³ con adesivi frammenti di vetro. La frazione metallica (7,1%) è composta principalmente da alluminio e ferro e le frazioni fini (0-4 mm) complessivamente ammontano al 27,1% grazie alla macinatura primaria in impianto e probabilmente in parte anche a causa dell'attrito tra le varie particelle durante la preparazione del campione. Ad un'analisi visiva la categoria merceologica prevalente nella frazione fine (1-4 mm) risulta essere sempre il vetro. Le frazioni meno rilevanti risultano essere la carta (0,3%), le schede elettroniche (0,8%) e la categoria cavi e gomma (0,6%). Nella frazione merceologica catalogata come altro (0,1%) si trovano principalmente frammenti di legno. Lo stesso legno, il metallo, il polietilene ad alta densità (4%), la gomma ed altre impurezze sono facilmente riconducibili alle cornici degli schermi LCD e ai cavi. La loro presenza è molto probabilmente dovuta ad un lavoro di disassemblaggio svolto nell'impianto di trattamento su scala industriale e quindi non estremamente preciso. La presenza di questi materiali non strettamente presenti nei display è caratteristica della ricerca su scala pilota e vanno dunque tenuti in considerazione in vista di un eventuale processo di recupero e riciclo su scala industriale; questi, infatti, non erano presenti nelle ricerche precedenti⁷ nelle quali gli schermi LCD venivano disassemblati con più precisione manualmente dai ricercatori.

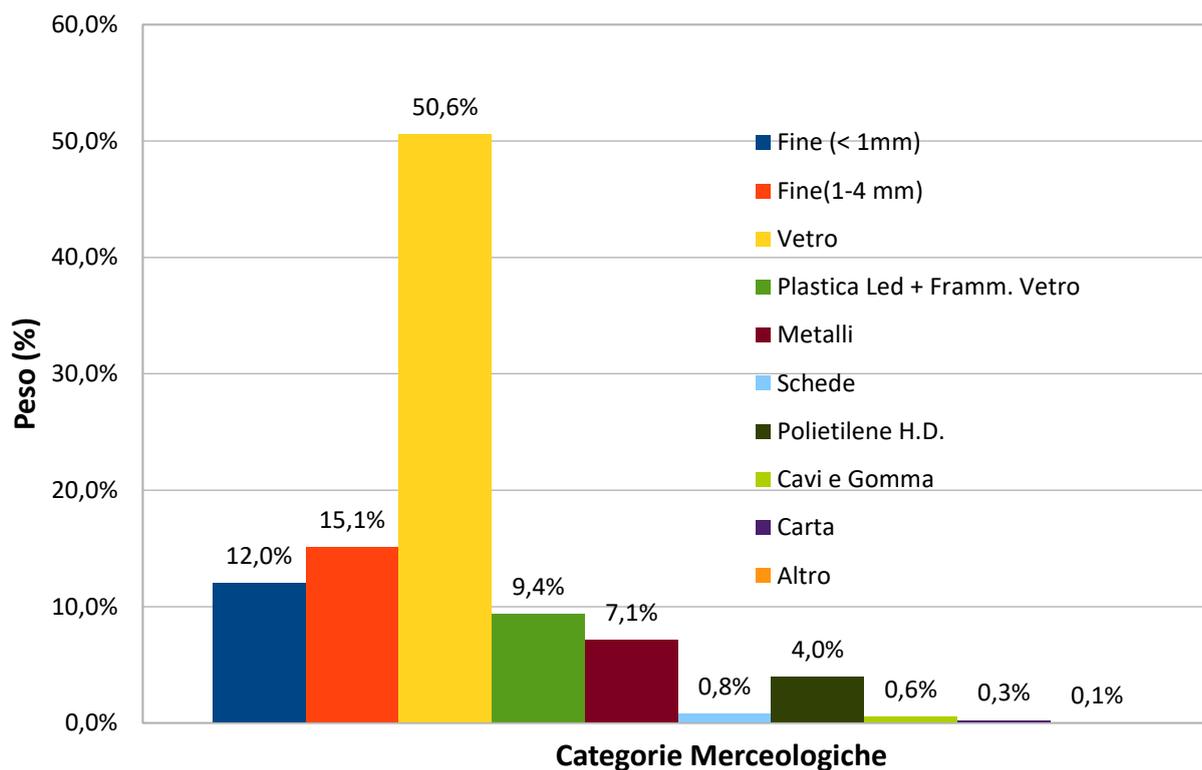


Grafico 1 - Percentuale in peso delle categorie merceologiche

Per quanto riguarda l'analisi granulometrica bisogna innanzitutto ricordare l'assenza della frazione fine (< 1 mm) nel campione rappresentativo con il quale si sono realizzate le curve rappresentate nel grafico 2. Solamente nella rappresentazione della curva media si è tenuto conto del materiale fine che in questo caso equivale al 12% del totale.

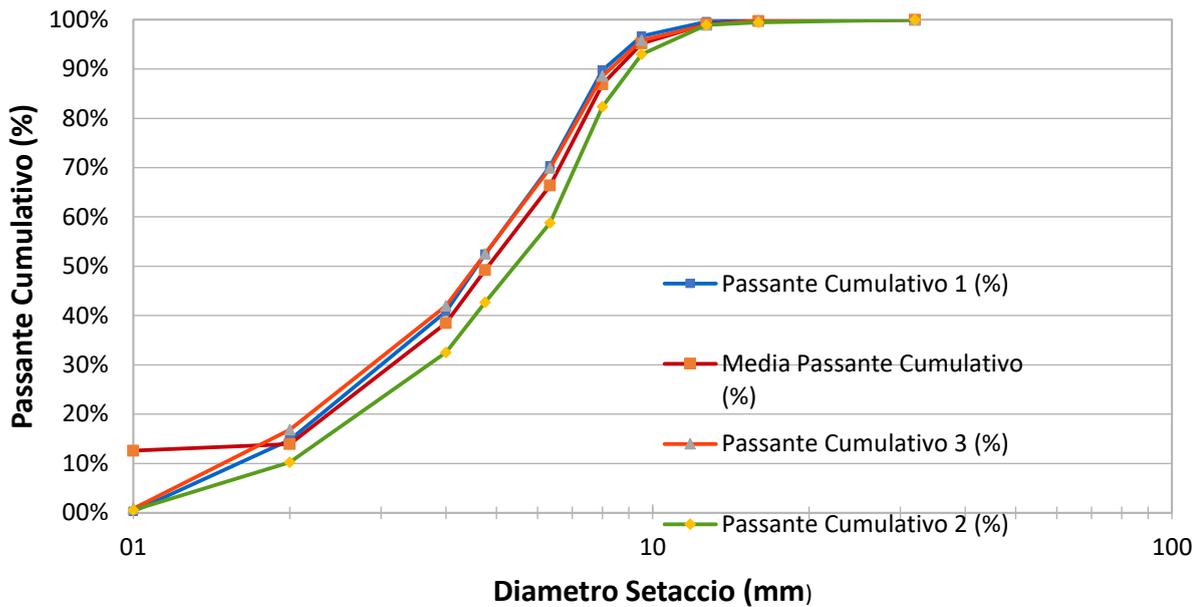


Grafico 2 - Curve granulometriche dei tre campioni e curva media

Le tre curve granulometriche ottenute sono abbastanza omogenee e hanno lo stesso andamento generale; perciò, è possibile considerare la curva media come curva rappresentativa. Il valore del diametro delle maglie del setaccio sull'asse delle ascisse è rappresentato in scala logaritmica per ottenere una rappresentazione più facilmente leggibile per un ampio range dimensionale. Si nota come la macinazione primaria in impianto riduce la dimensione massima dei frammenti di rifiuto a circa 10mm. Per ottenere una granulometria più favorevole al processo di lisciviazione per l'estrazione dell'indio bisogna effettuare un'ulteriore macinatura ed ottenere una nuova dimensione massima pari a 1mm.

3.2 Macinazione del rifiuto

Un possibile pretrattamento per favorire l'estrazione dell'indio tramite lisciviazione è rappresentato dalla macinazione dei frammenti di LCD. Uno studio (Silveira et al. 2015¹⁴) ha ricercato lo strumento di macinazione ottimale per questo pretrattamento tra diversi macchinari: il mulino a martelli, il mulino a biglie e il mulino a lame, ed ha individuato nel mulino a biglie il pretrattamento ideale.

Sebbene in generale la macinazione e la riduzione della dimensione dei frammenti porti benefici al recupero di indio, Rocchetti e Beolchini¹⁵ hanno dimostrato che una macinazione eccessiva può portare ad una perdita di indio.

In questa ricerca si è deciso di effettuare un pretrattamento di macinazione sul materiale arrivato dall'impianto attraverso un mulino a biglie per ottenere frammenti di LCD con dimensione massima di 1mm.

3.2.1 Materiali usati

È stata macinata la frazione di LCD arrivata dall'impianto dopo aver preventivamente rimosso tramite setacciatura la frazione più fine che già rispettava i parametri dimensionali, ovvero quella passante al setaccio con apertura pari a 1mm.

3.2.2 Metodo

Per la macinazione del materiale è stato utilizzato un mulino a biglie. Questo tipo di mulino è composto da due tamburi che sono posti su di due rulli rotanti. Vengono inserite delle biglie di ceramica, che hanno la caratteristica di non inquinare il materiale che verrà in seguito sottoposto ad estrazione, e il materiale stesso da macinare all'interno del tamburo; quando questo inizia a ruotare le biglie verranno sollevate per poi ricadere in basso per gravità, urtando il materiale e frantumandolo per azione meccanica. Il mulino è protetto da una gabbia di sicurezza che fa in modo che il motore che attiva i rulli si spenga quando questa viene aperta.

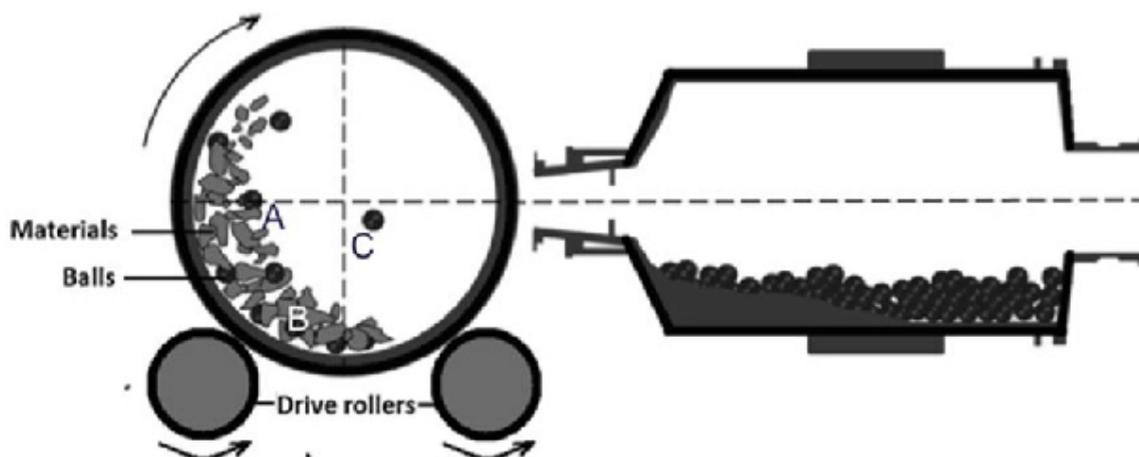


Figura 14 – Schema di un mulino a biglie¹⁵

Per ottimizzare il processo si è scelto di inserire in ogni singolo tamburo una quantità di materiale non eccessiva e di macinarlo per un'ora circa prima di procedere alla setacciatura. Una volta setacciato con un setaccio a maglie di apertura 1mm e dopo aver rimosso la parte fine (<1mm) al materiale già macinato viene aggiunto altro materiale fresco in quantità pari alla parte fine che è stata rimossa. La decisione di stabilire 60 minuti circa come tempo di ogni ciclo di macinatura è stata dettata dall'osservazione che per tempi più lunghi la polvere fine che si forma all'interno del tamburo forma una sorta di pasta che tende ad attutire ulteriori urti e quindi limita l'ulteriore frammentazione del materiale. Al momento della setacciatura si è deciso di rimuovere manualmente i frammenti di metallo e i sottili film polimerici più grossolani; questi, infatti, non riescono ad essere frammentati all'interno del mulino. A livello industriale è possibile ipotizzare una separazione di questi frammenti prima del pretrattamento di macinazione tramite un separatore ad aria per i film polimerici e un separatore magnetico per i metalli. Sarebbe però importante indagare il rapporto costi-benefici di questo ulteriore step e soprattutto la possibilità che il separatore magnetico abbia effetti negativi separando anche materiali contenenti indio.



Figura 15 – Mulino a biglie

3.2.3 Risultati e Osservazioni

Nonostante sia stato ottenuto il materiale fino passante ad 1mm sufficiente per gli scopi di questa ricerca, il procedimento è risultato più lento del previsto. È ipotizzabile che riproducendolo su scala industriale con strumenti più adeguati, quali un sistema di setacciatura più ampio e un mulino più grande, e ottimizzando il processo si possano ottenere risultati e tempistiche migliori.

3.3 Estrazione dell'Indio

A questo punto si procede alla lisciviazione dei metalli sul materiale omogeneo ottenuto con il pretrattamento. Seguendo il procedimento descritto dal brevetto IT201800008207A1^{16,17} messo a punto dal DISVA (Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente) dell'Università Politecnica delle Marche per l'estrazione dell'indio, si è utilizzata una soluzione 2M di acido solforico (H_2SO_4). Questo acido attacca quasi tutti i metalli, tranne l'oro e il platino, e rispetto ad altri tipi di acido risulta meno costoso, più efficace nella lisciviazione e meno impattante a livello ambientale¹⁶.

3.3.1 Metodo

Il metodo usato nelle ricerche precedenti in scala laboratorio è il seguente: si prepara, lavorando sotto una cappa aspirante, il sistema di estrazione dei metalli dalla polvere LCD: agitatore magnetico dotato di piastra riscaldante sul quale vengono posizionati due becher uno dentro l'altro, quello interno contenente 200 ml di acido solforico e l'ancora magnetica dell'agitatore, coperto con un vetrino per evitare l'evaporazione dell'acido e il più esterno contenente acqua e un termometro. Si attende il raggiungimento dei 80 °C, e, per equilibrio, questa sarà anche la temperatura dell'acido. Una volta raggiunta questa temperatura, si inserisce nell'acido la polvere LCD in quantità pari al 20% in volume di acido. Si copre il becher contenente acido e LCD e si lascia in agitazione il materiale nell'acido per 10 minuti, facendo attenzione al mantenimento della temperatura. Trascorso il tempo necessario all'estrazione dell'Indio si toglie il becher dalla piastra riscaldante, si estrae l'ancora magnetica e si filtra la miscela con carta filtro. In questo modo si ottiene l'acido solforico, passante alla carta filtro, che può essere riutilizzato; questo mantiene la sua efficienza oltre il 95% utilizzandolo per 3 lisciviazioni. Ogni volta che si ripete il processo l'acido deve essere rabboccato di una quantità pari al 20% circa. L'acido solforico usato può essere, poi, sottoposto a processi di precipitazione dei metalli per la separazione dell'indio dagli altri metalli lisciviati⁷; Un ulteriore successivo processo di precipitazione per cementificazione avviene grazie all'uso di zinco (Zn) ad un pH di 2,5 ottenuto grazie all'aggiunta idrossido di sodio (NaOH). In questa ricerca tutto questo processo è stato ripetuto in scala maggiore, con più materiale e in un contenitore da 5 litri; inoltre, la temperatura è stata abbassata da 80 °C a 75 °C.

3.3.2 Risultati e osservazioni

Le concentrazioni dei metalli estratti tramite lisciviazione sono indicate nel Grafico 3. La concentrazione di indio è risultata pari a 18 mg/kg, mentre quelle degli altri metalli, ovvero ferro, rame e alluminio, si attesta tra i 13 e i 15 g/kg.

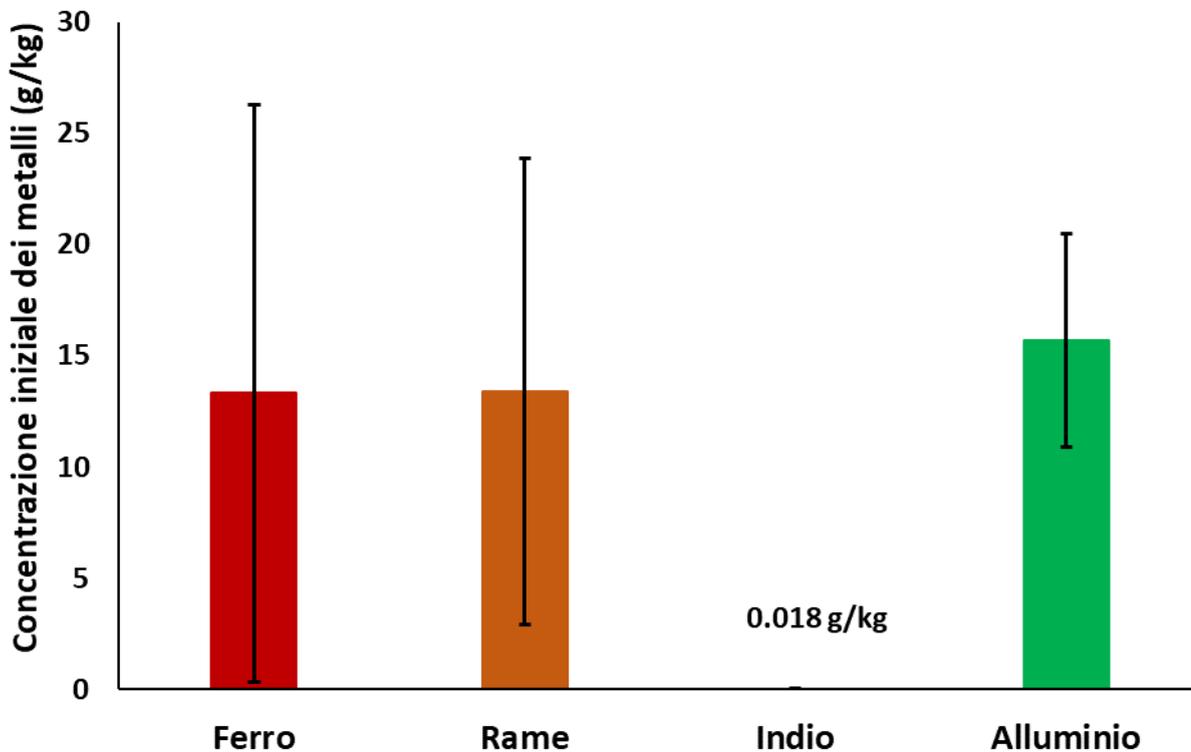


Grafico 3 – Concentrazioni medie dei metalli nei rifiuti utilizzati per la lisciviazione (frazione <1mm)

Inoltre, sono state confermate le percentuali di estrazioni descritte dal brevetto, nonostante la differente scala del processo. L'indio risulta quasi completamente estratto in seguito alle tre fasi di lisciviazione, mentre le estrazioni degli altri metalli hanno efficienze minori. Questo risultato è ottimale perché l'obiettivo del processo è proprio l'estrazione dell'indio.

I risultati confermano l'alta efficienza nel recupero dell'indio già precedentemente riscontrata su scala di laboratorio. Tuttavia, i risultati confermano anche la necessità di ottenere una concentrazione più alta di indio nel materiale sottoposto a lisciviazione; è possibile aumentare la concentrazione in due modi:

- 1- Svolgere la lisciviazione solo sulla frazione di LCD che dalle analisi è risultata più ricca di indio; questa frazione è quella passante ad 1mm che è stata setacciata direttamente dal materiale arrivato dall'impianto, quindi primi della macinazione con il mulino a biglie.
- 2- Un lavaggio con acqua satura di cloruro di sodio (NaCl) del rifiuto frammentato (<1mm) per ottenere una separazione per densità della frazione plastica e di alluminio.

La prima soluzione però, pur permettendo il trattamento di una frazione con una più alta concentrazione di indio, trascurerebbe più dell'80% del flusso di rifiuti, ovvero la frazione più grossolana. In quest'ottica la seconda opzione sarebbe la migliore, migliorando anche la purezza dell'indio estratto con la rimozione a monte del processo dell'alluminio. Tuttavia, anche questa seconda soluzione presenterebbe delle problematiche, come la presenza di composti organici derivanti dai cristalli liquidi nell'acqua di scarto.

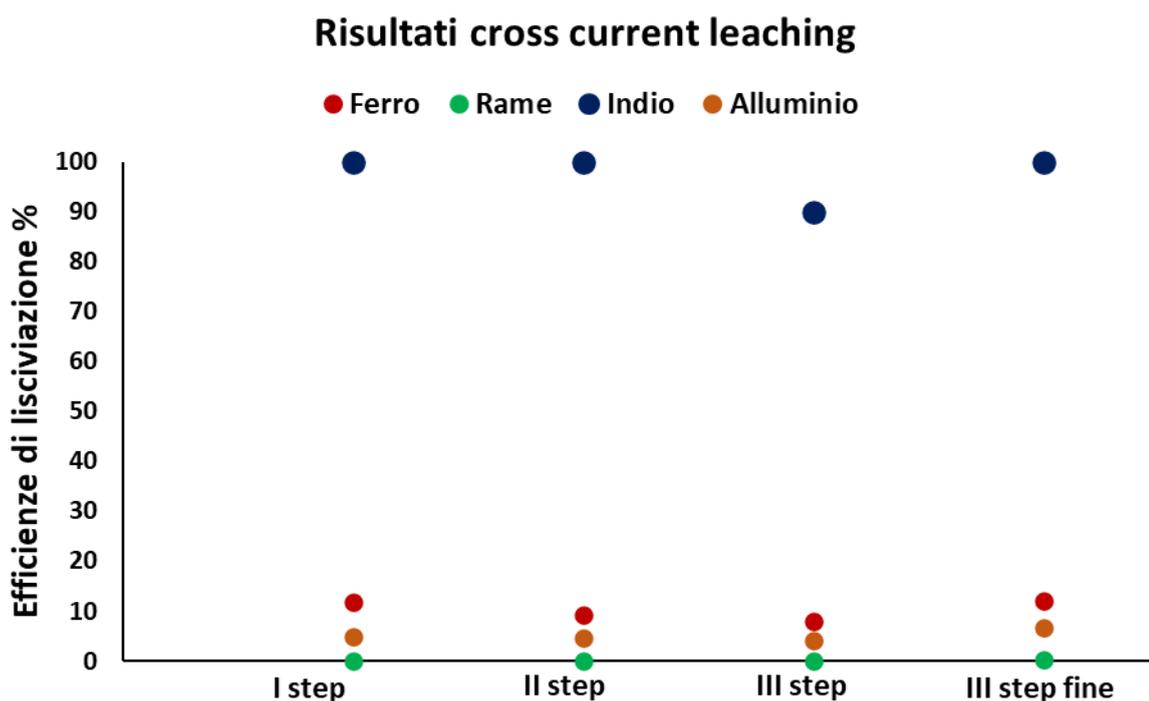


Grafico 4 – Efficienza nell'estrazione dei metalli tramite lisciviazione

3.3.3 Lavaggio dei frammenti

Successivamente alla lisciviazione bisogna lavare i frammenti di LCD il prima possibile per rimuovere l'acido solforico ed evitare che questo possa innescare reazioni chimiche con il materiale; in questo caso il lavaggio è avvenuto 24 ore dopo la lisciviazione. Si è proceduto ad un primo lavaggio di 30 minuti con un rapporto materiale/acqua pari a 2 kg/L per poi verificarne, 24 ore dopo, l'efficacia attraverso un'analisi di solfati e cloruri presenti nel materiale lavato. Ciò è stato fatto perché lo scopo della ricerca è trovare un processo che sia efficace sia per quanto riguarda l'estrazione dell'indio e il successivo riciclo della

frazione restante che per quanto riguarda il consumo di acqua, di energia e la produzione di ulteriori flussi di rifiuti da smaltire, andando dunque a rendere il processo meno impattante per l'ambiente e anche meno costoso. Ridurre la fase di lavaggio ad un solo step quindi, riuscendo a portare i livelli di solfati e cloruri al di sotto dei limiti, sarebbe vantaggioso in termini di risparmio di acqua ed energia. Come si vedrà nella parte successiva (3.4 analisi solfati e cloruri) un solo lavaggio non è risultato sufficiente, così è stato necessario svolgerne un secondo di 2 ore con rapporto materiale/acqua di 1kg/2L.

3.4 Analisi di solfati e cloruri

Per poter utilizzare i frammenti di LCD nella miscela della malta, una volta subito il processo di lisciviazione dell'indio, è fondamentale constatare la concentrazione in percentuale dello ione cloruro e dello ione solfato presente nel materiale. Questo al fine di stabilire il numero necessario di lavaggi che il materiale dovrà subire per poter rientrare all'interno dei limiti imposti da normativa. Di particolare interesse sarà il controllo della concentrazione di ioni solfato, poiché l'utilizzo dell'acido solforico nel trattamento di lisciviazione garantisce la loro presenza.

Questi limiti risultano stringenti perché la presenza di ioni cloruro all'interno del calcestruzzo accelera la reazione di ossidazione dell'acciaio di armatura provocandone una corrosione localizzata che determina la riduzione della sezione dell'armatura. In particolare, ciò può avvenire quando la quantità di cloruro all'interno del calcestruzzo supera i limiti prescritti dalla UNI EN 8520-2:2016, redatta a completamento della UNI EN 12620-2:2008. Rispetto al peso di cemento, quindi, il valore della concentrazione degli ioni cloruro deve essere più basso di tale limite.

A differenza degli ioni cloruro, gli ioni solfato sono già presenti nel cemento, entro determinati limiti, in quanto agiscono da regolatori di presa. Superati questi limiti si causa il degrado dell'elemento strutturale determinato da reazioni chimico-fisiche che provocano al suo interno fenomeni espansivi causati dalla comparsa di minerali che aumentano il loro volume durante la loro formazione. L'attacco solfatico rappresenta uno di questi fenomeni; esso si verifica quando lo ione solfato, trasportato dall'acqua, penetra all'interno del calcestruzzo e reagisce con alcuni componenti della matrice cementizia. Questa reazione crea l'ettringite, un minerale che accrescendo il suo volume causa lo sgretolamento dell'elemento strutturale.

I limiti prescritti dalla normativa citata 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%

Nell'effettuare la verifica sono stati considerati come limiti quelli qui sopra indicati che non si riferiscono all'utilizzo del materiale come additivo bensì come aggregato.

3.4.1 Metodo

La prova che abbiamo svolto per la determinazione della percentuale dello ione cloruro e ione solfato è normata dalla UNI EN 932-2:2000.

Prima della prova si è svolto un pretrattamento sul materiale per renderlo idoneo all'analisi. In un caso inserendolo inizialmente in stufa a temperatura 100 +/- 5 °C fino a massa costante, ovvero fino ad ottenere da due pesate successive due valori che differiscono meno dello 0.1%, mentre una seconda prova è stata eseguita su del materiale lasciato essiccare per una settimana all'aria. Il rapporto tra LCD e acqua utilizzato è 1kg/2L per i solfati e 1kg/1L per i cloruri. Sono stati preparati tre provini: uno per l'analisi dei solfati, uno per l'analisi dei cloruri e un terzo con sola acqua distillata come riferimento.

PROVA N.1	Cloruri e solfati		
	Provino 1 Cl ⁻	Provino 2 SO ₄ ²⁻	Provino 3 H ₂ O distillata
Tara (g)	12,43 g	12,25 g	12,20 g
LCD (g)	20,22 g	20,04 g	/
Acqua distillata (ml)	20,26 ml	40,05 ml	/
Tempo di rotazione	ruota 1h	ruota 24h	/
Velocità di rotazione	5 giri/minuto	5 giri/minuto	/

Tabella 4 – Quantità e proporzioni dei materiali utilizzati per la preparazione dei provini con LCD essiccato in stufa

PROVA N.2	Cloruri e solfati		
	PROVINO 1 Cl ⁻	PROVINO 2 SO ₄ ²⁻	PROVINO 3 H ₂ O distillata
Tara (g)	12,33 g	12,71 g	14,83 g
LCD (g)	20,04 g	20,06 g	/
Acqua distillata	20,29 ml	40,24 ml	/
Tempo di rotazione	ruota 1h	ruota 24h	/
velocità di rotazione	5 giri/minuto	5 giri/minuto	/

Tabella 5 - Quantità e proporzioni dei materiali utilizzati per la preparazione dei provini con LCD essiccato all'aria

3.4.2 Risultati e osservazioni

Risultati prova 1

	Concentrazione solfati (mg/l)	Concentrazione solfati (g/l)	Concentrazione solfati (%)	Limiti Normativa
Provino Cloruri				<0,03 %
Provino Solfati	3850	3,85	0,75%	< 0,2 %

Tabella 6 – Risultati dei provini con LCD essiccato in stufa

Risultati prova 2

	Provino 1 cloruri	Provino 2 solfati	Provino 3 acqua distillata
Concentrazione cloruri (g/l)	0,041	0,06279	0,0000303
Concentrazione solfati (g/l)	2,057	0,8818	assente
Concentrazione cloruri (%)	0,0041%	0,01%	
Concentrazione solfati (%)	0,21%	0,18%	
Limite normativa solfati (%)	<0,2%		
Limite normativa cloruri (%)	<0,03%		

Tabella 7 – Risultati dei provini con LCD essiccato all'aria

Questi risultati mostrano che il valore limite per la concentrazione di solfati viene superato, ma non di molto. Sono dunque stati preparati altri provini con del materiale che questa volta è stato sottoposto a due lavaggi.

PROVA N.3	Cloruri e solfati		
	Provino 1 Cl ⁻	Provino 2 SO ₄ ²⁻	Provino 3 H ₂ O DISTILLATA
Tara (g)	11,88	12,01	11,98
LCD (g)	20,07	20,07	/
Acqua distillata (ml)	20,09	40,11	/
Tempo di rotazione	1h	24h	/
Velocità di rotazione	5 giri/minuto	5 giri/minuto	/

Tabella 8 - Quantità e proporzioni dei materiali utilizzati per la preparazione dei provini con LCD sottoposto a doppio lavaggio

Risultati prova 3

	Provino 1 cloruri	Provino 2 solfati	Provino 3 acqua distillata
Concentrazione cloruri (mg/l)	7,71	16,68	0,0000303
Concentrazione solfati (mg/l)	4,53	9,14	assente
Concentrazione cloruri (g/l)	0,00771	0,01668	
Concentrazione solfati (g/l)	0,00453	0,00914	
Concentrazione cloruri (%)	0,00077%	0,0033%	
Concentrazione solfati (%)	0,00045%	0,0018%	
Limite normativa solfati	<0,2%		
Limite normativa cloruri	<0,03%		

Tabella 9 – Risultati dei provini con LCD sottoposto a doppio lavaggio

Risulta evidente che con il secondo lavaggio si ottengono livelli di concentrazione di solfati decisamente inferiori ai limiti. Visto che già con un solo lavaggio i valori di concentrazione dei solfati superavano solo lievemente i limiti, è possibile affermare che sarebbe conveniente indagare una possibile modifica dei parametri del primo lavaggio in modo da rendere più efficace il processo e far sì che i livelli di solfati siano inferiori ai limiti già da subito senza dover ricorrere ad un ulteriore lavaggio. Questo, infatti, permetterebbe di ottimizzare il processo in termini di costi e impatto ambientale (risparmio di energia e riduzione della produzione di acque reflue da smaltire).

3.5 Mix design

Il mix design, o progetto di miscela, è il calcolo che si va ad effettuare per determinare la composizione della miscela, le caratteristiche delle materie prime utilizzate e l'eventuale aggiunta di additivi avendo prefissato le prestazioni finali richieste al calcestruzzo o alla malta cementizia.

In questo caso con mix design intenderemo la tabella con i dosaggi delle varie componenti che andranno a comporre le diverse miscele utili per realizzare i getti preliminari dei provini sui quali andremo a svolgere le nostre analisi.

I materiali utilizzati per la realizzazione del mix design sono i seguenti:

- LCD fine ($<0,075$ mm)
- LCD tal quale ($0,075$ mm – 1 mm)
- Cemento CEM II/A-LL 42,5 R tecnocem - $3,077$ g/cm³
- Sabbia silicea del Po 0-2mm – densità: $1,460$ kg/cm²
- Superfluidificante MAPEI dynamon SP1
- Aerante MAPEI mapeir AE2
- Acqua – densità: 1 g/cm³

3.5.1 Caratterizzazione LCD trattato



Figura 17 – LCD (<1 mm) umido dopo lisciviazione e lavaggi

È stata eseguita una caratterizzazione fisica dei frammenti LCD (<1mm) sottoposti a lisciviazione e successivamente a due lavaggi.

Per prima cosa si è lasciato seccare il materiale e si è calcolato, per differenza di peso, il contenuto d'acqua dei frammenti LCD umidi appena dopo il lavaggio. Sono stati usati due metodi di essiccazione: uno all'aria e l'altro in stufa a 105 °C.

	PROVINO 1 ESSICCAZIONE IN STUFA	PROVINO 2 ESSICCAZIONE ALL'ARIA
Tara (g)	1600,3	1601,9 g
Lordo Umido (g)	2150,8	1759,4 g
Lordo Secco (g)	1966,7	1706,7 g
Netto Umido (g)	550,5	157,5 g
Netto Secco (g)	366,4	104,8 g
Temperatura (°C)	105	25°C
Tempo	24 ore	7 giorni
Contenuto d'acqua (%)	$(550,5 - 366,4 / 366,4) * 100 = 50,24 \%$	$(157,5 - 104,8 / 104,8) * 100 = 50,286 \%$

Tabella 10 – Calcolo del contenuto d'acqua nei campioni umidi di LCD in seguito a lisciviazione e lavaggio

In seguito, si è eseguita una caratterizzazione granulometrica del campione essiccato all'aria utilizzando 9 setacci ASTM disposti in serie: il setaccio superiore con maglie di apertura pari a 1,68 mm, l'ultimo con maglie di apertura 0,075 mm, più un fondo per raccogliere la frazione più fine.



Figura 18 – Setacci in serie usati per determinare la curva granulometrica del LCD trattato secco

Dal lotto di materiale sono state ricavate tre parti omogenee utilizzate per realizzare tre curve granulometriche. Ogni parte è stata versata dall'alto nella batteria di setacci; dopo aver scosso manualmente la batteria di setacci per favorire il passaggio dei granuli ogni setaccio è stato pesato singolarmente con il suo trattenuto. Dopo la pulizia dei setacci l'operazione è stata ripetuta per le altre due parti. Per costruire le curve cumulative si è passati dalla percentuale di trattenuto cumulativo alla percentuale di passante cumulativo.

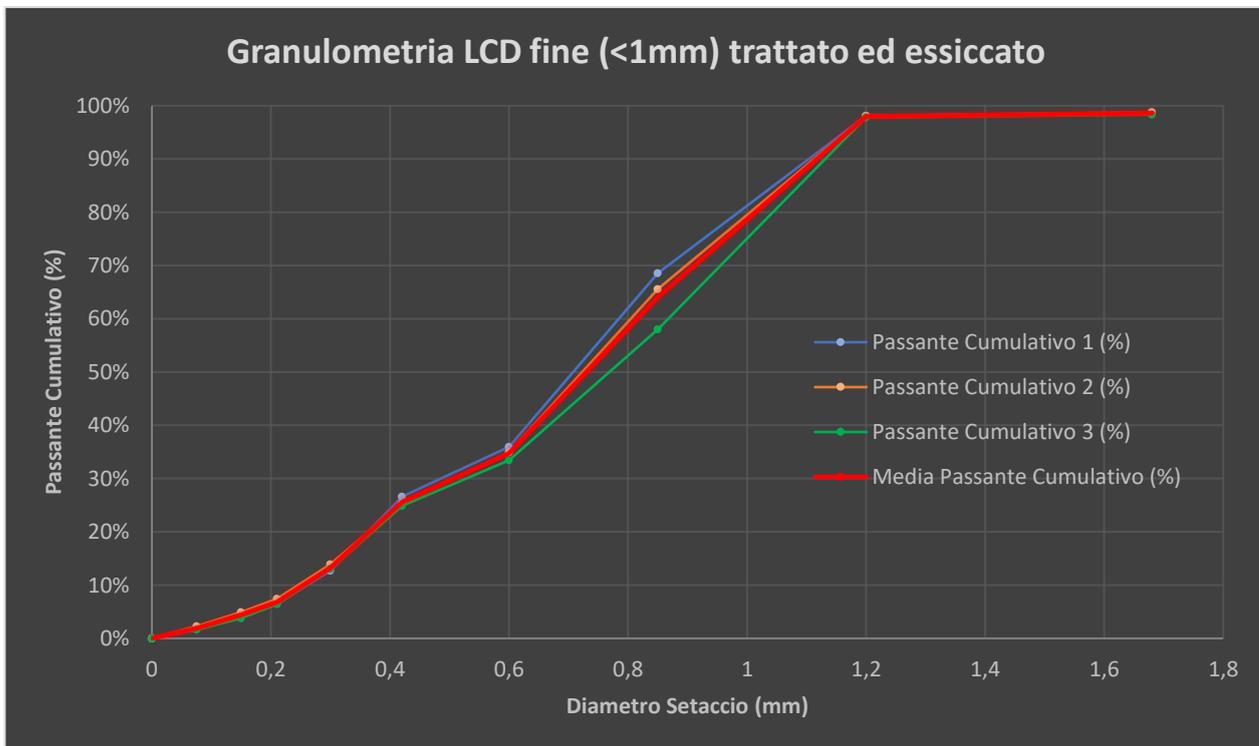


Grafico 5 – Curva Granulometrica LCD (<1mm) lisciviato, lavato ed essiccato all'aria

Vista l'omogeneità delle curve granulometriche rappresentanti le tre frazioni viene presa in considerazione la curva media come curva rappresentativa per il materiale.

Per avere una rappresentazione più compatta è possibile rappresentare l'apertura delle maglie dei setacci sull'asse delle ascisse in scala logaritmica.

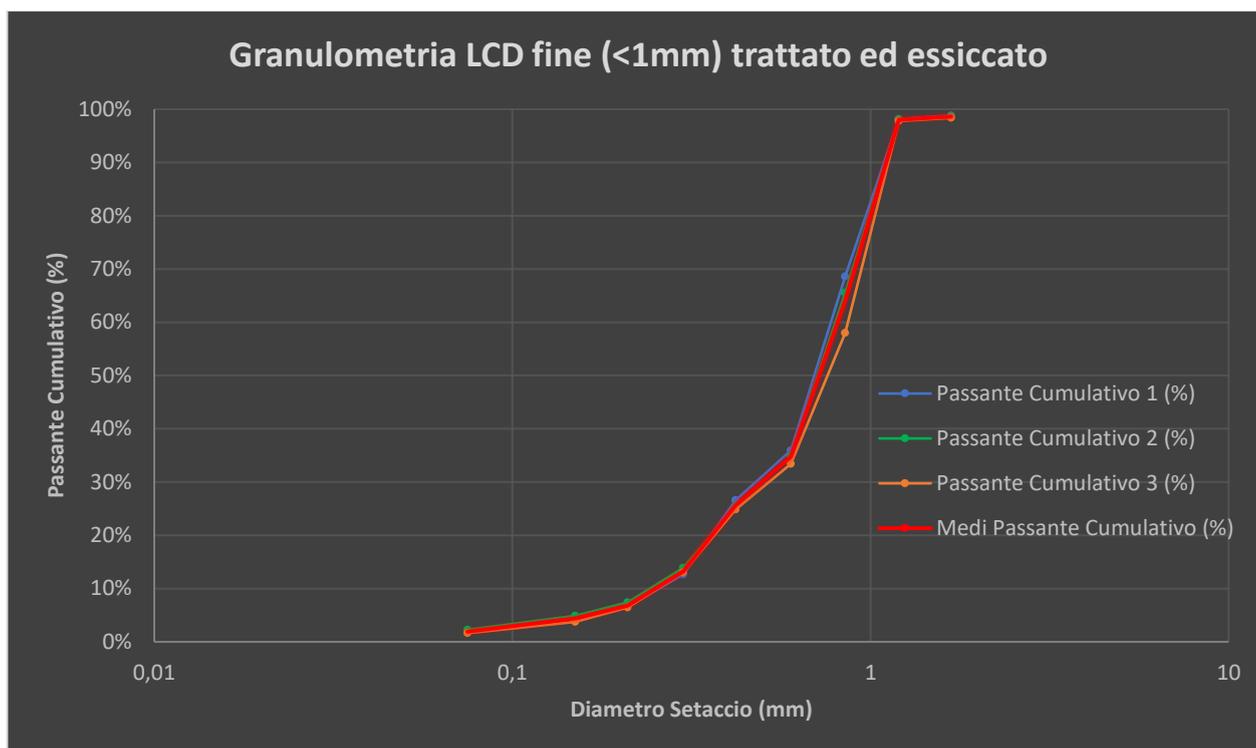


Grafico 6 - Curva Granulometrica LCD (<1 mm) lisciviato, lavato ed essiccato con asse delle ascisse in scala logaritmica

3.5.2 Caratterizzazione della sabbia silicea del Po

Vista l'idea iniziale di utilizzare la sabbia del Po, nel ruolo di aggregato fine, nel suo stato umido per poi aggiustare la quantità d'acqua del mix design, si è svolto su un campione della stessa il calcolo del contenuto d'acqua con la metodologia dell'essiccazione in stufa a 105 °C. La prova è stata effettuata su tre diversi campioni di sabbia per poi andare a considerare la media dei risultati.

	CAMPIONE 1	CAMPIONE 2	CAMPIONE 3
tara (g)	22,19	22,12	12,48
sabbia umida netta (g)	40,87	40,17	40,84
sabbia umida lorda (g)	63,06	62,29	53,32
sabbia secca lorda (g)	60,54	59,44	50,52
sabbia secca netta (g)	38,35	37,32	38,04
Contenuto d'acqua (%)	6,17%	7,09%	6,86%
Media contenuto d'acqua (%)	6,71%		

Tabella 11 - Calcolo del contenuto d'acqua nella sabbia silicea umida

Successivamente, con la stessa batteria di setacci ASTM utilizzati per studiare la granulometria del LCD, si sono selezionate dal campione di sabbia essiccata tre parti omogenee e si sono costruite le tre curve granulometriche.

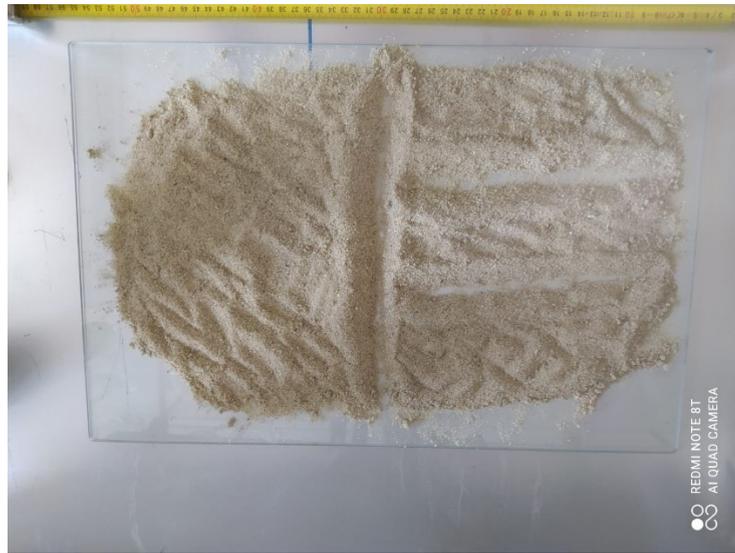


Figura 19 – Individuazione nel campione di sabbia silicea del Po di tre parti omogenee

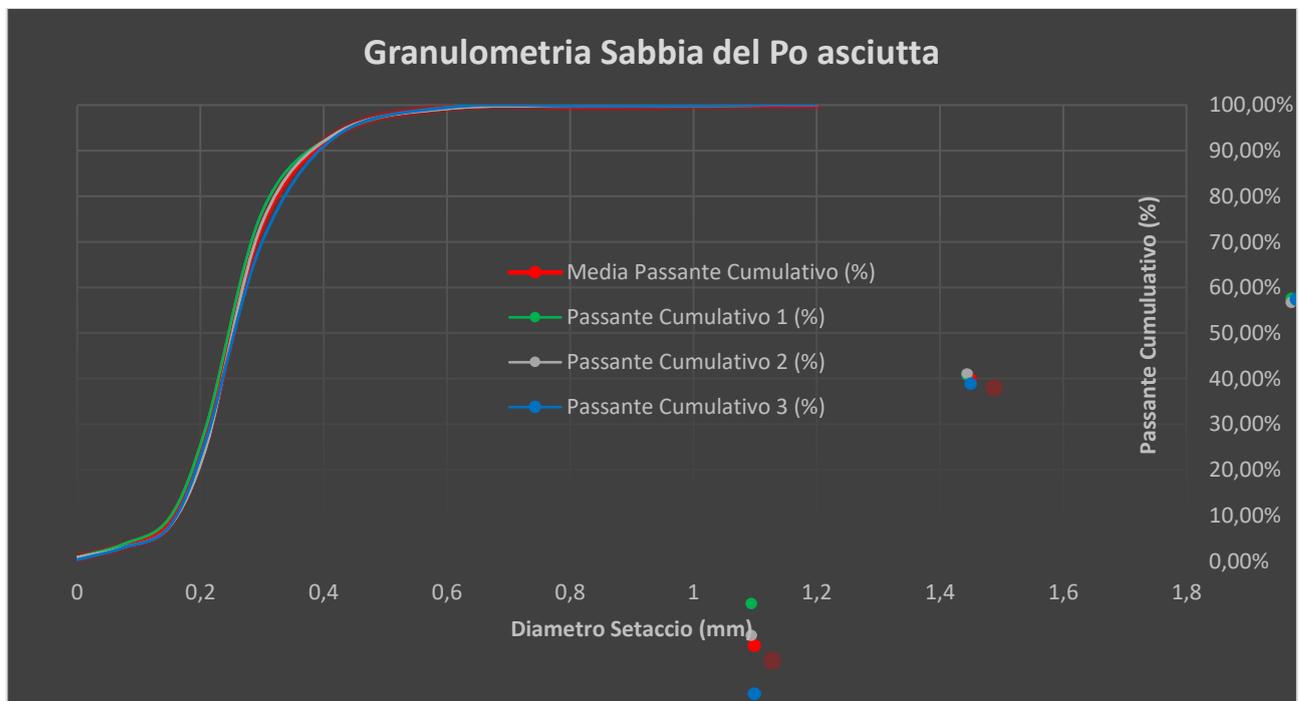


Grafico 7 – Curva granulometrica della sabbia silicea del Po secca

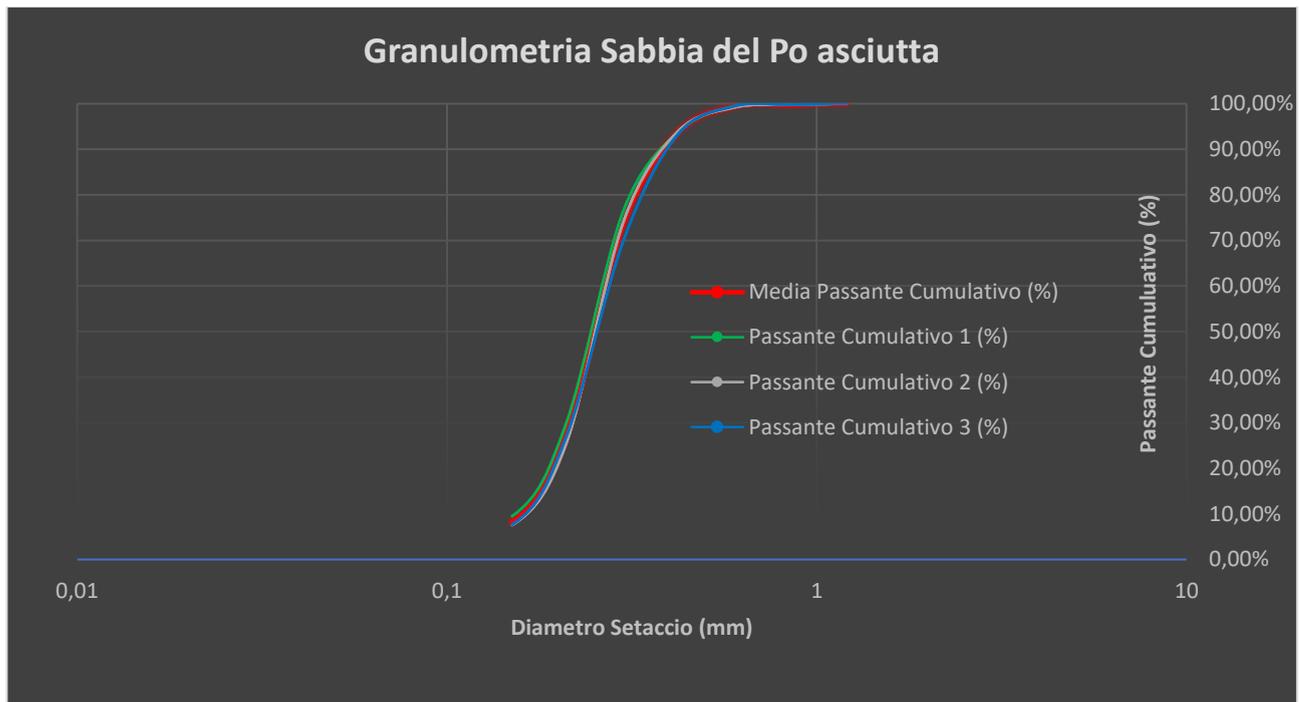


Grafico 8 - Curva granulometrica della sabbia silicea del Po secca con asse delle ascisse in scala logaritmica



Immagine – Confronto tra la curva granulometrica della sabbia (a sinistra) e quella del LCD trattato (a destra), entrambi asciutti

Dal confronto tra le curve granulometriche di sabbia e LCD trattato si può notare che la distribuzione dimensionale dei granuli di sabbia è più omogenea; inoltre, la sabbia è composta prevalentemente da particelle di dimensioni minori di 0,4 mm mentre le particelle che compongono la frazione di LCD sono quasi equamente distribuite per tutte le dimensioni intermedie tra 0 e 1 mm, rendendola una frazione dimensionalmente varia

3.5.3 Mix design delle malte

Per dimensioni dei grani minori si ha una superficie specifica maggiore; perciò, risulta evidente come la frazione più fina, ovvero inferiore ai 75 μm , abbia teoricamente maggiore efficacia come additivo aerante. È dunque utile andare a studiare il risultato sia nel caso di aggiunta della sola parte fine (<0,075 mm) che in quello dell'aggiunta della frazione di LCD tal quale, poiché in caso di risultati non eccessivamente dissimili nelle varie prove effettuate sui due diversi provini sarà possibile utilizzare come additivo aerante la polvere di LCD tal quale senza ulteriore setacciatura. Questo, oltre ad un risparmio di energia nel ciclo impiantistico dovuto alla rimozione di un ulteriore step di setacciatura dal processo, risolve anche il problema del riutilizzo della parte più grossolana (> 0,075 mm) che invece di essere utilizzata come aggregato fine può essere anch'essa maggiormente valorizzata come additivo aerante.

Seguendo questo ragionamento e considerando esperienze di ricerca precedenti⁷ che dimostrano che sostituzioni in percentuali molto elevate di LCD non portano a risultati significativamente migliori ed ulteriori benefici rispetto a sostituzioni con percentuali minori, sono stati elaborati i mix design riportati in tabella.

Per quanto riguarda il volume dei getti sono state presi in considerazione sia il numero di provini da realizzare necessari per l'esecuzione delle varie prove (prove di resistenza meccanica, prova di assorbimento dell'acqua per capillarità, porosimetria e reazione alcali-aggregato) che la quantità effettiva disponibile di LCD fine. Per questo secondo motivo si è deciso per i mix design che prevedono l'aggiunta di LCD fine di limitarsi a due soli dosaggi di 2% e 4% rispetto ai tre inizialmente previsti (2%-4%-6%) mentre sono stati lasciati i tre dosaggi per l'aggiunta della frazione LCD tal quale; inoltre, sempre per le gettate con i dosaggi di LCD fine sono stati ridotti a due i provini destinati alle prove meccaniche, rispetto ai tre delle altre miscele. Sono stati progettati anche due provini di riferimento: il primo composto da una semplice miscela di cemento, aggregato fine e additivo superfluidificante, il secondo con la stessa composizione ma con l'aggiunta di additivo aerante.

Saranno realizzati dei provini rettangolari con dimensioni 4x4x16 cm e con volume pari a 256 cm³.

	N. Provini per Prove Meccaniche	N. Provini per Capillarità/Alcali Aggregato
RIF	3	2
RIF AE	3	2
LCD2 (<0,075mm)	2	2
LCD4 (<0,075mm)	2	2
LCD 2	3	2
LCD 4	3	2
LCD 6	3	2

N. PROVINI 4x4x16	37
-------------------	----

Tabella 12 – Numero di provini da realizzare per ogni miscela

	N. Provini 4x4x16	Volume totale per getto (L)
RIF	5	1,656
RIF AE	5	1,656
LCD2 (<0,075mm)	4	1,3488
LCD4 (<0,075mm)	4	1,3488
LCD 2	5	1,656
LCD 4	5	1,656
LCD 6	5	1,656

Tabella 13 – Calcolo del volume delle gettate riferite ad ogni tipo di miscela

Nella realizzazione del mix design sono state considerati per precauzione volumi leggermente maggiori per le gettate.

Come aggregato fine nella gettata iniziale di prova è stata utilizzata la sabbia silicea del Po (0-2 mm) umida. Per poter utilizzare la sabbia umida senza essicarla è stata calcolata l'umidità della sabbia (vedi 3.5.2), che è risultata pari al 6,71%. Conoscendo il contenuto d'acqua della sabbia umida è possibile utilizzarla senza essicarla andando a correggere il mix design tenendo conto dell'acqua già presente nell'aggregato. Successivamente, a causa di problemi nella prima gettata di prova, in quella definitiva è stata utilizzata la sabbia asciutta

Nella preparazione delle miscele sono stati rispettati i seguenti rapporti:

- Rapporto acqua su cemento $a/c=0,6$
- Rapporto inerte su cemento $i/c=3$
- Quantità superfluidificante: da 0.6 L a 1.2 L ogni 100 kg di cemento, in questo caso 0,66 L/100 kg nella gettata di prova e 0,86 L/100 kg nella gettata definitiva
- Quantità aerante: da 15 g a 100 g ogni 100 kg di cemento

3.5.4 Gettata dei provini

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, UNI 7044:1972)
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 per riconoscere successivamente il 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

Come primo tentativo è stata realizzata una miscela per il provino di riferimento con un rapporto a/c minore, pari a 0,55. Questa prima prova è stata effettuata seguendo il ragionamento secondo il quale un cemento meno resistente come il CEM 42,5 R necessita di meno acqua per idratarsi rispetto ad un cemento con resistenza più elevata come il 52,5 R. Durante la realizzazione della miscela è risultata però subito evidente ad occhio l'eccessiva viscosità della stessa; perciò, non si è proceduto con la prova di lavorabilità. Successivamente è stato usato il mix design con rapporto a/c=0,6 inizialmente teorizzato e con le correzioni previste per l'utilizzo della sabbia umida.

	ACQUA	CEMENTO	LCD <75 mm	LCD t.q	AGGREGATO	SUPERFLUIDIFICANTE	AEA
	g	g	g	g	g	g	g
RIF	286,32	745,20	0,00	0,00	2396,40	4,92	0,00
RIF AEA	286,32	745,20	0,00	0,00	2396,40	4,92	0,75
LCD 2 F	233,21	606,96	12,14	0,00	1951,85	4,01	0,00
LCD 4 F	233,21	606,96	24,28	0,00	1951,85	4,01	0,00
LCD 2 TQ	286,32	745,20	0,00	14,90	2396,40	4,92	0,00
LCD 4 TQ	286,32	745,20	0,00	29,81	2396,40	4,92	0,00
LCD 6 TQ	286,32	745,20	0,00	44,71	2396,40	4,92	0,00

Tabella 15 – Mix Design (a/c=0,6) di prova con sabbia umida e additivo superfluidificante 0,66 L/100 kg cemento

In questa prima giornata sono stati realizzati inizialmente i getti relativi a queste miscele: riferimento (a/c: 0,6), 6% t.q. (a/c: 0,6). Visti i risultati negativi della prova di lavorabilità (vedi capitolo 4), con un diametro di spandimento del cono nello slump test inferiore ai 12 centimetri indice di una lavorabilità molto bassa, si è provato ad effettuare una nuova miscela di riferimento con un rapporto acqua/cemento incrementato a 0,65. Non ci sono stati però cambiamenti significativi nella lavorabilità. Sono state individuate diversi aspetti come possibili responsabili della rapida perdita di lavorabilità: la temperatura ambientale particolarmente elevata (molto superiore ai 30° celsius), una possibile imprecisione nel calcolo dell'umidità della sabbia o una eccessiva variabilità del contenuto d'acqua della sabbia stessa. Per questo motivo si è deciso di ripetere l'operazione di getto in un'altra giornata lasciando però prima essiccare la sabbia all'aria (per spandimento) in modo da avere un maggiore controllo della quantità d'acqua aggiunta alla miscela.

Si è inoltre deciso di aumentare il dosaggio di additivo superfluidificante per ottenere una lavorabilità maggiore. La quantità di superfluidificante aggiunta può essere compresa tra 0,6 e 1,2 litri ogni 100 kg di cemento: si è deciso di aumentarla dai 0,66 litri ogni 100 kg di cemento, ovvero la quantità usata nei mix design precedenti, a 0,86 litri ogni 100 kg di cemento. Inoltre, si è scelto di non effettuare la gettata relativa alla miscela LCD 6% t.q. non potendola confrontare con la corrispettiva percentuale di solo LCD fine.

	ACQUA	CEMENTO	LCD <75 mm	LCD t.q	AGGREGATO	SUPERFLUIDIFICANTE	AEA
	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 F	364,18	606,96	12,14	0,00	1951,85	5,51	0,00
LCD 4 F	364,18	606,96	24,28	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 TQ	447,12	745,20	0,00	29,81	2396,40	6,42	0,00

Tabella 16 – Mix Design (a/c=0,6) getto definitivo con sabbia asciutta e additivo superfluidificante 0,86 L/100 kg cemento

Il procedimento seguito per la preparazione della miscela e il confezionamento dei provini è analogo a quello già descritto in occasione del getto precedente.



Figura 20 – Miscelazione con miscelatore elettrico della miscela RIF



Figura 22 – Miscelazione con miscelatore elettrico della miscela RIF AEA



Figura 23 – Miscelazione LCD 4% fine con cemento

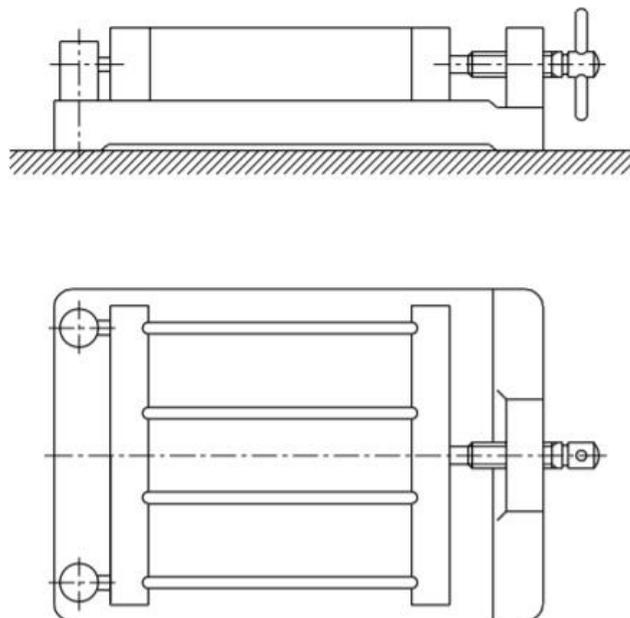


Figura 24 - stampo a incastro per la formatura di campioni- da Normativa UNI EN 1015-11:2007

3.5.5 Prova di lavorabilità

In questo caso la lavorabilità è stata valutata tramite la prova di spandimento descritta dalla UNI EN 1015-3:2007. Si riempie con la malta fresca in modo più omogeneo possibile un tronco di cono di metallo di 10 cm di diametro posizionato su una tavola, detta tavola a scosse, si toglie il tronco di cono perpendicolarmente e si sottopone la tavola a 15 colpi. A causa di questi colpi il tronco di malta fresca si allarga a causa del fenomeno dello spandimento dinamico, al termine del quale si procede alla misura del diametro finale.

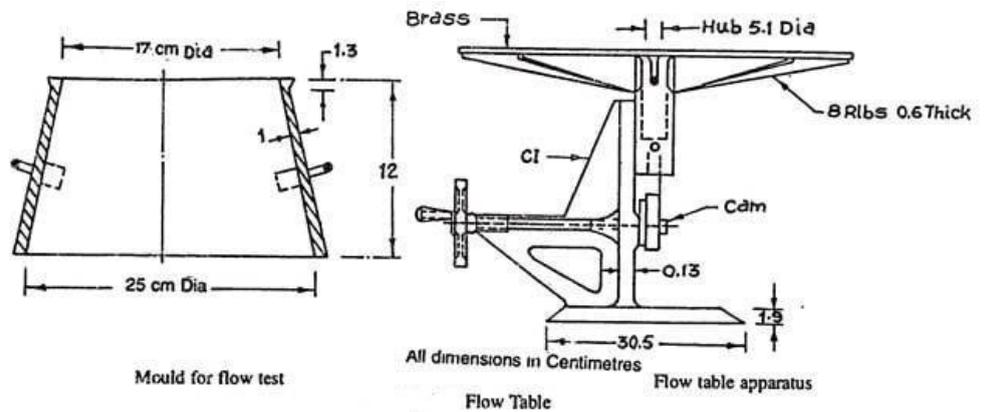


Figura 25 – Apparecchiatura utilizzata per la prova di lavorabilità (a sinistra) e schema della tavola a scosse¹⁹ (a destra)

3.5.6 Misura della densità

Sono state calcolate sia la densità allo stato fresco della malta sia quella allo stato indurito.

Nel primo caso è stato riempito con la malta fresca un contenitore di volume noto e tara noti; dopo aver effettuato la pesatura del contenitore pieno di malta è possibile calcolare la densità come:

$$d = \frac{m}{V} \text{ [kgm}^3\text{]}$$

Dove m è la massa netta della malta all'interno del contenitore e V è il volume da essa occupato.



Figura 26 – Pesatura della malta fresca per calcolarne la densità

Per calcolare la densità allo stato indurito ci si è avvalsi dello stesso principio, pesando direttamente il provino indurito dopo 28 giorni di maturazione in cella e conoscendone il volume.

3.5.7 Calcolo delle resistenze meccaniche

La resistenza meccanica è il massimo sforzo che un materiale, in forma di una porzione geometricamente determinata, detta provino, è in grado di sopportare prima della rottura. A seconda che lo sforzo, σ , applicato sia a compressione o a flessione, si parlerà di resistenza meccanica a compressione, R_c , o a flessione, R_f . Il calcestruzzo è un materiale che si comporta abbastanza bene sotto l'azione di uno sforzo a compressione e mediocrementemente sotto quella di uno sforzo per flessione²⁰.

Le prove di resistenza meccanica sono state eseguite con una pressa idraulica dotata di una piastra di carico e collegata ad un terminale che registra i dati relativi alla prova. Le prove sono state eseguite in accordo alla Normativa secondo la UNI EN 1015-11:2007 su provini prismatici di dimensioni $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ dopo 28 giorni di maturazione.

La prima prova svolta è quella della resistenza meccanica a flessione. Inizialmente si posiziona il provino nella macchina di prova (figura 29) facendo attenzione a posizionare 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. Una volta posizionato il provino si attiva la pressa idraulica che applica il carico fino alla rottura. Sono stati sottoposti a questa prova tre provini per ogni tipo di miscela,

tranne per quelle in cui è presente LCD fine; in questo secondo caso sono stati rotti a flessione due soli provini.



Figura 27 – Provini da sottoporre alla prova di flessione

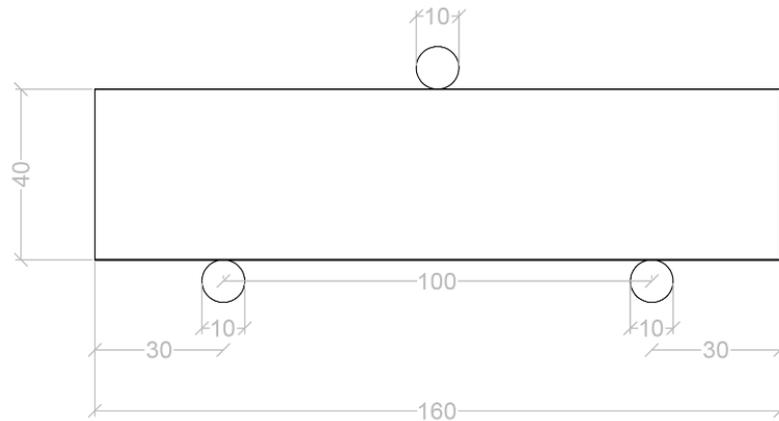


Figura 28 – Schema del funzionamento della prova a flessione (grandezze espresse in mm)⁷



Figura 29 – Prova di rottura a flessione

La resistenza a flessione viene calcolata automaticamente dal terminale con la seguente formula:

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

Dove:

- F_m è il valore di rottura registrato 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 $40mm$.

Dalla prova a flessione si ottengono da un unico provino due provini distinti, circa delle stesse dimensioni; su una delle due metà è stata eseguita la prova a compressione, in quanto quest'ultima si esegue sulla faccia perpendicolare rispetto a quella su cui è stata eseguita la flessione.



Figura 30 – Provini rotti in seguito alla prova a flessione

La prova a compressione si esegue sulla superficie quadrata 40mm x 40mm di uno delle due metà in cui è stato suddiviso il provino dalla prova a flessione. Le facce parallele in questo caso vengono posizionate sulle due lastre di carico di un'altra pressa apposita per la prova di 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 il valore di rottura registrato dal terminale, in kN ;
- A è l'area della sezione su cui si esegue la prova, $40 \times 40 \text{ mm}^2$.



Figura 31 – Prova di rottura a compressione

Durante entrambe le prove il terminale registra i dati mandati dalle presse in termini di forza (KN) e della corrispondente deformazione registrata, espressa in *mm*; inoltre, al momento della rottura viene registrato il valore dello sforzo massimo applicato sul provino.

4. Risultati e osservazioni

4.1 Caratterizzazione fisica delle malte

Sono state effettuate prove ed analisi sia sulle miscele fresche che sulle malte indurite; sulle miscele fresche è stata effettuata la prova di lavorabilità e la misura della densità fresca, mentre sui provini di malta induriti sono state effettuate le prove di resistenza meccanica e la misura della densità dopo una maturazione in cella di 28 giorni. Le misure delle densità, come indirettamente quelle della lavorabilità, possono essere un primo indice dell'efficacia dell'aggiunta di LCD come additivo aerante. Le prove di resistenza meccanica, di flessione e compressione, offrono invece dei risultati utili per conoscere la perdita di resistenza meccanica dei provini aerati rispetto al provino di riferimento non aerato: mentre una perdita di resistenza è ovviamente prevista, questa non dovrebbe essere superiore al 20%.

4.1.1 Risultati lavorabilità

La lavorabilità è la caratteristica che indica la capacità del calcestruzzo o della malta freschi di muoversi e compattarsi. Un'adeguata mobilità agevola il trasporto del calcestruzzo fresco mentre la sua capacità di compattarsi favorisce la fuoriuscita dell'aria ed evita il formarsi delle bolle, permettendo di massimizzare così la densità del materiale indurito, oltre a migliorare l'aderenza tra il calcestruzzo e i ferri di armatura¹⁸.

Provino	Diametro 1 (mm)	Diametro 2 (mm)	Diametro Medio (mm)	Foto
RIF (a/c: 0,55)	/	/	/	
RIF (a/c: 0,6)	118	120	119	

LCD 6 t.q.	104	108	106	
RIF (a/c: 0,65)	111	109	110	

Tabella 17 – Risultati prova di lavorabilità getto di prova

Si nota che il diametro finale di tutte le prove di lavorabilità effettuate in questo caso è decisamente inferiore a 140 mm; perciò, la consistenza di queste malte fresche va classificata come rigida in accordo alla UNI EN 1015-6:2007. È per questo motivo che nel secondo tentativo di gettata sono state applicate le modifiche descritte nel paragrafo 3.5.4.

Provino	Diametro 1 (mm)	Diametro 2 (mm)	Diametro Medio (mm)	Foto
RIF (a/c: 0,6)	120	115	117,5	
RIF AEA	192	192	192	
LCD 2% fine	155	152	153,5	
LCD 2% t.q.	122	119	120,5	
LCD 4% fine	148	152	150	

LCD 4% t.q.	122	119	120,5	
-------------	-----	-----	-------	---

Tabella 18 – Risultati prova di lavorabilità getto definitivo

In base alla classificazione descritta dalla UNI EN 1015-6:2007 è possibile classificare le consistenze delle diverse miscele come indicato nella tabella 19.

	Slump	Classe Lavorabilità
	mm	
RIF	117,5	rigida
RIF AEA	192	plastica
2% fine	153,5	plastica
2% t.q.	120,5	rigida
4% fine	150	plastica
4% t.q.	120,5	rigida

Tabella 19 – Classi di lavorabilità malte gettate 9/8/2021

In questo caso alcune malte raggiungono la classe di lavorabilità plastica, ovvero quella compresa tra 140 e 200mm. La minore lavorabilità ottenuta è spiegabile in gran parte dalla piccola dimensione dell'aggregato fine le cui particelle hanno quindi un'elevata superficie specifica; questo comporta un alto assorbimento di acqua che limita il movimento della malta.

Risulta tuttavia evidente come l'additivo aerante e l'aggiunta di LCD fine comporti un aumento della lavorabilità (grafico 8). La formazione di bolle d'aria nella malta fresca favorisce infatti lo scorrimento e il movimento. L'aggiunta della frazione LCD tal quale non aumenta invece la lavorabilità in modo significativo rispetto al riferimento.

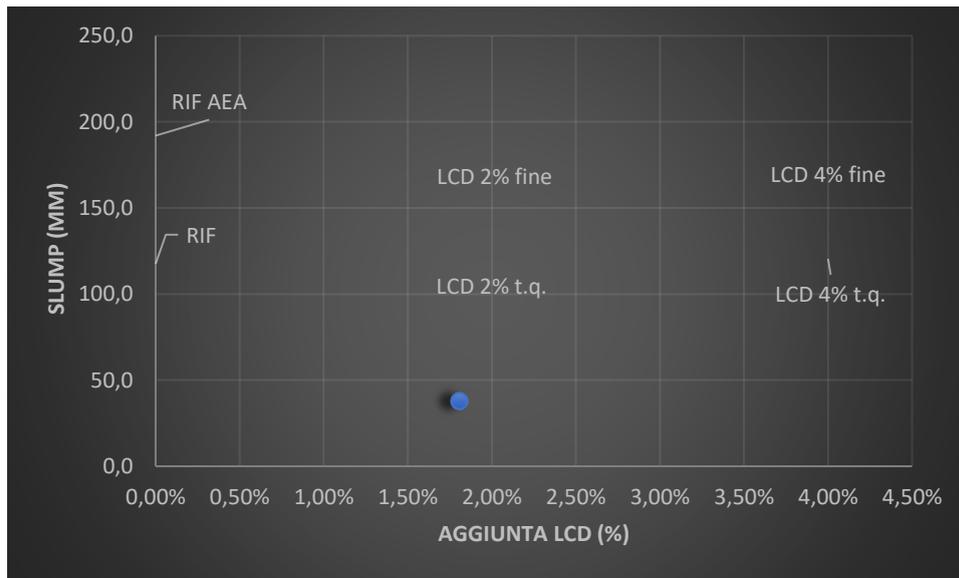


Grafico 8 – Andamento della lavorabilità (slump) in funzione dell'aggiunta di LCD

4.1.2 Risultati Densità

	densità (28gg)	densità fresca
	g/cm^3	g/cm^3
RIF	2,07	2,25
RIF AEA	1,70	1,90
LCD 2% fine	1,87	2,06
LCD 2% t.q.	2,07	2,32
LCD 4% fine	1,81	2,21
LCD 4% t.q.	1,96	2,08

Tabella 20 – Risultati densità misurata sulla malta fresca e sui provini induriti (28 giorni di maturazione)

I risultati della densità fresca sono solo in parte coerenti con quelli della lavorabilità. La formazione di bolle d'aria all'interno della miscela abbassa infatti la densità fresca della malta. Le malte che ci aspetteremmo aver riportato una perdita di densità maggiore rispetto al riferimento sarebbero infatti quelle con una lavorabilità maggiore, ovvero quelle in cui sono presenti l'additivo aerante e la frazione fine di LCD che agisce efficacemente come aerante. In realtà, sebbene il RIF AEA e LCD 2% fine rispettino le aspettative, si nota come la densità fresca del LCD 4% t.q. risulti più bassa di quella del LCD 4% fine (grafico 9).

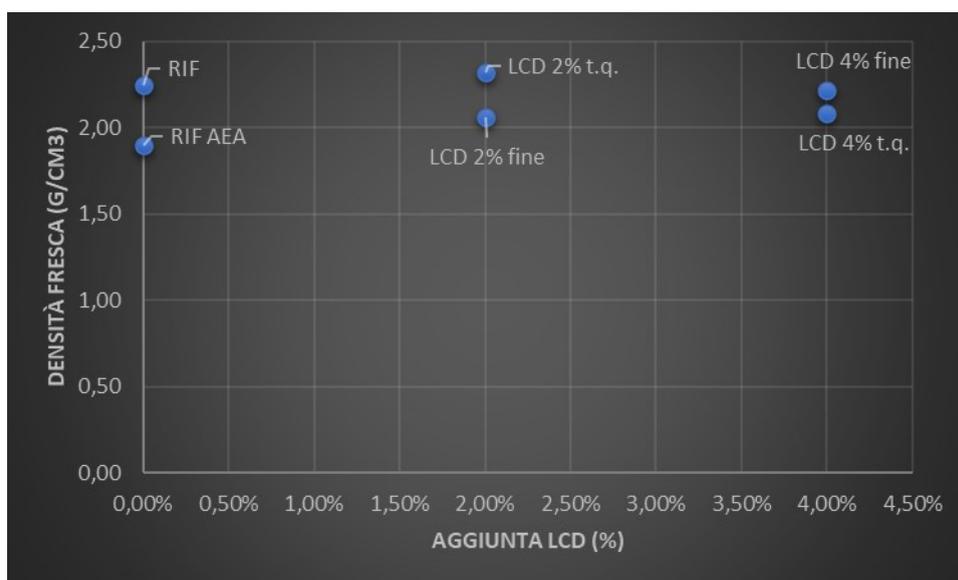


Grafico 9 – Andamento della densità fresca in funzione dell'aggiunta di LCD

L'andamento non è confermato dalla misura della densità sui provini induriti dopo 28 giorni di maturazione (grafico 10), dove l'aggiunta della frazione fine comporta una maggiore diminuzione di densità per entrambi i dosaggi. Potrebbe essere ipotizzabile un errore nel calcolo della densità allo stato fresco per quanto riguarda i provini con l'aggiunta del 4%, sia fine che tal quale. Inoltre, l'obiettivo, quando si aggiunge un additivo aerante, è soprattutto quello di ottenere nello stato indurito una densità minore e la presenza di una porosità maggiore. In quest'ottica si può affermare che l'aggiunta della frazione fine abbassa la densità del prodotto indurito in modo più efficace della frazione tal quale.

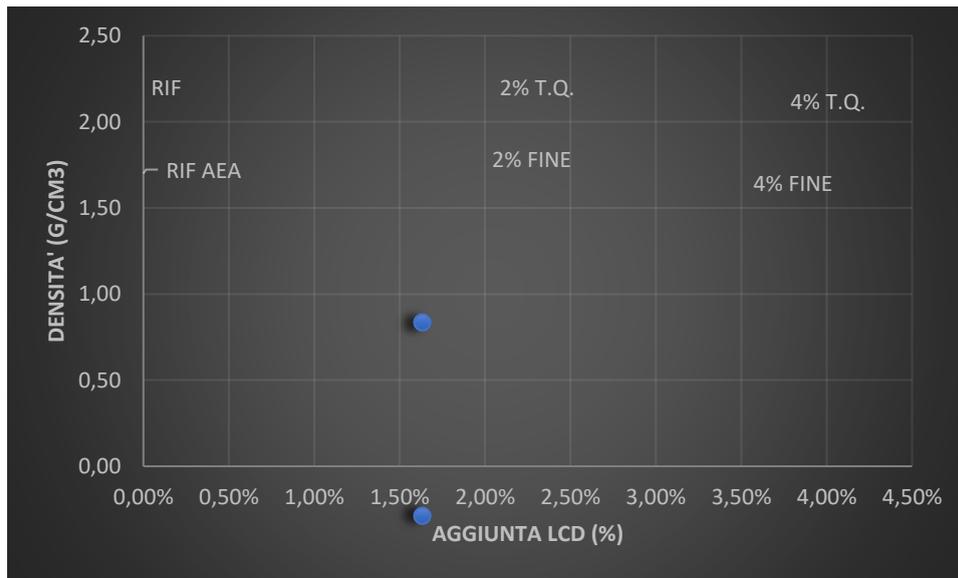


Grafico 10 - Andamento della densità dei provini induriti (28 giorni) in funzione dell'aggiunta di LCD

4.1.3 Risultati resistenze meccaniche

	Sezione	Forza massima	Resistenza a Flessione
	(mm ²)	(kN)	MPa
RIF 1	6400	2,73	0,64
RIF 2	6400	2,58	0,60
RIF 3	6400	3,20	0,75
RIF AEA 1	6400	1,92	0,45
RIF AEA 2	6400	1,86	0,44
RIF AEA 3	6400	1,92	0,45
2% FINE 1	6400	2,30	0,54
2% FINE 2	6400	2,27	0,53
2% T.Q. 1	6400	3,03	0,71
2% T.Q. 2	6400	2,64	0,62
2% T.Q. 3	6400		
4% FINE 1	6400	2,15	0,50
4% FINE 2	6400	2,20	0,52
4% T.Q. 1	6400	2,42	0,57
4% T.Q. 2	6400	2,50	0,59
4% T.Q. 3	6400	2,53	0,59

Tabella 21 – Risultati prove di resistenza a flessione dei provini (28gg)

La rottura del terzo provino del LCD 2% T.Q. è stata invalidata da un errore nella registrazione dei dati nel terminale, perciò la resistenza a flessione del 2% T.Q. è mediata su due soli valori.

Il calcestruzzo e le malte cementizie non sono materiali resistenti a trazione, e di conseguenza non lo sono neanche a flessione visto che quest'ultima provoca sforzi di trazione nelle fibre tese. I risultati confermano questa scarsa resistenza. I risultati della prova di rottura a flessione non sono perciò particolarmente significativi.

Molto più significativi sono i risultati di resistenza a compressione illustrati nella tabella 22.

	Sezione	Forza massima	Resistenza a compressione
	mm ²	kN	MPa
RIF 1	1600	59,70	37,31
RIF 2	1600	57,30	35,81
RIF 3	1600	59,96	37,48
RIF AEA 1	1600	32,37	20,23
RIF AEA 2	1600	39,45	24,66
RIF AEA 3	1600	32,01	20,01
2% FINE 1	1600	45,85	28,66
2% FINE 2	1600	47,62	29,76
2% T.Q. 1	1600	53,00	33,13
2% T.Q. 2	1600	53,38	33,36
2% T.Q. 3	1600	52,49	32,81
4% FINE 1	1600	42,80	26,75
4% FINE 2	1600	40,94	25,59
4% T.Q. 1	1600	50,37	31,48
4% T.Q. 2	1600	50,92	31,83
4% T.Q. 3	1600	50,73	31,71

Tabella 22 – Risultati prove di resistenza a compressione dei provini (28gg)

	Rf media	Rc media
	MPa	MPa
RIF	0,66	36,87
RIF AEA	0,45	21,63
2% fine	0,54	29,21
2% t.q.	0,66	33,10
4% fine	0,51	26,17
4% t.q.	0,58	31,67

Tabella 23 – Resistenze medie a flessione e compressione dei provini (28gg)

Dividendo la resistenza meccanica per la densità del provino si ottiene la resistenza specifica Rcs

	Rf media	Rc media	Rcs compressione	Rcs flessione
	MPa	MPa	N mm/Kg	N mm/Kg
RIF	0,66	36,87	17,78	0,32
RIF AEA	0,45	21,63	12,70	0,26
2% fine	0,54	29,21	15,58	0,29
2% t.q.	0,66	33,10	15,96	0,32
4% fine	0,51	26,17	14,45	0,28
4% t.q.	0,58	31,67	16,19	0,30

Tabella 23 – Resistenze specifiche a compressione e a flessione dei provini (28gg)

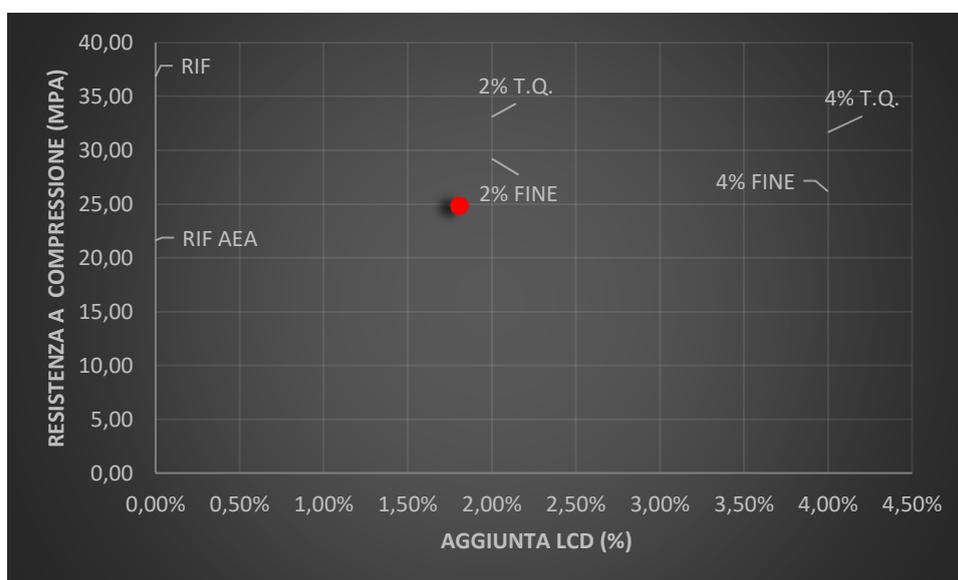


Grafico 11 – Andamento della resistenza a compressione Rc (28gg) in funzione dell'aggiunta di LCD

Il grafico 11 mostra che l'aggiunta della frazione fine e dell'aerante comportano una notevole perdita di resistenza a compressione rispetto al provino di riferimento. Questa perdita di resistenza meccanica può essere attribuita alla minore densità e quindi alla maggiore porosità.

Tuttavia, la perdita di resistenza dovuta all'aggiunta di additivo aerante rispetto al provino non aerato, sebbene normale e prevedibile, non dovrebbe superare il 20% per avere un additivo commercializzabile. Questo però non accade in questa sperimentazione, come si evince dalla tabella 24.

	Perdita di res. meccanica a compressione rispetto al RIF
	%
RIF	
RIF AEA	41,33%
2% fine	20,77%
2% t.q.	10,22%
4% fine	29,02%
4% t.q.	14,09%

Tabella 24 – Perdita di resistenza meccanica a compressione rispetto al RIF (28gg). In rosso sono indicate le perdite di resistenza maggiori al limite del 20%, in verde quelle minori. Il colore arancione è stato usato per i casi vicini al limite

Lo stesso provino di riferimento con aerante eccede in modo notevole il limite del 20% di perdita di resistenza meccanica; questo vuol dire che il dosaggio di aerante nel mix design è stato eccessivo.

4.2 Relazioni tra i risultati

Osservando i risultati del provino di riferimento con aerante è possibile stabilire quali sono i risultati che ci dobbiamo aspettare nel caso di eventuale adeguatezza della frazione LCD, sia fine che tal quale, come additivo aerante. Innanzitutto, ci dovrebbe essere un aumento di lavorabilità della malta fresca, dovuto alla formazione di bolle d'aria, fino alla classe di lavorabilità plastica; ci si aspetta poi una perdita di densità fresca ma soprattutto del provino indurito rispetto al riferimento non aerato; infine, ci si aspetta una perdita di resistenza meccanica a compressione rispetto al riferimento non aerato contenuta entro il 20%.

	Perdita di res. meccanica a compressione rispetto al RIF	Perdita di densità rispetto al RIF	Classe Lavorabilità
	%	%	
RIF			rigida
RIF AEA	41,33%	17,86%	plastica
2% fine	20,77%	9,61%	plastica
2% t.q.	10,22%	-0,04%	rigida
4% fine	29,02%	12,65%	plastica
4% t.q.	14,09%	5,68%	rigida

Tabella 25 – Perdita di resistenza meccanica e di densità rispetto al RIF e classe di lavorabilità. In rosso sono indicate caratteristiche che si allontanano da quelle desiderate (in arancione quelle vicino al limite), in verde quelle che vi si avvicinano (in verde scuro quelle al limite)

- LCD fine

L'aggiunta del 2% di LCD fine è quella che più di tutte si avvicina a rispettare tutti i requisiti richiesti ad un additivo aerante. Aumentando il dosaggio al 4% di LCD fine si ottiene una maggiore perdita di densità ma anche una perdita di resistenza meccanica che si avvicina al 30%. Si può dedurre che un ulteriore aumento di dosaggio al 6% di LCD fine possa ulteriormente aumentare l'effetto aerante ma a scapito di una perdita di resistenza inaccettabile.

- LCD t.q

L'aggiunta di LCD t.q. non ha avuto effetti simili o paragonabili all'aggiunta della sola parte fine (<0,075mm). Con l'aggiunta del 2% di LCD tal quale si ha una perdita di resistenza meccanica del 10% senza lo sviluppo né di una maggiore lavorabilità né di una minore densità finale. Aumentano il dosaggio al 4% si ha una perdita meccanica del 14% con una leggera diminuzione della densità, mentre la lavorabilità rimane inalterata. Sarebbe interessante indagare l'aggiunta di percentuali maggiori di LCD tal quale, come del 6% o 8%, per capire se sia possibile ottenere effetti aeranti significativi con una perdita di resistenza meccanica accettabile. Se il problema della lavorabilità persistesse anche con l'aggiunta di percentuale di LCD tal quale maggiori si potrebbe provare a risolverlo cambiando la quantità di additivo superfluidificante e/o il rapporto acqua/cemento, per cercare di ottenere una lavorabilità allo stato fresco almeno plastica.

Queste considerazioni sull'efficacia delle due frazioni di LCD come additivo aerante sono però sicuramente non complete a causa della scarsa validità del riferimento. Il RIF AEA, infatti, risulta secondo le prove di resistenza meccaniche effettuate avere una perdita di resistenza a compressione eccessiva (40%), e questo non lo rende un buon riferimento. La prova andrebbe ripetuta cercando di dosare l'additivo aerante in quantità minori nel mix design in modo da ottenere un provino di riferimento più idoneo.

5. Conclusioni

5.1 Estrazione indio

Questa ricerca è il primo tentativo di portare su scala pilota un processo di recupero dell'indio da rifiuti RAEE, in particolare da rifiuti da schermi LCD, che utilizza nella fase di estrazione la procedura ideata dal dipartimento DISVA dell'Università Politecnica delle Marche. Per quanto riguarda dunque il processo di lisciviazione brevettato si sono avute conferme nell'ambito dell'efficienza dell'estrazione dell'indio, che si conferma molto alta in scala pilota tanto quanto era stata alta in scala di laboratorio. È confermato invece il problema di una bassa concentrazione di indio nei rifiuti che vengono trattati; sarà utile indagare possibili cambiamenti nel pretrattamento e nella selezione merceologica e granulometrica del rifiuto in arrivo dall'impianto per cercare di ottenere percentuali di indio maggiori al momento della lisciviazione. Per il momento l'ipotesi di un trattamento della sola parte fine (<1mm) già presente nel rifiuto in arrivo dall'impianto evitando un ulteriore pretrattamento di macinazione sarebbe da scartare poiché andrebbe a non considerare più dell'80% del rifiuto in ingresso, aggiungendo l'onere di andare poi a smaltirlo in un altro modo. L'ipotesi di una rimozione iniziale di alluminio e film polimerici può essere più percorribile ma bisogna ricercare un trattamento efficiente per effettuarla.

5.2 Riutilizzo LCD nei materiali da costruzione

5.2.1 Lavaggio

Una volta lisciviato il materiale ha dovuto subire due lavaggi per rientrare nei limiti di concentrazione di solfati e cloruri prescritti dalla UNI EN 8520-2:2016 per gli inerti da utilizzare in calcestruzzi e malte cementizie; già dopo il primo lavaggio però la concentrazione di solfati, problematica per via dell'utilizzo di acido solforico per la lisciviazione, era solo leggermente superiore al limite. È quindi di interesse studiare una modalità di lavaggio alternativa, come un solo lavaggio più lungo, per ottimizzare il processo in termini di acque reflue da smaltire ed energia consumata, oltre che per velocizzarne i tempi.

5.2.2 Additivo aerante

Altro scopo primario di questa tesi era quello di valutare, confrontandole con un aerante commerciale di riferimento, la possibilità di riciclare la frazione di LCD restante dopo l'estrazione dell'indio come additivo aerante per la produzione di calcestruzzi e malte leggere. Essendo stato il getto dei provini un getto preliminare non ci si aspettavano risultati immediati, e, nonostante l'errore nel dosaggio di additivo aerante nella miscela di riferimento, si possono dedurre dalle prove delle informazioni importanti che suggeriscono i prossimi passi da muovere nella ricerca. La parte di LCD fine (<75 μm) è risultata più efficace come aerante rispetto alla parte tal quale (<1mm), garantendo una buona perdita di densità e un aumento di lavorabilità. Già però con un dosaggio del 2% di LCD fine si hanno perdite di resistenza a compressione di poco superiori al 20% rispetto al riferimento non aerato, che tendono ad aumentare con l'aumentare del dosaggio. Per quanto riguarda la frazione di LCD tal quale, solo aggiungendola al 4% si ha un leggero effetto aerante, con una lavorabilità però che rimane bassa. È comunque un risultato

abbastanza promettente e un prossimo passo potrebbe essere quello di studiare la possibilità di utilizzare la frazione tal quale come aerante con percentuali più elevate; l'aspetto positivo di ciò è la possibilità di utilizzare l'intero rifiuto come aerante e valorizzarlo al massimo. Sarà comunque fondamentale nella prossima sperimentazione realizzare un riferimento con aerante commerciale che rispetti i limiti di perdita di resistenza meccanica in modo da poter fungere da riferimento ottimale per i provini sperimentali.

6. Appendice

In questo capitolo si troveranno allegate tutte le schede tecniche dei materiali commerciali utilizzati.

Scheda Tecnica

TECNOCEM 42,5 R

CEM II/A-LL 42,5 R

Descrizione

Il TECNOCEM A-LL 42,5 R è un cemento Portland al calcare tipo II ad alta resistenza normalizzata e a resistenza iniziale 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 calcare con TOC $\leq 0,20\%$ in massa (LL) ed eventuali costituenti secondari.

Requisiti di norma (UNI EN 197-1)

REQUISITI CHIMICI*

Solfati (come SO ₃)	$\leq 4,0\%$
Cloruri	$\leq 0,10\%$

REQUISITI FISICI*

Tempo di inizio presa	≥ 60 min
Espansione	≤ 10 mm

REQUISITI MECCANICI*

Resistenze alla compressione

2 giorni	$\geq 20,0$ MPa
28 giorni	$\geq 42,5$ 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.

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 giugno 2021



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.

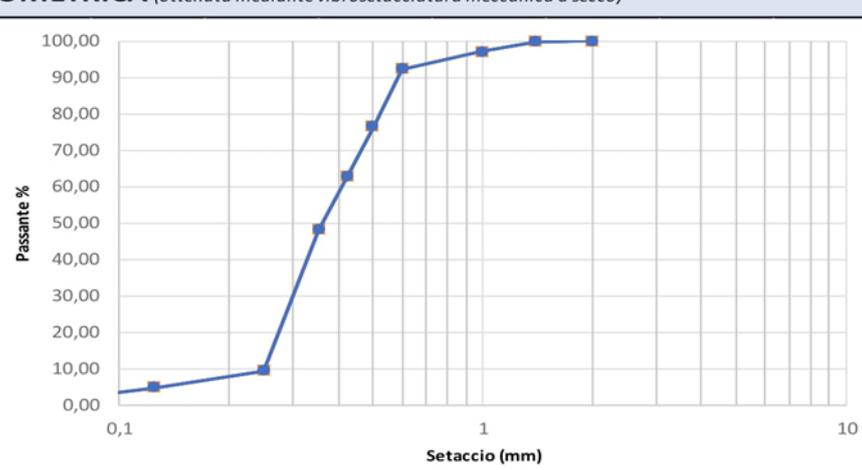
CODICI EAN:



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)	
Setacci mm	Passante %peso
2	100,00
1,4	99,80
1	97,20
0,6	92,30
0,5	76,40
0,425	62,70
0,355	48,00
0,25	9,30
0,125	4,70
0,063	0,80
0	0,00



Setaccio (mm)	Passante %
0,1	0,00
0,25	9,30
0,425	62,70
0,6	92,30
1	97,20
2	100,00

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 derivare 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 delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature, in qualsiasi classe di consistenza e con temperature di maturazione superiori ai 15 gradi o 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 taccaviasta;

- per la produzione di pannelli di tamponamento, caratterizzati da un elevato grado di lavorabilità e di finitura superficiale in combinazione ad un ottimo facciavista 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):	1,08 ± 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 > 15°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 **Expacrete** 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;
- disarmani **DMA** e **Mapeform Eco**, 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 (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

© A.S. 8874

La riproduzione di testi, foto e illustrazioni di questa pubblicazione è vietata e viene punita 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 tixotropiche 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 sospinge 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 **Mapeplast 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 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 cassetate.

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. Commissione Europea, Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare; per un'Europa più pulita e più competitiva (2020)
2. Commissione Europea, “Resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità” (2020)
3. Centro di Coordinamento RAEE, Rapporto Annuale (2020)
4. Federbeton, Confindustria: rapporto di filiera 2019
5. Lenntech. Lenntech BV. [Online] 2019. <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/in.htm>
6. Jonas Schuster, Burçak Ebin: Investigation of indium and other valuable metals leaching from unground waste LCD screens by organic and inorganic acid leaching (2021), abstract
7. Michela Mengucci, Valorizzazione dei rifiuti RAEE in diverse catene di valore: effetto dell'impiego di frammenti LCD in materiali da costruzione (2019)
8. Amato, Alessia e Beolchini, Francesca. End of life liquid crystal displays recycling: A patent review. Journal of Environmental Management. (2018)
9. <https://www.wup-cementi.it/innovazione/la-norma-uni-en-197-1/>
10. Riccardo Petrini, Additivi sostenibili per materiali da costruzione: aeranti, superfluidificanti e polimeri superassorbenti per matrici cementizie ricavati da rifiuti speciali (2019)
11. Lozère. Wikipedia. [Online] 2005. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Color_TFT-LCD_Layout.png.
12. Bakker C., Wang F., Huisman J., den Hollander M., Products that go round: exploring product life extension through design. Journal of Cleaner Production (2014)
13. Maria Letizia Ruello, Alessia Amato, Francesca Beolchini, Saveria Monosi, Valorizing end-of-life LCD scraps after indium recovery (2016)
14. A.V.M. Silveira, M.S. Fuchs, D.K. Pinheiro, E.H. Tanabe and D.A. Bertuol, Recovery of indium from LCD screens of discarded cell phones (2015)
15. Researchgate, https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-a-tubular-ball-mill-The-balls-compose-the-milling-elements-and_fig1_317859961
16. Rocchetti, Laura, et al. Cross-current leaching of indium from end-of-life LCD panels. Waste Management. 42, 2015, pp 180-187
17. A. Amato, A. Becci, P. Mariani, F. Carducci, M.L. Ruello, S. Monosi, C. Giosuè, F. Beolchini, End-of-life liquid crystal display recovery: Toward a zero-waste approach, Appl. Sci. 9 (2019)
18. Encosrl, <https://www.encosrl.it/lavorabilita-del-calcestruzzo-fresco-influenza-sul-calcestruzzo-in-servizio/>
19. Civilengnotes, <https://www.civilengnotes.com/flow-test-and-flow-table-test-to-measure-workability-of-fresh-concrete/>

20. Collepardi, Mario, Collepardi, Silvia e Troli, Roberto. Il nuovo calcestruzzo. Ponzano Veneto: ENCO srl, 2009.
21. Góra J., Franus M., Barnat-Hunek D., Franus W., Utilization of recycled liquid crystal display (LCD) panel waste in concrete