



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea luglio 2023

Riciclo del calcestruzzo

Reimpiego di traverse ferroviarie dismesse quale
aggregato per calcestruzzo

Relatrice:

prof. Federica Bondioli

Candidata:

Laura Caselli

*Alla mia famiglia, per avermi sempre sostenuta
e incoraggiata nelle mie scelte*

A Filippo, per aver reso questi anni più facili

Ai colleghi di Overall che hanno reso possibile questo studio

Indice

Indice delle figure.....	iii
Indice delle tabelle.....	v
1. Introduzione	1
1.1 Obiettivi della sperimentazione.....	2
1.2 Legante.....	3
1.3 Aggregati.....	5
1.4 Additivi	6
2. Parte sperimentale.....	9
2.1 Analisi aggregato	11
2.1.1 Quantità, assorbimento d’acqua e massa volumica.....	13
2.1.2 Distribuzioni granulometriche e contenuto di fini	17
2.1.3 Altre caratteristiche	23
2.2 Mix Design del calcestruzzo	27
2.3 Prove su calcestruzzo	36
2.3.1 Misura della massa volumica	37
2.3.2 Contenuto d’aria.....	38
2.3.3 Abbassamento del cono di Abrams.....	39
2.3.4 Determinazione del contenuto d’acqua.....	40
2.3.5 Resistenza a compressione.....	42
2.3.6 Resistenza a flessione	44
2.3.7 Misura del modulo elastico	47
2.3.8 Ritiro volumetrico.....	49
3. Risultati.....	51
3.1 Prove su calcestruzzo fresco	51
3.2 Resistenza a compressione	54
3.3 Resistenza a flessione	58
3.4 Misura del modulo elastico.....	59
3.5 Ritiro volumetrico	61
4. Conclusioni.....	63

Appendice A – Curve granulometriche.....	65
Appendice B – Curve di miscela	69
Bibliografia	71
Sitografia	73

Indice delle figure

Figura 1	Quantità di aggregati estratti, da riciclo e artificiali utilizzati nei principali paesi europei nel 2018. Fonte "Rapporto cave 2021" Legambiente ^[3]	1
Figura 2	Limiti delle percentuali di utilizzo di aggregato da riciclo per l'ottenimento di calcestruzzo strutturale. Fonte decreto 17 gennaio 2028, "Aggiornamento norme tecniche per le costruzioni" ^[4]	2
Figura 3	Pasta di cemento portland al momento della presa (a sinistra) e dell'indurimento (a destra) ^[II]	5
Figura 4	Riempimento ideale con aggregati aventi una sola grandezza a (sx) e due grandezze b(dx) 5	
Figura 5	Esempi di polimeri utilizzati come super-fluidificanti ^[III]	7
Figura 6	Comportamento di una pasta di cemento senza (a) e con (b) l'aggiunta di un super-fluidificante ^[III]	8
Figura 7	Aspetto degli aggregati da traverse ferroviarie	10
Figura 8	Struttura vibrante per la costruzione delle curve granulometriche.....	18
Figura 9	Limiti ammissibili del contenuto di fini ^[10]	19
Figura 10	Distribuzioni granulometriche degli aggregati da cava	21
Figura 11	Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse A.....	21
Figura 12	Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse B	22
Figura 13	Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse C.....	22
Figura 14	Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse D.....	22
Figura 15	Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse E	23
Figura 16	Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse F	23
Figura 17	Resistenza cubica raggiunta da diverse tipologie di cemento in base al rapporto acqua/cemento utilizzato ^[II]	28
Figura 18	Quantità di acqua richiesta per ottenere un determinato slump in funzione della dimensione massima degli aggregati [II]	29
Figura 19	Curva di Fuller e fuso granulometrico	31
Figura 20	Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale di aggregato da cava.....	31
Figura 21	Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 60% di aggregato A	32
Figura 22	Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 100% di aggregato A	32
Figura 23	Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 60% di aggregato F	32
Figura 24	Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 100% di aggregato F.....	33
Figura 25	Aria inglobata in funzione del diametro massimo degli aggregati ^[III]	33
Figura 26	Provini di calcestruzzo a superficie livellata con targhetta identificativa.....	36
Figura 27	Prova di misura della massa volumica	38
Figura 28	Strumento per la valutazione del contenuto d'aria	39

Figura 29 Slump test di calcestruzzo S1	40
Figura 30 Aspetto del calcestruzzo dopo essiccazione	41
Figura 31 Provino cubico per la prova di resistenza a compressione	42
Figura 32 Macchinario per la prova di resistenza a compressione	43
Figura 33 Esempi di rotture soddisfacenti di provini cubici ^[26]	43
Figura 34 Set di provini destinati alla misura della resistenza a flessione	44
Figura 35 Modello del montaggio dello strumento per la prova a flessione a quattro punti ^[27]	45
Figura 36 Modello del montaggio dello strumento per la prova a flessione a tre punti ^[27]	46
Figura 37 Provini destinati alla prova di misura del modulo elastico.....	47
Figura 38 Ciclo di applicazione del carico per la determinazione del modulo elastico ^[28]	48
Figura 39 Misura della lunghezza del lato per la valutazione del ritiro del provino	49
Figura 40 Rottura esempio di un provino a sette giorni di stagionatura	56
Figura 41 Rottura esempio di un provino a ventotto giorni di stagionatura.....	56
Figura 42 Aumento delle resistenze durante il processo di maturazione.....	57

Indice delle tabelle

Tabella 1	Tipologie di traverse utilizzate per l'ottenimento di frantumato da riciclo	10
Tabella 2	Motivazione delle scelte di esclusione o effettuazione delle prove necessarie per l'utilizzo dell'aggregato per il confezionamento di calcestruzzo	12
Tabella 3	Quantità d'acqua presente e assorbimento d'acqua a superficie asciutta per ogni tipologia di aggregato utilizzato.....	14
Tabella 4	Conformità per valori di assorbimento d'acqua e massa volumica degli aggregati riciclati grossi.....	15
Tabella 5	Valori della massa volumica in mucchio degli aggregati.....	17
Tabella 6	Valori di contenuto di fini nei frantumati	20
Tabella 7	Esiti test effettuati	25
Tabella 8	Limiti richiesti in base alla classe di esposizione ^[5]	28
Tabella 9	Percentuali dei diversi aggregati utilizzati in ciascuna miscela di calcestruzzo	31
Tabella 10	Miscele.....	35
Tabella 11	Valori di rapporto acqua/cemento	51
Tabella 12	Valori della massa volumica.....	52
Tabella 13	Valori di percentuale di aria inglobata.....	53
Tabella 14	Esiti dello slump test.....	53
Tabella 15	Valori della resistenza a compressione	54
Tabella 16	Valori di resistenza a flessione a 28 giorni	58
Tabella 17	Valori del modulo elastico a ventotto giorni di stagionatura.....	60
Tabella 18	Misure del ritiro	61
Tabella A 1	Percentuali passanti ai setacci dell'aggregato da cava	65
Tabella A 2	Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "A"	66
Tabella A 3	Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "B"	66
Tabella A 4	Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "C"	67
Tabella A 5	Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "D"	67
Tabella A 6	Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "E"	68
Tabella A 7	Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "F"	68

Tabella B 1 Costruzione della miscela allo 0% di materiale riciclato.....	69
Tabella B 2 Costruzione delle miscele contenenti aggregati da traverse "A"	70
Tabella B 3 Costruzione delle miscele contenenti aggregati da traverse "F"	70

1. Introduzione

Per calcestruzzo s'intende una miscela costituita da un legante, aggregati e acqua a cui si possono aggiungere additivi per modificarne le caratteristiche. È un materiale utilizzato fin dai tempi dei romani anche se nel corso dei secoli ha subito diversi cambiamenti, il più importante dei quali è il legante; nel diciannovesimo secolo il cemento ha sostituito la calce e il gesso. L'uso del calcestruzzo come materiale da costruzione si è diffuso con l'introduzione di un'armatura d'acciaio che ha portato ad un aumento della resistenza a trazione e a flessione. Oggi il calcestruzzo trova applicazione in molteplici settori, dall'edilizia alla pavimentazione stradale. Il suo utilizzo può avvenire in due modalità, attraverso il confezionamento di prefabbricati o con getto in opera.

L'ampia diffusione dell'utilizzo del calcestruzzo e del calcestruzzo armato portano a un problema fondamentale, lo smaltimento. Mentre per l'armatura il riciclo è semplice, una volta separata dal restante materiale, per il calcestruzzo il riutilizzo risulta molto più complicato in quanto l'idratazione del legante è irreversibile. Nel solo 2022 la produzione mondiale di calcestruzzo è stata di 14 miliardi di metri cubi (fonte Global Cement and Concrete Association ^[1]); quindi, risulta chiara la necessità di trovare delle soluzioni ecologiche rispetto all'abbandono di questi rifiuti nelle discariche.

Gli studi per il recupero del materiale inerte proveniente dalla demolizione di calcestruzzo sono molteplici e spaziano dalla pulizia per mezzo di acqua degli aggregati e del completo riutilizzo degli stessi ^[1] alla frantumazione del calcestruzzo seguita da una suddivisione dei frammenti in base alla densità per un riciclo differenziato ^[2]. In diversi paesi europei il riciclo d'inerti è già realtà mentre l'Italia risulta essere parecchio indietro su questo fronte, come mostrato nella tabella in figura 1.

Il settore degli aggregati nei principali Paesi europei, 2018

Paese	Sabbia e ghiaia estratte (milioni di metri cubi)	Aggregati riciclati e riutilizzati (milioni di metri cubi)	Aggregati artificiali (milioni di metri cubi)
Germania	157	43,6	26,4
Polonia	121,2	11,5	6
Francia	72,1	67,8	2,4
Italia*	38,7	0	3,6
Austria	38,2	2,4	1,8
Romania	35,8	0,6	0
Regno Unito	32,1	39,3	4,5
Paesi Bassi	29,6	12,6	0
Spagna	21,3	1,6	0,4

Elaborazione Legambiente su stime UEPG, 2018 (*Tra gli associati italiani di UEPG figura solamente ANEPLA)

Figura 1 Quantità di aggregati estratti, da riciclo e artificiali utilizzati nei principali paesi europei nel 2018. Fonte "Rapporto cave 2021" Legambiente ^[3]

In Italia l'utilizzo di calcestruzzo dismesso e frantumato come sostituzione dell'aggregato da cava risulta essere limitato a sporadici esempi disseminati sul territorio nazionale. Tra questi il Palaghiaccio e lo Juventus Stadium a Torino in cui sono stati utilizzati circa 20'000 metri cubi di aggregati riciclati [3]. Sia in questo che in altri esempi però l'utilizzo si è limitato alla realizzazione di sottofondi e pavimentazioni che, per quanto possano essere estesi, non potranno mai permettere uno smaltimento completo del calcestruzzo dismesso. Una soluzione al continuo aumentare di detriti da demolizione potrebbe consistere nel loro utilizzo per applicazioni dove attualmente viene utilizzato quasi esclusivamente materiale da cava, come per la produzione di prefabbricati o nel settore edile. Una limitazione a questo utilizzo viene però data dalla legge italiana che ne limita le percentuali massime presenti nel nuovo calcestruzzo indipendentemente dalle proprietà del frantumato da riciclo; l'aggregato deve essere grosso (sopra 4 mm) ed essere utilizzato secondo la tabella in figura 2 [4]. La limitazione riguarda costruzioni e prefabbricati che vengono definiti strutturali. Per le applicazioni non strutturali è possibile avere una sostituzione del 100% indipendentemente dalla classe di resistenza che deve avere il calcestruzzo, è sufficiente che la resistenza minima richiesta a compressione sia garantita.

Tab. 11.2.III

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	percentuale di impiego
demolizioni di edifici (macerie)	= C 8/10	fino al 100%
demolizioni di solo calcestruzzo e c.a. (frammenti di calcestruzzo \geq 90%, UNI EN 933-11:2009)	\leq C20/25	fino al 60%
	\leq C30/37	\leq 30%
	\leq C45/55	\leq 20%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe	Classe minore del calcestruzzo di origine	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 10%

Figura 2 Limiti delle percentuali di utilizzo di aggregato da riciclo per l'ottenimento di calcestruzzo strutturale. Fonte decreto 17 gennaio 2028, "Aggiornamento norme tecniche per le costruzioni" [4]

L'impossibilità di poter avere una sostituzione totale dell'aggregato da cava per tutte le tipologie d'impiego rappresenta sicuramente un grosso limite nel riciclo ma sarebbe pur sempre un inizio verso l'ingresso in un'economia circolare.

1.1 Obiettivi della sperimentazione

Per poter sostituire l'aggregato da cava con aggregato ottenuto dalla frantumazione di calcestruzzo dismesso è necessario valutare le caratteristiche del frantumato da riciclo e in che modo le proprietà meccaniche, fisiche e chimiche del calcestruzzo siano influenzate dall'utilizzo di materiale di seconda mano. In questo studio si andranno a realizzare diverse miscele di calcestruzzo con all'interno una frazione di aggregato da riciclo su aggregato da cava utilizzando frantumati provenienti da calcestruzzo tolto d'opera di provenienza e età differente. Non si terranno in considerazione le limitazioni imposte dalla tabella in figura 2 in quanto a percentuali massime di utilizzo e classe del

calcestruzzo in quanto s'ipotizza un utilizzo sia strutturale che non strutturale. Per poter valutare in maniera ottimale la variazione delle proprietà in base alla percentuale di aggregato da riciclo e all'età del calcestruzzo dismesso si manterranno invariati la tipologia e quantità di legante, la quantità e il tipo di additivo utilizzato, le tipologie degli aggregati da cava, la resistenza alla compressione teorica da considerare per la definizione del mix e il rapporto acqua/cemento.

Le miscele che si andranno a testare contengono frazioni di aggregato da riciclo su aggregato totale del 60 e del 100% e una miscela contenente solo materiale da cava per confrontare i risultati ottenuti. La classe di resistenza a compressione a ventotto giorni di stagionatura che si è scelto di progettare è la C50/60 MPa. Visto che per le prove di compressione si utilizzeranno provini cubici sarà necessario raggiungere la resistenza di 60 MPa per poter dire che la sostituzione di materiale da cava con frantumato di calcestruzzo sia possibile senza osservare una perdita prestazionale. La scelta della classe di resistenza elevata viene fatta nonostante la maggior parte dei prefabbricati in calcestruzzo ne richiedano una inferiore. La motivazione è legata al fatto che, se si ottenessero dei dati che dimostrano che l'utilizzo di materiale riciclato non provoca una diminuzione della resistenza del calcestruzzo anche nel caso in cui questo debba garantire elevati standard, allora si potrebbe ipotizzare di poter sostituire l'aggregato vergine con quello riciclato qualsiasi prestazione fosse richiesta.

Le classi di esposizione del calcestruzzo che si sceglie di considerare sono le più aggressive ^[5]: XC4, XD3, XS3, XF4 e XA3; che corrispondono ad un ambiente ciclicamente acquoso e secco, alla presenza di cloruri sia di origine marina che derivanti dalla presenza di agenti antigelo e a un ambiente chimico fortemente aggressivo. Scegliendo le classi di esposizione più stringenti dal punto di vista dei requisiti richiesti si ha la certezza che, se il calcestruzzo contenente materiale da riciclo raggiunge le performance richieste, possa essere utilizzato in qualsiasi ambiente.

1.2 Legante

Il legante che si sceglie di utilizzare è un cemento Portland, il CEM I 52.5R che permette di raggiungere la classe di resistenza desiderata in quanto garantisce un minimo 52.5 MPa di resistenza a compressione a ventotto giorni di stagionatura; R sta ad indicare il raggiungimento di una resistenza a due giorni di stagionatura maggiore rispetto al CEM I 52.5 (30 MPa contro 20 MPa) senza però alterare il comportamento sui lunghi periodi. La differenza nel comportamento dipende dalla finezza di macinazione, più il cemento risulta essere fine prima acquisirà resistenza meccanica.

Il cemento Portland viene prodotto partendo da una miscela di calcare ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) e argille ($x\text{Al}_2\text{O}_3 + y\text{SiO}_2 + z\text{H}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) che vengono macinati, preriscaldati e inseriti in forno rotante per il processo di cottura. Durante la fase di cottura si raggiungono temperature dell'ordine dei 1450°C portando alla formazione di una fase fluida che, una volta raffreddata e solidificata, porta all'ottenimento del clinker Portland. Durante il trattamento termico in forno avvengono diverse reazioni chimiche di cui le più importanti sono:

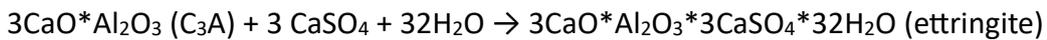
- 900 °C $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- 1000 – 1100 °C $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (C}_3\text{A)}$

- 1100 – 1200 °C $4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ (C₄AF)
- $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4$ (C₂S)
- 1300 – 1450 °C $3\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5$ (C₃S)

Dopo l'ottenimento del clinker Portland questo viene miscelato con gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in quantità del 3-5% come regolatore di presa; si procede con una macinazione.

Il legante è il componente attivo del calcestruzzo; quando entra in contatto con acqua avvengono delle reazioni d'idratazione dei componenti del cemento che portano alla precipitazione di cristalli idrati che tengono uniti gli aggregati inerti diminuendo la lavorabilità dell'impasto fino all'ottenimento di una massa solida. Il processo d'idratazione avviene a velocità differente per ciascun componente del cemento, in questo modo è possibile suddividere il tempo di acquisizione delle proprietà finali in due step; presa e indurimento. La durata di ciascuna fase dipende dalle frazioni che compongono il cemento.

Il processo di presa coinvolge la celite (C₃A) e la fase ferrica (C₄AF). In un tempo di circa un'ora si idratano e formano dei cristalli che, posizionandosi tra le particelle di cemento non ancora idratato, ne ostacolano i movimenti riducendo la plasticità della miscela. Il gesso macinato insieme al clinker ha come scopo il controllo del tempo di presa che altrimenti sarebbe troppo rapida e si correrebbe il rischio di perdere la plasticità prima del getto in opera. La presenza del gesso porta alla formazione di un tri-solfo-alluminato di calcio idrato aghiforme detto ettringite.



L'ettringite forma uno strato esterno ai grani di cemento rallentando l'idratazione per un tempo di un paio d'ore e portando ad un'espansione modesta della miscela di calcestruzzo. Dopo tale tempo l'ettringite si degrada e rende nuovamente facile l'interazione acqua cemento. È importante che l'ettringite non si formi in quantità eccessiva, altrimenti potrebbe degradare dopo l'indurimento del cemento generando tensioni nel calcestruzzo. Per questo motivo è necessario che la quantità di gesso che si mescola con il clinker non sia in eccesso.

La fase d'indurimento è molto lenta, dura anche mesi. Dal punto di vista sperimentale la valutazione della resistenza viene fatta dopo ventotto giorni dal getto in quanto il tempo risulta essere sufficiente al raggiungimento di un valore prossimo a quello definitivo. Le frazioni di cemento che prendono parte al processo d'indurimento sono alite (C₃S) e belite (C₂S). Dopo l'idratazione delle fasi di alite e belite si ha la precipitazione di composti amorfi con forma lamellare. Le lamelle si dispongono a raggiera intorno alle particelle di cemento e, man mano che crescono di dimensione, si intrecciano l'una con l'altra bloccando qualsiasi movimento reciproco. Un esempio del cambiamento della superficie delle particelle di cemento nei momenti di presa e indurimento è riportato in figura 3.

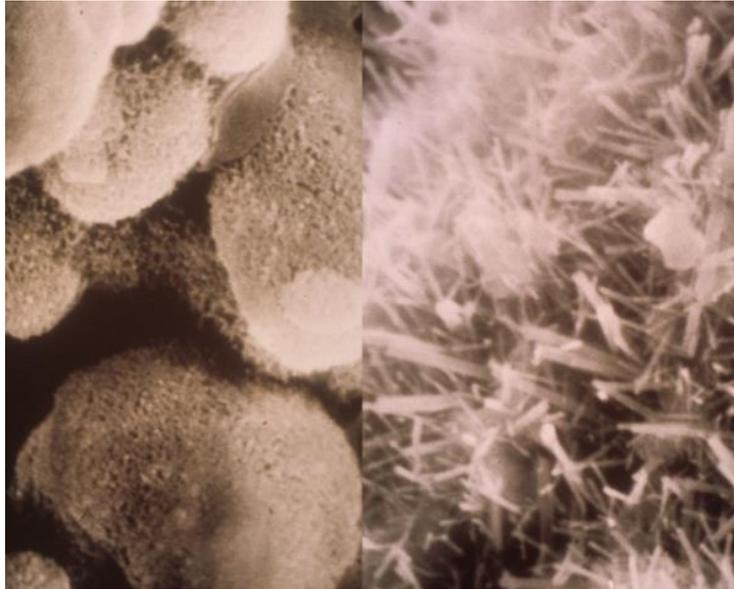


Figura 3 Pasta di cemento portland al momento della presa (a sinistra) e dell'indurimento (a destra) [10]

1.3 Aggregati

Gli aggregati costituiscono la frazione più importante dal punto di vista delle quantità all'interno del calcestruzzo. Sono costituiti da materiale inerte; a contatto con l'acqua, con la pasta di cemento o con possibili additivi non devono reagire. La loro funzione è principalmente quella di riempimento, permettendo un risparmio sulla quantità di cemento da utilizzare in quanto rappresenta la frazione costosa della miscela. La classificazione degli aggregati viene fatta in base alla dimensione; se il diametro massimo è inferiore ai quattro millimetri si parla di sabbia o di fine, se si trova sopra i quattro millimetri l'inerte prende il nome di grossolano. Per minimizzare la quantità di cemento nel calcestruzzo è necessario utilizzare aggregati di dimensioni differenti così che i fini si possano inserire all'interno dei vuoti lasciati liberi dai granuli più grossolani. In figura 4 si mostra il riempimento ideale di un volume utilizzando aggregati, ipotizzati come sfere perfette, aventi una sola distribuzione granulometrica (4a) e due distribuzioni granulometriche (4b). Risulta evidente che, nelle condizioni di impaccamento massimo, la quantità di cemento (in figura rappresentato in nero) risulti essere minore nel caso di utilizzo di due frazioni granulometriche.

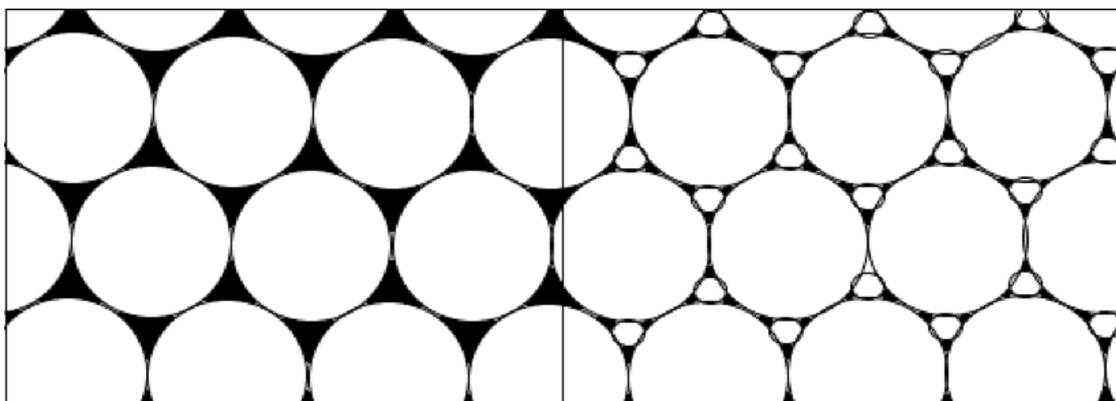


Figura 4 Riempimento ideale con aggregati aventi una sola grandezza a (s_x) e due grandezze b (dx)

Non tutti i materiali inerti disponibili sul mercato possono però essere utilizzati come aggregati all'interno del calcestruzzo. Secondo la normativa UNI 8520-1 ^[6] è possibile utilizzare solo materiali inerti che presentano delle specifiche caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche. Per esempio, un limite è imposto sulla presenza di cloruri che deve essere inferiore allo 0.05% ^[11] nel caso dell'utilizzo degli aggregati per la produzione di calcestruzzo armato. La motivazione è legata all'aggressività del cloro nei confronti delle armature metalliche che può portare all'insorgere di fenomeni di pitting e, di conseguenza, alla formazione di zone di concentrazioni degli sforzi con possibile danneggiamento della struttura a carichi più bassi di quelli di progetto. Il limite alla presenza di cloruri è legato esclusivamente alle strutture in calcestruzzo armato: se l'armatura non è presente la presenza di cloruri non risulta essere un problema. Dal punto di vista delle proprietà fisiche un limite importante riguarda l'assorbimento d'acqua. Più risulta essere elevato più si abbassa la classe di esposizione riferita alla resistenza gelo-disgelo. La motivazione è legata al fatto che più acqua viene assorbita dall'aggregato più sarà elevato l'aumento di volume legato al gelo del liquido e di conseguenza le tensioni generate all'interno del calcestruzzo. Se il calcestruzzo risulta essere soggetto a un numero elevato di periodi in cui si alterna la presenza di acqua allo stato liquido e solido è possibile che s'innescino fenomeni di fatica con conseguente formazione di cricche. Il fenomeno è tanto accentuato quanto più aumenta l'assorbimento d'acqua.

L'utilizzo di inerti che rispettino i requisiti descritti in normativa ^[6] è essenziale. Questo non solo per una mera questione legislativa, serve soprattutto per garantire un adeguato livello prestazionale al calcestruzzo e per garantire che le prestazioni siano conservate invariate per un tempo minimo prestabilito. Se queste condizioni non sono rispettate il rischio in cui si può incorrere è quello che si verifichino cedimenti delle strutture con conseguenze in alcuni casi anche catastrofiche.

1.4 Additivi

Esistono diverse tipologie di additivi per calcestruzzo, i più comuni sono: acceleranti, ritardanti e super-fluidificanti. Tutti gli additivi hanno la funzione di modificare una o più caratteristiche del calcestruzzo quando vengono inseriti in percentuali anche molto basse.

Gli acceleranti favoriscono l'idratazione del cemento, possono accorciare i tempi di presa favorendo l'idratazione di celite e fase ferrica (acceleranti di presa) oppure velocizzare l'indurimento facilitando l'idratazione di alite e belite (acceleranti d'indurimento). Gli acceleranti di presa sono composti principalmente da sali di silicato di sodio (Na_2SiO_3), possono portare a una diminuzione delle resistenze nei brevi periodi ma la resistenza meccanica a ventotto giorni di stagionatura non deve essere influenzata. Gli acceleranti d'indurimento storicamente erano composti principalmente da cloruro di calcio (CaCl_2), visti però gli effetti deleteri del cloro sulle armature sono stati sostituiti da altri sali quali per esempio la trietanolamina ($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$). L'impiego degli acceleranti d'indurimento porta ad un abbassamento della temperatura di congelamento dell'acqua e all'aumentano del calore d'idratazione del cemento senza modificare le resistenze sui lunghi periodi di stagionatura; vengono di conseguenza utilizzati solo per rendere più rapidi i processi di estrazione dalle casseforme o per compensare il rallentamento dell'idratazione causato dalle basse temperature invernali.

I ritardanti agiscono in maniera opposta agli acceleranti rendendo più lenta l'idratazione del cemento. Possono essere utilizzati per contrastare la diminuzione del tempo di presa causato da temperature elevate oppure quando il calcestruzzo viene confezionato in un luogo diverso da quello dove viene gettato. L'utilizzo dei ritardanti causa una diminuzione della resistenza alle basse stagionature senza però avere un'influenza negativa sui lunghi periodi.

Per questo studio non vengono richieste modifiche ai tempi di presa e indurimento del calcestruzzo, di conseguenza non si utilizzano né acceleranti né ritardanti. Si andrà ad utilizzare un solo tipo di additivo, un super-fluidificante, il MasterSure HES 1540 [11].

I super-fluidificanti sono composti da polimeri idrosolubili; ne esistono di diversi come, per esempio, poli-naftalin-solfonati e poli-carbossilati (come quello utilizzato) mostrati in figura 5.

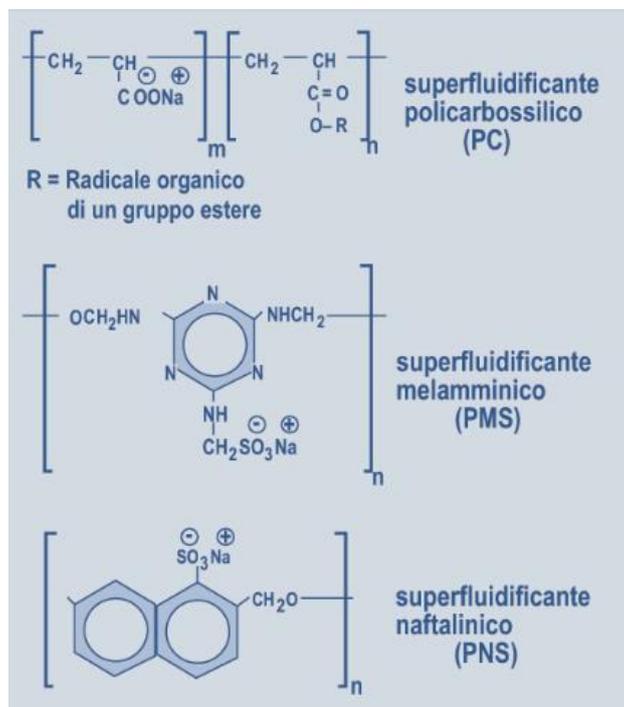


Figura 5 Esempi di polimeri utilizzati come super-fluidificanti [11]

Super-fluidificanti e fluidificanti agiscono allo stesso modo, separano le particelle di cemento. Quando il cemento, sotto forma di polvere, viene introdotto in acqua tende a formare dei flocculi che limitano i movimenti delle particelle a causa dell'ingombro. La presenza dei fluidificanti tende a rompere i flocculi e a disperdere le particelle in maniera più uniforme; in questo modo tutti i componenti in miscela presentano una maggiore libertà di movimento e l'impasto presenta un aspetto più fluido. I fluidificanti possono essere utilizzati in tre modalità: mantenendo la composizione del calcestruzzo, per diminuire la quantità d'acqua in miscela o per ridurre sia la quantità d'acqua che di cemento. È chiaro che risultano possibili anche utilizzi ibridi, in cui si sfruttano due modalità anche se in maniera inferiore.

Se si volesse aumentare la lavorabilità del calcestruzzo mantenendone la composizione si andrebbe a sfruttare semplicemente l'effetto disperdente. In figura 6 viene mostrato un esempio di comportamento della pasta di cemento senza (6a) e con l'aggiunta di un 1% di super-fluidificante (6b).

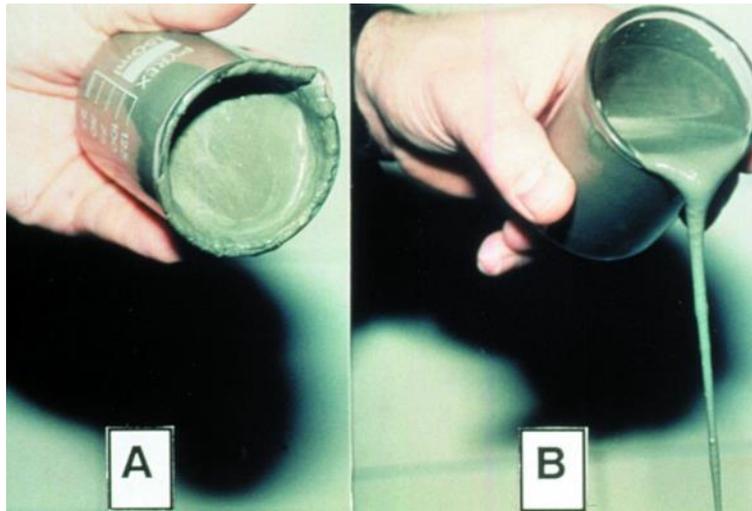


Figura 6 Comportamento di una pasta di cemento senza (a) e con (b) l'aggiunta di un super-fluidificante [11]

Utilizzare un impasto fluido presenta principalmente un vantaggio, rende il getto omogeneo. Un problema fondamentale dell'utilizzare un impasto molto viscoso è che, nel momento in cui viene introdotto nella cassaforma, è complicato ottenere un grado di compattazione elevato; si corre il rischio di ottenere un'elevata quantità di aria inglobata che porta ad una diminuzione delle proprietà meccaniche. Inoltre, nel caso in cui si debba fare più di un getto con lo stesso impasto si corre anche il rischio di ottenere compattazioni differenti. Di contro, la presenza di un fluidificante rende il fenomeno della segregazione più importante. Per evitare una segregazione eccessiva è comunque possibile aumentare la quantità di sabbia e diminuire quella di aggregato più grossolano.

I super-fluidificanti possono essere utilizzati come riduttori di acqua. In questo caso viene mantenuta la lavorabilità dell'impasto e la quantità di cemento che viene introdotta. La diminuzione della quantità di acqua inserita ha come risultato un aumento della resistenza a compressione. È quindi possibile sfruttare questo effetto per ottenere un calcestruzzo con classe di resistenza molto elevata senza rischiare che un impasto troppo viscoso provochi una grande quantità di aria inglobata e il rischio di non ottenere un riempimento completo della cassaforma.

L'ultima modalità di utilizzo permette una diminuzione della quantità di cemento da introdurre nell'impasto e di conseguenza di ottenere un risparmio economico. Riducendo la quantità di cemento di norma si osserva una diminuzione della resistenza a compressione del calcestruzzo ma, diminuendo anche la quantità di acqua, si mantiene il rapporto acqua/cemento (fattore che determina la resistenza del calcestruzzo). La diminuzione della quantità di acqua porterebbe però ad una diminuzione della lavorabilità; la presenza del fluidificante ne contrastarne l'effetto. La diminuzione della quantità di cemento in miscela presenta, oltre al risparmio economico, due ulteriori vantaggi; permette di ottenere un minor sviluppo di calore a cui consegue un minor rischio di stress termici e porta a una diminuzione del ritiro del calcestruzzo.

2. Parte sperimentale

Lo studio si divide in due parti; la prima consiste nella valutazione delle caratteristiche degli aggregati riciclati per verificarne la conformità alla UNI EN 12620 ^[7] (le caratteristiche richieste vengono riassunte e schematizzate nella UNI 8520-1 ^[6]) e il possibile utilizzo come inerte, la seconda verte sulla preparazione delle miscele di calcestruzzo e la valutazione delle proprietà meccaniche raggiunte.

Oltre agli aggregati da riciclo si utilizzano anche aggregati da cava come una sabbia calcarea avente frazione 0-4 mm (da questo momento in poi denominata NF1) e due frazioni grosse di basalto di classe granulometrica 6.3-12.5 mm G_c80/20 e 8-16 mm G_c80/20 (da questo momento in poi denominate rispettivamente NG1 e NG2). Tutti e tre gli aggregati naturali presentano conformità alla normativa ^[6] certificata al momento dell'acquisto; quindi, vengono valutate solo le caratteristiche necessarie alla definizione del mix design.

Gli aggregati di cui si vuole studiare l'influenza sulle proprietà del calcestruzzo derivano dalla frantumazione di traverse ferroviarie in calcestruzzo armato. La frantumazione è stata realizzata attraverso un processo in due step; in primo luogo, avviene una macinazione a mascella a cui fa seguito una macinazione a martelli. Dopo la prima macinazione avviene una vagliatura che permette la separazione del materiale in due gruppi; il trattenuto al setaccio viene convogliato ad un mulino a martelli per la realizzazione della frazione 4-20 mm, il passante subisce una macinazione a martelli spinta per la realizzazione della frazione 0-4 mm. Durante il processo di macinazione delle traverse deve essere rimossa l'armatura per evitare la presenza di ferro che potrebbe ossidare e, espandendo, generare tensioni interne al nuovo calcestruzzo prodotto; per farlo si utilizzano dei nastri magnetici. La macinazione a martelli garantisce l'ottenimento di aggregato dalla geometria che, per quanto non possa essere tondeggiante, non presenta indici di forma elevati che potrebbero causare concentrazioni degli sforzi. Durante la macinazione non si ottiene una separazione degli aggregati dalla pasta cementizia; la rottura delle traverse avviene indistintamente internamente agli aggregati, all'interno del cemento e all'interfaccia. Un esempio di macinato così ottenuto viene riportato in figura 7. La frazione fine viene utilizzata come esce dal frantoio, la frazione grossa subisce un ulteriore processo di vagliatura per ottenere le frazioni desiderate.



Figura 7 Aspetto degli aggregati da traverse ferroviarie

Le traverse che vengono frantumate provengono da diversi produttori e sono state tutte gettate dopo l'anno 1985 in modo da presentare conformità con la specifica tecnica dell'epoca che oggi corrisponderebbe alla RFI TCAR SF AR 03 002 F ^[8]; in questo modo si garantisce la tracciabilità dei materiali utilizzati. Nello specifico si è scelto di utilizzare traverse prodotte in sei anni diversi da tre diversi produttori come indicato in tabella 1.

	Produttore	Anno
Frantumato A	Vianini	1987
Frantumato B	Vianini	1999
Frantumato C	Lodovichi	2000
Frantumato D	Vianini	2009
Frantumato E	Vianini	2017-2018
Frantumato F	Overail	2019-2022

Tabella 1 Tipologie di traverse utilizzate per l'ottenimento di frantumato da riciclo

Si è scelto di realizzare le stesse frazioni granulometriche dell'aggregato da cava; di conseguenza per ogni tipologia di frantumato si sono ottenute tre frazioni di cui una fine 0-4 mm (da questo momento in poi denominata RXF2 dove X indica la lettera di denominazione del frantumato come in tabella 1) e due grosse 6.2-12.5 mm e 8-16 mm (da questo momento in poi denominate rispettivamente RXG3 e RXG4 dove X indica la lettera di denominazione del frantumato come in tabella 1).

2.1 Analisi aggregato

Nel prospetto 1 della EN 12620 ^[6] è indicato un numero elevato di requisiti che l'aggregato da utilizzare nella produzione di calcestruzzo deve possedere. Tenendo conto della provenienza del materiale e dell'utilizzo a cui è destinato si è scelto di non effettuare la totalità delle prove in quanto, alcune, sono state ritenute superflue in fase di sperimentazione e necessarie solo in caso di reale utilizzo del materiale in prodotti destinati alla vendita. In tabella 2 vengono riportate le prove definite dal suddetto prospetto e la motivazione sulla scelta dell'effettuazione o dell'esclusione da quelle definite per valutare che i frantumati, indipendentemente dall'anno e dal produttore della traversa da cui derivano, rientrino nei limiti previsti per l'utilizzo. Le prove che vengono ritenute significative non vengono effettuate su tutte le frazioni granulometriche, ma solo su quelle richieste secondo quanto riportato in normativa ^[6]. Per l'aggregato da cava si riportano esclusivamente i risultati necessari alla definizione delle miscele di calcestruzzo.

Nome prova	Effettuazione	Motivazione
Designazione dimensionale	Si	Necessarie per la definizione del Mix-design
Granulometria	Si	
Modulo di finezza	No	Da effettuare solo su richiesta ^[1]
Indice di appiattimento	No	Si presuppone di non avere dei carichi applicati che possano far appiattire gli aggregati ^[2]
Indice di forma	No	Data la provenienza da materiale frantumato si presuppone una forma irregolare ^[2]
Massa volumica dei granuli a superficie asciutta	Si	Necessarie per la definizione del Mix-design
Massa volumica in mucchio	Si	
Massa volumica del filler	No	Da effettuare solo su filler ^[1]
Contenuto di fini	Si	Potrebbero causare un aumento dell'assorbimento d'acqua
Equivalente in sabbia	No	Si presuppone non sia presente argilla ^[2]
Valore del blu di metilene	No	
Contenuto di conchiglie	No	Da effettuare solo su aggregati di provenienza marina ^[1]
Resistenza alla frammentazione	SI	Da effettuare per calcestruzzi ad elevata resistenza
Prova d'urto	No	Equivale al test precedente
Resistenza alla levigabilità	No	Necessarie solo per strati d'usura ^[1]
Resistenza all'abrasione superficiale	No	
Resistenza all'usura Micro Deval	No	
Descrizione petrografica	No	Si è già a conoscenza della composizione degli aggregati ^[2]
Classificazione degli aggregati grossi riciclati	No	

Nome prova	Effettuazione	Motivazione
Contenuto di cloruri solubili in acqua	No	Essendo il frantumato costituito da materiale conforme a una normativa che regola le caratteristiche composizionali si presuppone che tali valori rientrino già nei limiti richiesti ^[2]
Contenuto di cloruri solubili in acido	No	
Contenuto di solfati solubili in acido	No	
Contenuto di zolfo totale	No	
Contenuto di solfati solubili in acqua	No	
Componenti che alterano la velocità di presa e indurimento del calcestruzzo	Si	Si ipotizzano possibili contaminazioni dovute all'ambiente di lavoro delle traverse
Impurezze organiche leggere	Si	
Influenza sul tempo di inizio e presa del cemento	Si	Da effettuare su aggregati riciclati
Contenuto di carbonato di calcio	No	Da effettuare per strati di usura ^[1]
Stabilità di volume	No	Da effettuare se si verifica fessurazione per ritiro disgregativo causato dall'aggregato ^[1]
Disintegrazione del silicato di calcio	No	Solo per scorie d'altoforno e di acciaieria ad arco elettrico ^[1]
Disintegrazione del ferro	No	
Espansione delle scorie di acciaieria	No	
Assorbimento d'acqua	Si	Necessario per la definizione del Mix-design
Emissione di radioattività	No	Da effettuare secondo legislazione vigente sul luogo d'impiego ^[1]
Rilascio di metalli pesanti	No	
Rilascio idrocarburi	No	
Rilascio altre sostanze pericolose	No	
Resistenza gelo e disgelo	Si	Si ipotizza di utilizzare il calcestruzzo anche in ambienti soggetti a gelo disgelo
Resistenza all'effetto del solfato di magnesio	Si	
Resistenza gelo/disgelo in presenza di sale	Si	
Resistenza all'abrasione da pneumatici chiodati	No	Solo per strati di usura ^[1]
Reattività alcali - silice	No	Essendo il frantumato costituito da materiale conforme a una normativa si presuppone che tali valori rientrino già nei limiti ^[2]
[1] come riportato da normativa		
[2] Esclusione fatta valutando provenienza e utilizzo del materiale		

Tabella 2 Motivazione delle scelte di esclusione o effettuazione delle prove necessarie per l'utilizzo dell'aggregato per il confezionamento di calcestruzzo

2.1.1 Quantità, assorbimento d'acqua e massa volumica

I valori della quantità d'acqua presente, dell'assorbimento e della massa volumica dei granuli a superficie asciutta vengono ottenuti attraverso delle misure sperimentali effettuate seguendo le direttive presenti all'interno della normativa UNI EN 1097-6 [9]. La normativa prevede l'effettuazione di diverse pesate del campione da analizzare; m_1 si ottiene pesando il campione prima d'immergerlo in acqua, m_2 dopo aver lasciato l'aggregato a bagno in acqua per ventiquattro ore a 22° circa e aver asciugato la superficie con carta assorbente o, nel caso del materiale fine, con un soffio leggero di aria calda; infine, m_3 si ottiene dopo essiccamento del campione in stufa a 110°C circa. Per poter immergere l'aggregato in acqua è necessario un picnometro; questo deve essere pesato con all'interno l'aggregato e riempito fino all'orlo d'acqua dopo le 24 ore di assorbimento registrando la massa m_4 e pieno fino all'orlo di sola acqua (m_5). Si applicano poi le equazioni 1, 2 e 3 per ottenere i valori ricercati.

$$WA_{24} = \frac{m_2 - m_3}{m_3} * 100 \quad [1]$$

$$Qta_{H_2O} = \frac{m_1 - m_3}{m_3} * 100 \quad [2]$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{m_2}{m_2 - (m_4 - m_5)} \quad [3]$$

Dove:

WA_{24} è la quantità d'acqua assorbita espressa in percentuale

Qta_{H_2O} è la quantità d'acqua presente nel campione espressa in percentuale

ρ_{ssd} è la massa volumica dei granuli a superficie asciutta in Mg/m³

ρ_w è la massa volumica dell'acqua in Mg/m³

m_1 è la massa del campione umido espressa in kg

m_2 è la massa del campione saturo a superficie asciutta espressa in kg

m_3 è la massa del campione essiccato espressa in kg

m_4 è la massa del picnometro contenente il campione saturo e riempito di acqua espresso in kg

m_5 è la massa del picnometro riempito di acqua espresso in kg

I dati ottenuti per ciascun aggregato vengono riportati in tabella 3.

Tipologia aggregato	Qta _{H2O} %	WA ₂₄ %	ρ_{ssd} [Mg/m ³]
NF1	1.3 ± 0.1	2.2 ± 0.2	2.64 ± 0.02
RAF2	4.2 ± 0.1	6.6 ± 0.2	2.64 ± 0.02
RBF2	5.5 ± 0.1	6.5 ± 0.2	2.65 ± 0.02
RCF2	6.4 ± 0.1		
RDF2	5.2 ± 0.1	6.8 ± 0.2	2.63 ± 0.02
REF2	5.1 ± 0.1		
RFF2	5.8 ± 0.1	7.5 ± 0.2	2.66 ± 0.02
NG1	2.2 ± 0.1	2.0 ± 0.2	2.81 ± 0.02
NG2	2.0 ± 0.1	1.8 ± 0.2	2.79 ± 0.02
RAG3	3.1 ± 0.1	2.4 ± 0.2	2.66 ± 0.02
RAG4	3.5 ± 0.1	2.1 ± 0.2	2.67 ± 0.02
RBG3	4.3 ± 0.1	2.5 ± 0.2	2.65 ± 0.02
RBG4	4.4 ± 0.1	2.3 ± 0.2	2.67 ± 0.02
RCG3	4.2 ± 0.1		
RCG4	4.8 ± 0.1		
RDG3	3.9 ± 0.1	2.4 ± 0.2	2.64 ± 0.02
RDG4	4.2 ± 0.1	2.2 ± 0.2	2.66 ± 0.02
REG3	4.0 ± 0.1		
REG4	4.2 ± 0.1		
RFG3	3.8 ± 0.1	2.9 ± 0.2	2.66 ± 0.02
RFG4	3.9 ± 0.1	2.5 ± 0.2	2.70 ± 0.02

Tabella 3 Quantità d'acqua presente e assorbimento d'acqua a superficie asciutta per ogni tipologia di aggregato utilizzato

Secondo la normativa UNI 8520-2 ^[10] esistono dei limiti sia per l'assorbimento d'acqua sia per la massa volumica dei granuli saturi a superficie asciutta che rendono accettabile l'utilizzo degli aggregati. Per aggregati grossi l'assorbimento d'acqua deve essere inferiore all'uno per cento; se il valore viene superato sarà necessario dichiarare la classe di resistenza al gelo secondo la normativa UNI EN 1367-1 ^[11]. Non viene invece indicato un limite per l'aggregato fine. Per il limite sulla massa volumica degli aggregati fini non esiste una specificazione per materiale riciclato; si potrebbe ipotizzare di considerare il minimo richiesto come quello del naturale che risulterebbe $\rho_{ssd} \geq 2300$ kg/m³. Dato che nella UNI 8520-2 ^[10] non è specificato il valore minimo necessario tutti gli aggregati fini vengono ritenuti utilizzabili indipendentemente dal valore di massa volumica a superficie asciutta ottenuto sperimentalmente. Per aggregati riciclati grossi viene specificato solo il valore minimo della massa volumica dei granuli essiccati in stufa (ρ_{rd}), calcolato secondo l'equazione 4. È possibile suddividere questi aggregati in due gruppi, di tipo A e di tipo B; per il tipo A è necessario un valore maggiore uguale di 2100 kg/m³, mentre per il tipo B deve essere maggiore uguale di 1700 kg/m³.

$$\rho_{rd} = \frac{\rho_{ssd}}{1 + \frac{WA_{24}}{100}} \quad [4]$$

Dove:

ρ_{rd} è la massa volumica dei granuli essiccati in stufa espresso in kg/m^3

ρ_{ssd} è la massa volumica dei granuli a superficie satura asciutta espressa in kg/m^3

WA_{24} è l'assorbimento d'acqua espresso in percentuale

In tabella 4 si riportano i valori di ρ_{rd} e la classificazione dell'aggregato in tipo A o B in base alla massa volumica per gli aggregati grossi. Sempre per gli aggregati grossi si riporta la classe di resistenza al gelo/disgelo nei casi in cui l'assorbimento d'acqua risulta essere maggiore dell'uno per cento. Non viene specificato cosa comporti un utilizzo di aggregati facenti parti del gruppo A o B; quindi, si andranno a utilizzare tutti gli aggregati che rientrano in uno dei due gruppi, scartando solo quelli che risultano avere un ρ_{rd} inferiore a 1700 kg/m^3 .

Tipologia aggregato	Classe resistenza gelo/disgelo associata	ρ_{rd} [kg/m^3]	ρ_{rd}
RAG3	F ₆	$(2.60 \pm 0.02) * 10^3$	A
RAG4	F ₅	$(2.60 \pm 0.02) * 10^3$	A
RBG3	F ₅	$(2.59 \pm 0.02) * 10^3$	A
RBG4	F ₅	$(2.61 \pm 0.02) * 10^3$	A
RCG3			
RCG4			
RDG3	F ₅	$(2.58 \pm 0.02) * 10^3$	A
RDG4	F ₅	$(2.60 \pm 0.02) * 10^3$	A
REG3			
REG4			
RFG3		$(2.59 \pm 0.02) * 10^3$	A
RFG4		$(2.64 \pm 0.02) * 10^3$	A

Tabella 4 Conformità per valori di assorbimento d'acqua e massa volumica degli aggregati riciclati grossi

Facendo riferimento ai dati che si hanno a disposizione è possibile notare come le masse volumiche degli aggregati grossi riciclati siano leggermente più basse rispetto a quelle degli aggregati naturali, di conseguenza si ipotizza di ottenere dei valori di massa volumica del calcestruzzo contenete aggregati riciclati più bassa rispetto alla miscela di confronto. Tutti gli aggregati risultano comunque utilizzabili per la realizzazione di calcestruzzo, resta da verificare se possano essere utilizzati per la realizzazione di calcestruzzo con la classe di resistenza al gelo/disgelo richiesta.

Gli assorbimenti degli aggregati riciclati, soprattutto per quanto riguarda i fini, sono notevolmente più elevati rispetto agli aggregati da cava. Il risultato era prevedibile data la presenza di pasta di cemento indurita. Dai risultati ottenuti risulta che gli aggregati grossi siano soprasaturi, ma alla vista l'aspetto risulta essere asciutto e polveroso. È possibile ipotizzare un errore nel dato di assorbimento in quanto la misura del contenuto d'acqua è stata ripetuta due volte a causa dell'incongruenza dei dati. La presenza di un dato di assorbimento sbagliato porta ad un errore nella definizione delle

miscele. Non si ha la possibilità di ripetere la prova di assorbimento in tempi utili ma, tenendo conto del risultato, si ipotizza la possibilità di aggiungere una piccola quantità d'acqua all'impasto nel caso questo risulti non lavorabile e di verificare il rapporto acqua cemento attraverso l'analisi sul fresco. In alternativa all'aggiunta di acqua è possibile procedere con un aumento della quantità di superfluidificante.

I valori di massa volumica degli aggregati riciclati sia essiccati che a superficie satura asciutta sono confrontabili tra loro. Fare una valutazione sugli assorbimenti risulta essere complicata vista l'incertezza dei dati in tabella 3. Ipotizzando che durante la prova di assorbimento si sia verificato un errore sistematico si potrebbe ipotizzare che i valori ottenuti si scostino dal valore reale in maniera eguale. Se questa ipotesi dovesse confermarsi si potrebbe pensare di utilizzare gli aggregati delle tipologie da A ad E insieme; probabilmente gli aggregati C ed E presentano dei valori simili agli aggregati A, B e D essendo composti da inerti calcarei. Gli aggregati di tipo F presentano degli assorbimenti più elevati rispetto agli altri e troppo differenti per pensare di utilizzarli in miscela senza tenere conto della maggior quantità di acqua assorbita.

Per la determinazione della massa volumica in mucchio si fa riferimento alla procedura riportata nella UNI EN 1097-3^[12]. La procedura inizia con l'essiccazione in stufa dell'aggregato. Si pesa il contenitore vuoto e si registra il dato come m_1 e lo si riempie fino all'orlo con l'aggregato essiccato. Si livella la superficie con una riga per rimuovere l'aggregato in eccesso facendo attenzione a non compattarlo e si procede a pesare il contenitore pieno, registrando la massa come m_2 . Si effettua il procedimento tre volte e si utilizza la media delle masse ottenute come valore da inserire nell'equazione 5.

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [5]$$

Dove:

ρ_b è la massa volumica in mucchio espressa in kg/m^3

V corrisponde al volume del recipiente che è $7.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

m_1 è la massa del contenitore espressa in kg

m_2 è la massa del contenitore riempito di aggregato espresso in kg

Da normativa^[10] non è specificato un limite minimo o massimo per il valore della massa volumica in mucchio, di conseguenza si riportano semplicemente i risultati ottenuti dalle pesate e della massa volumica in mucchio in tabella 5.

Tipologia aggregato	$m_2 - m_1$ medio [kg]	ρ_b [kg/m^3]
RAF2	0.938 ± 0.002	$(1.20 \pm 0.01) \cdot 10^3$
RBF2		
RCF2	0.940 ± 0.002	$(1.20 \pm 0.01) \cdot 10^3$
RDF2		

Tipologia aggregato	$m_2 - m_1$ medio [kg]	ρ_b [kg/m ³]
REF2		
RFF2		
RAG3	0.865 ± 0.002	$(1.10 \pm 0.01) * 10^3$
RAG4	0.837 ± 0.002	$(1.07 \pm 0.01) * 10^3$
RBG3		
RBG4		
RCG3	0.872 ± 0.002	$(1.11 \pm 0.01) * 10^3$
RCG4	0.844 ± 0.002	$(1.08 \pm 0.01) * 10^3$
RDG3		
RDG4		
REG3		
REG4		
RFG3		
RFG4		

Tabella 5 Valori della massa volumica in mucchio degli aggregati

Confrontando i valori ottenuti per la massa volumica in mucchio degli aggregati è possibile notare che, come per la massa volumica dei granuli essiccati in stufa, tutti gli aggregati siano caratterizzati da valori confrontabili.

2.1.2 Distribuzioni granulometriche e contenuto di fini

Le distribuzioni granulometriche si ottengono utilizzando diversi setacci, disposti ad aperture decrescenti, impilati e posizionati su una struttura che li metta in vibrazione, come in figura 8. Gli aggregati devono essere essiccati, pesati e poi immersi per ventiquattr'ore in acqua così da ottenere una completa separazione dei grumi. Si inumidisce poi un setaccio con apertura 0.063 mm sopra il quale si posiziona un setaccio da 2 o 1 mm per evitare che aggregati di grossa dimensione danneggino il setaccio ad apertura minore. Si versa la sospensione di aggregati in acqua sul setaccio ad apertura maggiore e si lava fino a quando l'acqua passante non risulta limpida. Dopodiché si essicca il trattenuto dal setaccio da 0.063 mm insieme al trattenuto dal setaccio di protezione. A essiccazione avvenuta si pesa la frazione trattenuta e poi la si versa sulla colonna di setacci posizionati ad apertura decrescente e, attraverso delle vibrazioni meccaniche, si ottiene una separazione del campione. L'analisi viene effettuata seguendo la normativa UNI EN 933-1^[13]. Le aperture dei setacci a disposizione per l'analisi sono (in mm): 20, 16, 14, 12.5, 10, 8, 6.3, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 e 0.063.



Figura 8 Struttura vibrante per la costruzione delle curve granulometriche

A setacciatura finita si effettuano le pesate dei trattenuti a ciascun setaccio. Il materiale trattenuto dal setaccio a maglia maggiore corrisponde a R_1 , quello passante dal primo setaccio ma trattenuto dal secondo viene sommato a R_1 e registrato come R_2 e così via fino alla registrazione di R_n che corrisponde alla somma di tutto il materiale trattenuto dai setacci. Se il setaccio a maglia inferiore utilizzato ha apertura di 0.063 mm e si ottiene del materiale passante questo viene registrato come P.

Si procede con il calcolo dei fini utilizzando l'equazione 6.

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 \quad [6]$$

Dove:

f è la quantità di fini espressa in percentuale

M_1 è la massa essiccata della porzione di prova in kg

M_2 è la massa essiccata del residuo trattenuto sul setaccio da 0.063 in kg

P è la massa del materiale vagliato che rimane nel recipiente di fondo in kg

In alternativa è possibile effettuare una misurazione dei fini senza passare per lavaggio e immersione in acqua per ventiquattr'ore. In questo caso si essicca il campione in stufa e si procede direttamente alla setacciatura; la quantità di fini viene calcolata con l'equazione 7.

$$f = \frac{100 \cdot P}{M_1} \quad [7]$$

Ovviamente in caso di setacciatura a secco risulta necessario che il setaccio a maglia inferiore abbia aperture di 0.063 mm. Procedendo con setacciatura a secco si potrebbe incorrere nel rischio di non riuscire a separare perfettamente le frazioni più fini che potrebbero restare adese a granuli più grossolani.

La quantità di fini presenti all'interno dell'aggregato presenta un limite massimo ammissibile (dalla UNI 8520-2 ^[10]); in figura 9 si riporta il prospetto di tale norma che ne riporta i massimali.

Limiti ammissibili per il contenuto in fini (polveri)

	Tipo di aggregato	Categoria EN	Tenore massimo in fini %
Aggregato grosso	Non frantumato o frantumato da depositi alluvionali	$\leq f_{1,5}$	1,5 ^{a)}
	Frantumato da roccia	$\leq f_4$	4
Aggregato fine (sabbia)	Non frantumato	$\leq f_3$	3
	Frantumato da depositi alluvionali	$\leq f_{10}$	10
	Frantumato da roccia di banchi omogenei	$\leq f_{16}$	16
Misto naturale 0/8	Non frantumato o frantumato da depositi alluvionali	$\leq f_3$	3
Aggregato in frazione unica (misto) 0/D	Non frantumato o frantumato da depositi alluvionali	$\leq f_3$	3
	Frantumato da roccia	$\leq f_{11}$	11
a) Si raccomanda un contenuto effettivo di fini non maggiore dello 0,5%.			

Figura 9 Limiti ammissibili del contenuto di fini ^[10]

È possibile vedere come, dalla classificazione in figura 9, non si parli di aggregati con provenienza da riciclo o disomogenei; per cui non è possibile affermare se i valori ottenuti rientrano nei limiti richiesti in modo certo. È però possibile ipotizzare di assimilare il materiale da riciclo ad una tipologia di frantumato e, di conseguenza, dire che per aggregati fini il limite massimo accettabile sia una percentuale inferiore del 10% in quanto il materiale non risulta essere omogeneo e per aggregato grosso inferiore del 4%. Vista però l'assenza di una specificazione per il materiale riciclato anche in caso di non conformità ai limiti definiti il materiale verrà comunque ritenuto utilizzabile per la realizzazione delle miscele di calcestruzzo.

Nel caso i valori di fini risultassero essere molto maggiori del limite definito si potrebbe pensare di effettuare una vagliatura prima dell'inserimento in miscela per rimuovere la maggior parte della polvere. I valori ottenuti dalle misurazioni sperimentali attraverso vagliatura a secco vengono riportati in tabella 6.

Per l'aggregato da cava non viene riportata la conformità in quanto non era un valore da confermare, si riporta semplicemente il valore per confronto con il riciclato.

Frantumato	Valore ottenuto [%]	Conformità ipotizzata
NF1	2.2 ± 0.01 (certificato il 9%)	
RAF2	1.22 ± 0.01	Conforme
RBF2	3.49 ± 0.01	Conforme
RCF2	0.72 ± 0.01	Conforme
RDF2	1.50 ± 0.01	Conforme
REF2	0.81 ± 0.01	Conforme
RFF2	1.34 ± 0.01	Conforme
NG1	0.5 ± 0.01	
NG2	0.5 ± 0.01	
RAG3	0.04 ± 0.01	Conforme
RAG4	0.02 ± 0.01	Conforme
RBG3	0.12 ± 0.01	Conforme
RBG4	0.04 ± 0.01	Conforme
RCG3	0.13 ± 0.01	Conforme
RCG4	0.04 ± 0.01	Conforme
RDG3	0.04 ± 0.01	Conforme
RDG4	0 ± 0.01	Conforme
REG3	0.08 ± 0.01	Conforme
REG4	0.04 ± 0.01	Conforme
RFG3	0.04 ± 0.01	Conforme
RFG4	0.02 ± 0.01	Conforme

Tabella 6 Valori di contenuto di fini nei frantumati

Dai dati ottenuti è possibile notare che l'aggregato riciclato presenta delle percentuali di fini inferiori rispetto all'aggregato da cava. Il risultato non risulta essere inaspettato per l'aggregato grosso, ma lo è per il fine. Dato che dal frantoio si ottiene la frazione 4-20 mm e che per ottenere le due frazioni grosse utilizzate è necessario effettuare una seconda vagliatura; durante questa fase il fine viene rimosso quasi completamente. Per il materiale fine ci si sarebbe potuta aspettare una percentuale più elevata rispetto al materiale da cava dato che, durante il processo di macinazione, tutto il materiale che presenta un diametro minore di 4 mm dovrebbe essere convogliato verso la zona di accumulo della frazione 0-4 mm. Essendo però avvenuta una macinazione all'aperto è anche possibile che la parte più fine del frantumato sia stata allontanata dal vento nonostante l'aspetto del materiale fosse leggermente umido e quindi, almeno teoricamente, avrebbe dovuto essere trattenuto. L'unico campione di sabbia riciclata che presenta una percentuale di fini maggiore di quella da cava (solo del valore riscontrato, non di quello certificato) è la B; è possibile che le traverse di tipo B presentino una maggior tendenza alla frantumazione.

Il fatto che le percentuali di fini negli aggregati da riciclo siano più basse che negli aggregati da cava potrebbe portare a diminuzioni della lavorabilità degli impasti e, di conseguenza, all'impossibilità di utilizzare dei rapporti acqua cemento bassi.

Si nota inoltre come il valore di percentuale di fini della sabbia da cava ottenuto sperimentalmente sia molto più basso rispetto a quanto viene certificato dal produttore ma comunque più elevato rispetto alla quasi totalità degli aggregati fini riciclati. Per la definizione delle miscele di calcestruzzo

si utilizzerà il valore di 2.2% in quanto questo non porta a grossi errori nella determinazione delle curve di miscela.

Dopo aver acquisito tutti i valori delle masse dei trattenuti dai setacci è possibile costruire le curve di distribuzione granulometrica. In figura 10 si riportano le distribuzioni granulometriche degli aggregati da cava NF1, NG1 e NG2; mentre nei grafici in figure dalla 11 alla 16 si riportano le distribuzioni granulometriche degli aggregati da riciclo rispettivamente dal frantumato A al frantumato F. In appendice A si riportano i dati ottenuti dalla setacciatura e utilizzati per la costruzione delle curve granulometriche.

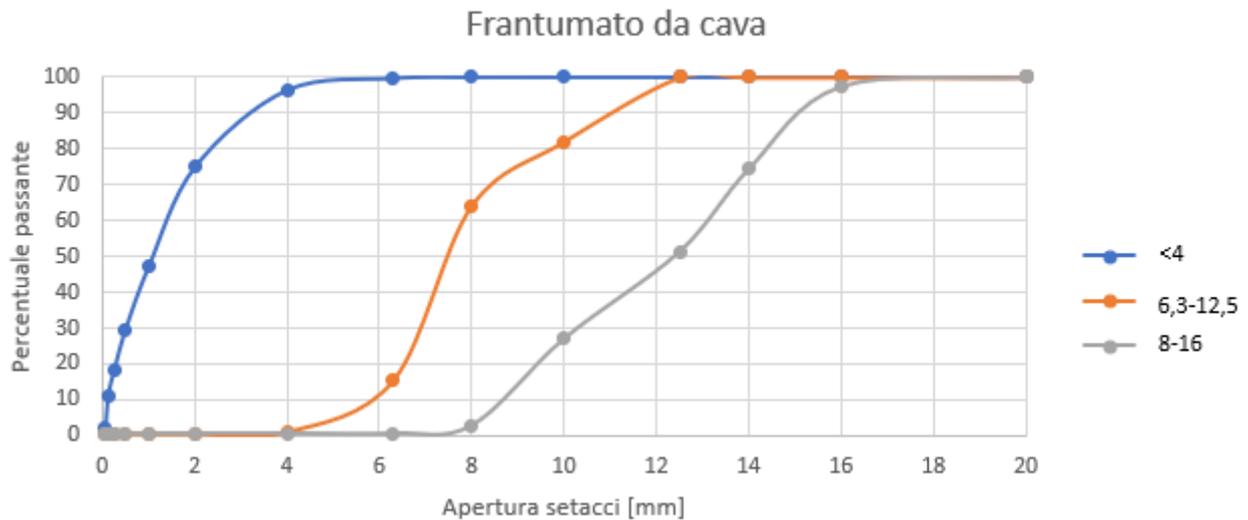


Figura 10 Distribuzioni granulometriche degli aggregati da cava

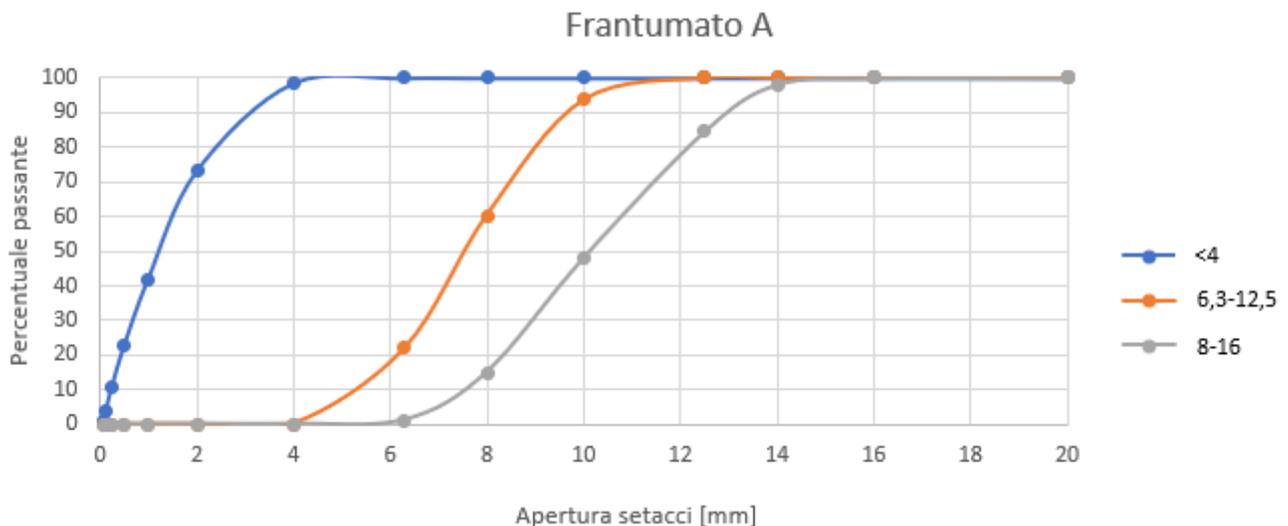


Figura 11 Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse A

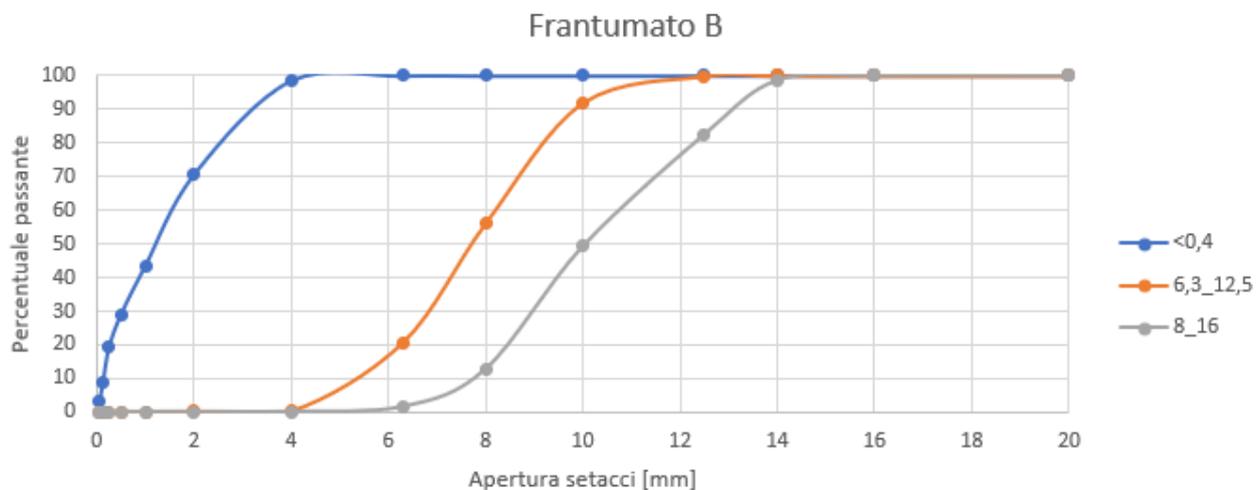


Figura 12 Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse B

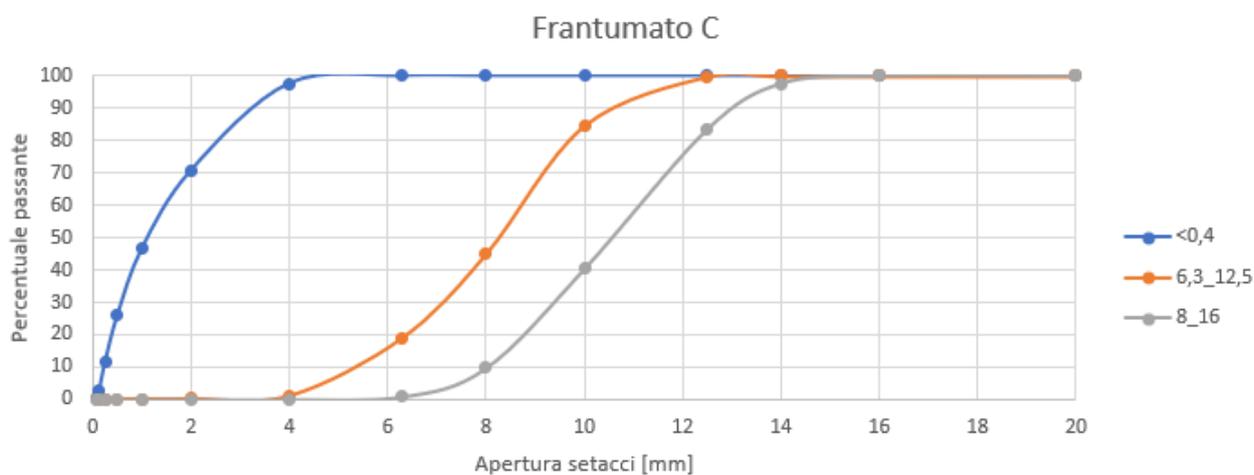


Figura 13 Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse C

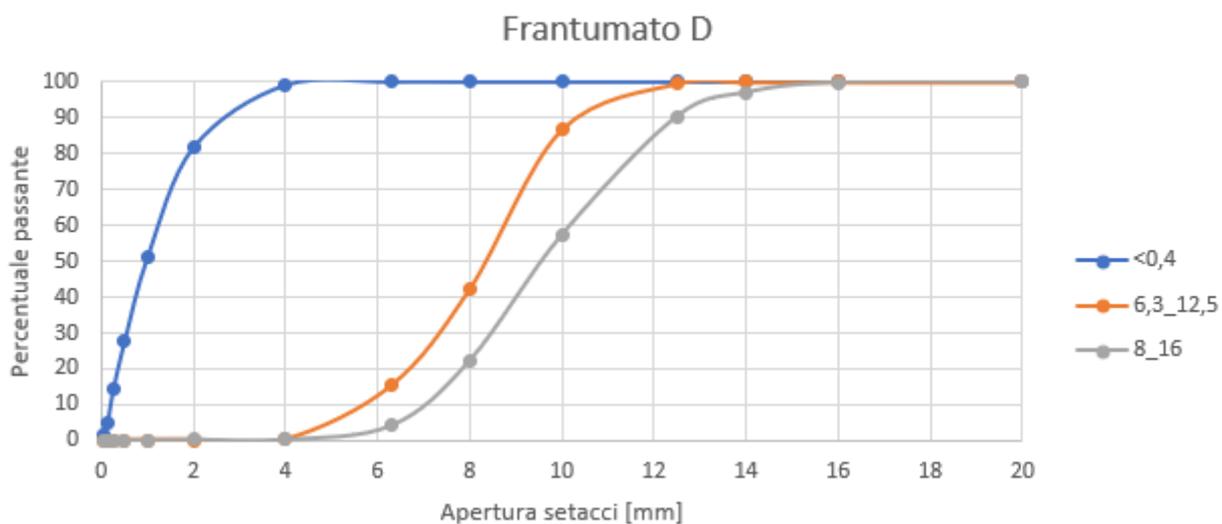


Figura 14 Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse D

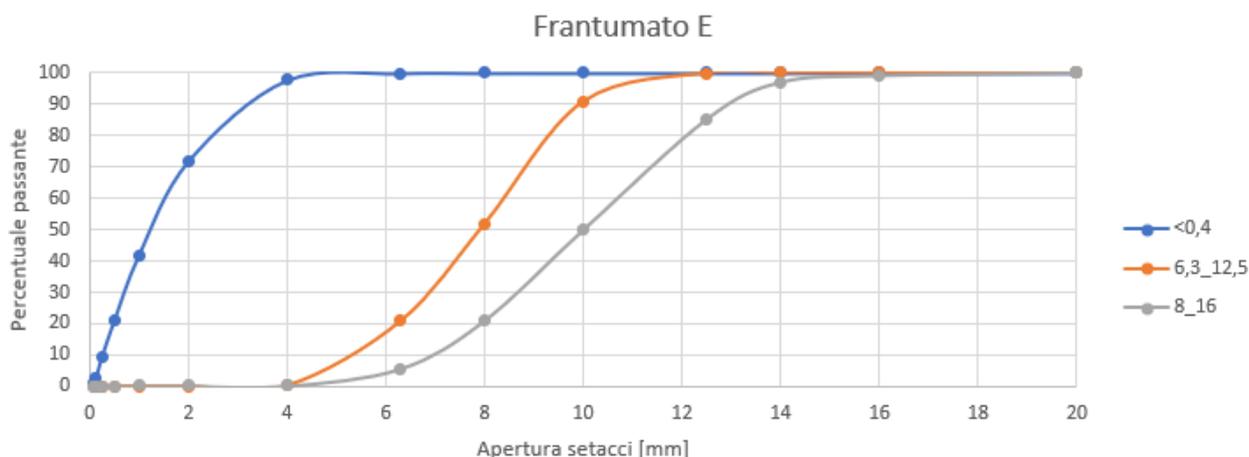


Figura 15 Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse E

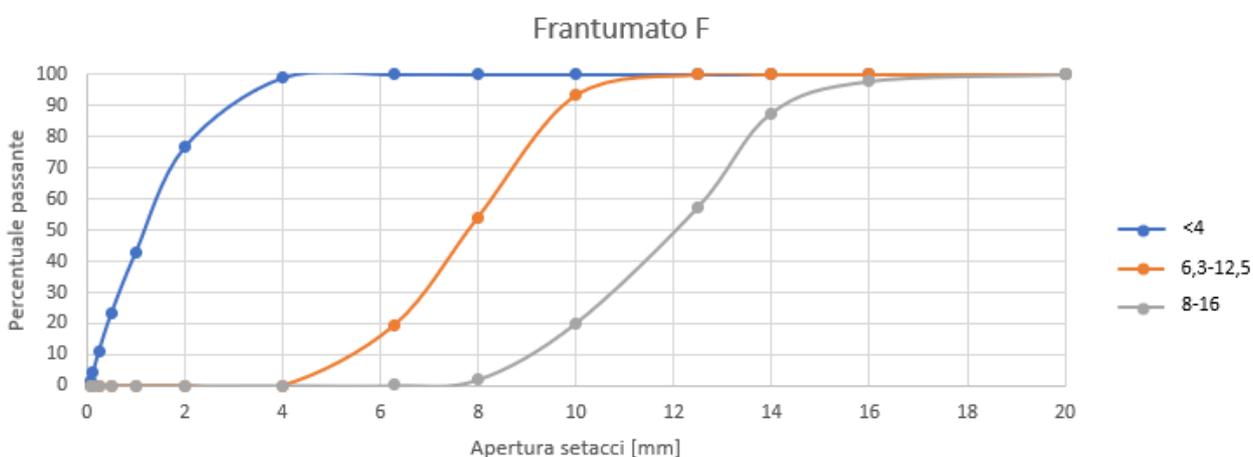


Figura 16 Distribuzioni granulometriche degli aggregati da traverse F

Gli aggregati riciclati sono stati ottenuti tutti attraverso gli stessi mulini e setacci; di conseguenza le distribuzioni granulometriche presentano degli andamenti simili come ci si aspettava di trovare. Le uniche eccezioni riguardano le curve della frazione 8-16 mm dei frantumati D e F che risultano spostate verso dimensioni dei grani inferiori (D) e superiori (F) rispetto alle altre curve. È possibile che la presenza di basalto all'interno dei grani del frantumato F lo rendano più resistente alla macinazione e, di conseguenza, tenda a presentare grani più grossolani.

2.1.3 Altre caratteristiche

La composizione dei diversi frantumati è nota; sono tutti formati da pasta di cemento indurita e aggregati con provenienza da cava. L'aspetto dei diversi granuli risulta essere disomogeneo in quanto, dopo il processo di macinazione, si sono ottenuti aggregati e sabbia sia liberi che sporchi di pasta cementizia e pasta cementizia separata dagli aggregati in frazioni non note (com'è stato possibile vedere in figura 7). Per determinare le frazioni dei componenti dei diversi frantumati sarebbe necessario effettuare un'analisi secondo la UNI EN 933-11 ^[14]; si è però scelto di non farla perché essendo le traverse prodotte con materiale controllato si è esclusa la presenza di materiali

quali vetro o altri la cui presenza dovrebbe essere nulla. Inoltre, la conoscenza delle frazioni di aggregato, cemento e additivi non influenza l'utilizzo come aggregato nel nuovo calcestruzzo. Le uniche tipologie di aggregati che possono presentare all'interno frazioni indesiderate sono quelli di tipo F; in mezzo ai granuli è possibile identificare dei pezzetti di plastica verde derivanti dalla frantumazione dei tappi di protezione dei fili di pre-tesatura. Si è cercato di rimuovere quanto più possibile i pezzetti di plastica ma non si esclude che ne possano essere rimasti nascosti tra gli aggregati. Il problema è legato alle sole traverse F in quanto solitamente la protezione dei fili di pre-tesatura avviene attraverso una malta apposita; in Overail è stata fatta la scelta di utilizzare dei tappi per facilitare e velocizzare la copertura dei fili. Per evitare il problema sarebbe opportuno rimuovere i tappi prima del processo di frantumazione; in quanto, una separazione successiva risulterebbe più complicata tenendo anche conto del fatto che nel frantumato fine potrebbe non essere nemmeno distinguibile. Altri possibili inquinanti potrebbero derivare da sporcizia che, trasportata dal vento, si è andata a depositare sui cumuli di materiale frantumato. Essendo questa presenza solo ipotetica viene considerata trascurabile.

Le traverse di fabbricazione Overail presentano aggregati grossi basaltici e fini calcarei, le traverse di fabbricazione Vianini e Lodovichi presentano la totalità di aggregati calcarei. Essendo gli aggregati basaltici più duri dei calcarei si ipotizza che la resistenza alla frammentazione degli aggregati contenenti basalto sia maggiore di tutte le altre.

Essendo le caratteristiche degli aggregati diverse da quelle determinate nei paragrafi 2.1.2 e 2.1.3 non necessarie per la definizione del Mix-design ma essenziali solo per la valutazione del possibile utilizzo di questi materiali per la produzione di nuovo calcestruzzo si riportano semplicemente (in tabella 7) gli esiti dei test effettuati e la conformità ai limiti accettabili secondo normative ^[7 e 10]. Le prove vengono eseguite secondo le rispettive normative indicate in tabella.

Tali limiti sono:

- Resistenza alla frammentazione è opportuno che appartenga a categorie inferiori o uguali a LA₃₀
- Componenti che alterano la velocità di presa e indurimento del calcestruzzo devono essere assenti
- Impurezze organiche leggere per fini devono essere ≤0.5% e per grossi ≤ 0.1%
- Influenza sul tempo d'inizio e presa del cemento deve essere ≤10'
- Resistenza al gelo/disgelo è consigliata una categoria ≤F2
- Resistenza all'effetto del solfato di magnesio è consigliata una categoria ≤MS₂₅
- Resistenza gelo/disgelo in presenza di sale è richiesto solo di dichiarare il valore

	Resistenza alla frammentazione UNI EN 1097-2 ^[15] [%]	Componenti che alterano la velocità presa e indurimento del calcestruzzo UNI EN 1744-1 ^[16]	Impurezze organiche leggere UNI EN 1744-1 ^[16] [%]	Influenza sul tempo di inizio presa del cemento UNI EN 1744-6 ^[17] [minuti]	Resistenza al gelo/disgelo UNI EN 1367-1 ^[11] [%]	Resistenza all'effetto del solfato di magnesio UNI EN 1367-2 ^[18] [%]	Resistenza gelo/disgelo in presenza di sale UNI EN 1367-6 ^[19]
RAF2	-	Assenti	0.1 ± 0.01	-	-		-
RBF2	-	Assenti	0.05 ± 0.01	-	-		-
RCF2	-	Assenti	0.09 ± 0.01	-	-	22.3 ± 0.1	-
RDF2	-	Assenti	0.06 ± 0.01	-	-	23.5 ± 0.1	-
REF2	-		0.04 ± 0.01	-	-	20.5 ± 0.1	-
RFF2	-	Assenti	0.05 ± 0.01	-	-	19.8 ± 0.1	-
RAG3	35 ± 1	Assenti	0.06 ± 0.01	1 ± 1	5.6 ± 0.1		
RAG4	34 ± 1	Assenti	0.04 ± 0.01	1 ± 1	5.3 ± 0.1		
RBG3		Assenti	0.02 ± 0.01	0 ± 1	5.2 ± 0.1		
RBG4		Assenti	0.02 ± 0.01	0 ± 1	4.9 ± 0.1		
RCG3		Assenti	0.05 ± 0.01	0 ± 1		17.6 ± 0.1	
RCG4		Assenti	0.05 ± 0.01	0 ± 1		17.2 ± 0.1	
RDG3	33 ± 1	Assenti	0.03 ± 0.01	0 ± 1	5.4 ± 0.1	18.1 ± 0.1	
RDG4	31 ± 1	Assenti	0.02 ± 0.01	0 ± 1	5.3 ± 0.1	17.9 ± 0.1	
REG3	35 ± 1		0.01 ± 0.01	1 ± 1		17.1 ± 0.1	
REG4	32 ± 1		0.01 ± 0.01	1 ± 1		16.8 ± 0.1	
RFG3	32 ± 1	Assenti	0.02 ± 0.01	0 ± 1		16.8 ± 0.1	
RFG4	30 ± 1	Assenti	0.01 ± 0.01	0 ± 1		16.5 ± 0.1	

Tabella 7 Esiti test effettuati

La resistenza alla frammentazione valutata attraverso la prova Los Angeles ^[15] ha portato all'ottenimento di risultati confrontabili per tutti gli aggregati riciclati grossi ma, allo stesso tempo, non si sono ottenuti dei dati che rispettano il limite imposto dalle norme ^[7 e 10]. È necessario precisare che il limite prefissato si riferisce a soli calcestruzzi con classi di resistenza maggiori di C50/60; quindi per classi di resistenza inferiori gli aggregati riciclati possono essere utilizzati senza ulteriori precauzioni. Inoltre, il limite imposto dalle normative non ne esclude l'utilizzo ma solo lo sconsiglia. All'interno della normativa UNI EN 206 ^[5] viene indicato che gli aggregati grossi riciclati devono presentare una classe di resistenza alla frammentazione inferiore di LA₅₀ per poter essere utilizzati; i risultati ottenuti rientrano nel limite. Si procede alla sperimentazione senza apportare modifiche alla classe di resistenza scelta per valutare se il superamento del valore di LA₃₀ porti a una diminuzione delle proprietà meccaniche. La presenza di pasta di cemento rende l'aggregato riciclato molto meno resistente alla frammentazione rispetto a quello da cava; gli aggregati naturali utilizzati presentano dei valori di LA₁₉ (6.3-12.5 mm) e LA₁₆ (8-16 mm).

Per tutti gli aggregati i componenti che alterano il tempo di presa risultano essere assenti. Si fa riferimento a composti organici, quali sostanza humica, che possono essere presenti nel terreno. Solitamente le traverse non vengono stoccate direttamente sul terreno né lavorano a suo diretto contatto; il risultato ottenuto risulta essere quello che ci si aspettava. Inoltre, risulta essere anche un indicatore del fatto che le traverse hanno lavorato e sono state conservate in maniera ottimale. Per gli aggregati E, di cui non si ha a disposizione il valore, si ipotizza che siano assenti vista l'omogeneità degli altri dati ottenuti.

Le impurezze organiche leggere derivano da contaminazioni dovute all'ambiente in cui lavorano o vengono stoccate le traverse. In generale sarebbe consigliabile ripetere la prova per ogni lotto di traverse che viene avviato alla frantumazione dato che gli esempi riportati in questo studio non risultano rappresentare la totalità delle possibili condizioni di ambiente di lavoro e conservazione delle traverse. I dati ottenuti risultano essere tutti conformi alle normative ^[7 e 10] e confrontabili tra loro. Gli aggregati di tipologia A e C presentano dei valori leggermente superiori rispetto agli altri. La motivazione potrebbe essere legata al fatto che le rispettive traverse sono state in esercizio e, di conseguenza, hanno avuto più possibilità di entrare in contatto con inquinanti rispetto agli aggregati derivanti dagli scarti di produzione.

Il tempo di inizio presa del cemento può essere influenzato dai componenti idrosolubili presenti all'interno degli aggregati riciclati. Il limite imposto al cambiamento del tempo di presa, che sia in positivo o in negativo, è di dieci minuti. Tutti gli aggregati analizzati risultano rientrare nel limite richiesto.

I risultati relativi alla resistenza al gelo/disgelo risultano tutti presentare un limite superiore al massimo consigliato ma con dati confrontabili. Questo implica che l'utilizzo di aggregati riciclati in applicazioni dove è richiesta una categoria di calcestruzzo XF sarebbe da evitare. Prima però di escluderla completamente sarebbe preferibile effettuare delle prove di resistenza al gelo/disgelo anche sul calcestruzzo.

La valutazione della resistenza all'effetto del solfato di magnesio ha portato all'ottenimento di risultati che rientrano nel limite consigliato con dati confrontabili tra loro.

Non si sono ottenuti i risultati relativi alla resistenza al gelo/disgelo in presenza di sale in tempi utili. Da normativa ^[7 e 10] non è indicato un limite massimo alla perdita percentuale in massa che gli aggregati devono avere. Di conseguenza, l'assenza dei dati non implica una possibile futura esclusione all'utilizzo di una o più tipologie di traverse.

Considerando tutti i risultati relativi alle prove effettuate sugli aggregati riciclati è possibile dire che, ad esclusione della prova di assorbimento, i risultati ottenuti siano tutti confrontabili. Per poter affermare che gli aggregati da riciclo possano o non possano essere utilizzati in miscela sarebbe opportuno ripetere le prove di assorbimento. Se si ottenessero dei risultati confrontabili si potrebbe ripetere la totalità delle prove necessarie per la definizione del mix design su un campione ottenuto dall'unione delle frazioni delle diverse tipologie di traverse per ottenere dei dati da utilizzare per la produzione di calcestruzzo. In alternativa si potrebbe pensare di determinare la media di tutti i dati necessari partendo da quelli di cui si è già in possesso senza passare per ulteriori analisi.

2.2 Mix Design del calcestruzzo

La definizione del mix design viene fatta in diversi passaggi, ciascuno necessario per definire le quantità di ogni componente da inserire nella miscela. Le miscele che si andranno a sviluppare, produrre e testare sono cinque:

- Miscela 0, contiene esclusivamente aggregato da cava, utilizzata per confrontare i risultati
- Miscela 60A, contiene il 60% di materiale riciclato proveniente dalle traverse di tipo A secondo la tabella 1 e il 40% di materiale da cava
- Miscela 100A, contiene il 100% di materiale riciclato proveniente dalle traverse di tipo A secondo la tabella 1
- Miscela 60F, contiene il 60% di materiale riciclato proveniente dalle traverse di tipo F secondo la tabella 1 e il 40% di materiale da cava
- Miscela 100F, contiene il 100% di materiale riciclato proveniente dalle traverse di tipo F secondo la tabella 1

La scelta di sviluppare le miscele utilizzando frantumati provenienti dalle traverse più vecchie e più nuove è stata fatta per diversi motivi; le traverse A provengono da tolti d'opera e potrebbero aver sviluppato danneggiamenti per fatica mentre le traverse F sono scarti di produzione per problemi legati all'estrazione dai casseri e di conseguenza non sono mai state utilizzate, gli aggregati grossi utilizzati nelle prime traverse sono calcarei mentre nelle F sono basaltici e infine più le traverse sono recenti più le normative risultano essere stringenti sulle caratteristiche dei materiali e prestazioni finali. La scelta è stata fatta per valutare le condizioni che, almeno dal punto di vista teorico, dovrebbero rappresentare gli estremi inferiori (traverse A) e superiori (traverse F) in quanto a caratteristiche degli aggregati e di conseguenza del calcestruzzo nel quale vengono inseriti.

La definizione del mix design inizia dalla definizione del rapporto acqua/cemento nota la resistenza a compressione che si vuole ottenere a ventotto giorni di stagionatura. Utilizzando il grafico in figura 17 e sapendo che la resistenza minima desiderata è 60 MPa si ricava un valore di rapporto acqua/cemento di circa 0.52. Il valore ricavato rappresenta il massimo valore utilizzabile per poter ottenere la resistenza minima a compressione desiderata; deve poi essere confrontato con i massimi ammessi dalle classi di esposizione del calcestruzzo che si vuole realizzare.

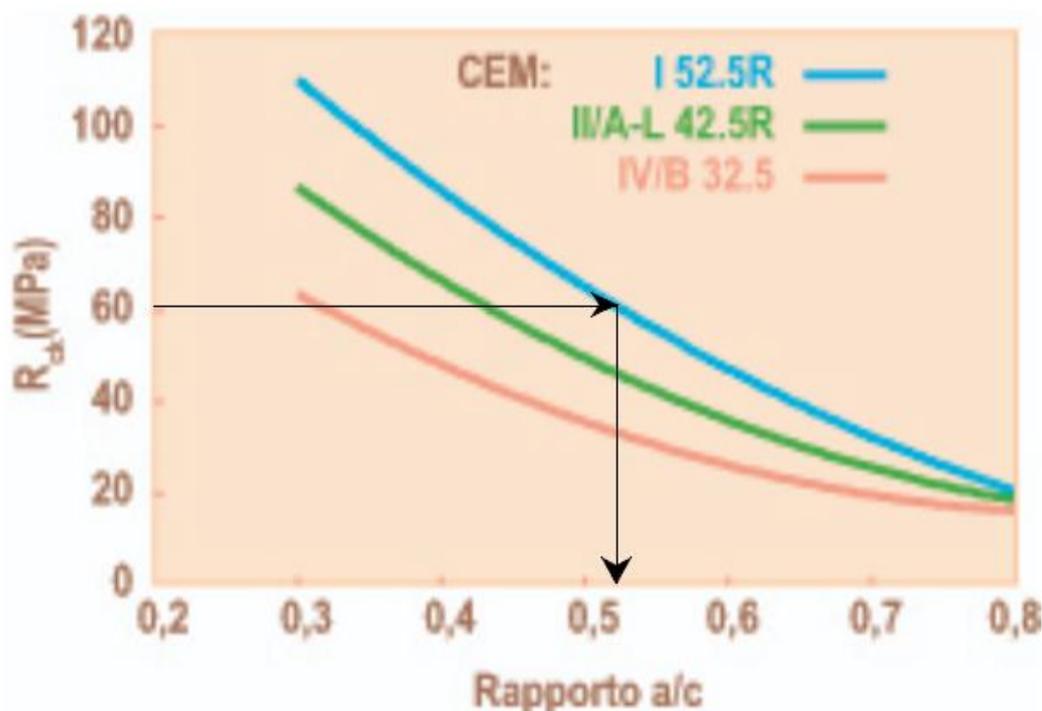


Figura 17 Resistenza cubica raggiunta da diverse tipologie di cemento in base al rapporto acqua/cemento utilizzato [11]

Le classi di esposizione per cui si è deciso di progettare la miscela sono XC4, XS3, XD3, XF4 e XA3. In tabella 8 si riportano i valori di massimo rapporto acqua/cemento, di minima resistenza richiesta e di minima quantità di cemento per le classi di esposizione definite; i valori sono ricavati dal prospetto F1 della normativa UNI EN 206 [5]. La classe XF4 andrebbe esclusa dati i risultati delle analisi di resistenza al gelo/disgelo; si sceglie di tenerne comunque conto per avere una visione più ampia dei limiti sulla composizione della miscela imposti dalla totalità delle classi più limitanti.

Classe di esposizione	XC4	XS3	XD3	XF4	XA3
Rapporto acqua/cemento massimo	0.5	0.45	0.45	0.45	0.45
Resistenza minima [MPa]	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C35/45
Cemento minimo [kg/m ³]	300	340	320	340	360

Tabella 8 Limiti richiesti in base alla classe di esposizione [5]

Confrontando i valori massimi del rapporto acqua/cemento delle diverse classi di esposizione con il massimo utilizzabile per il raggiungimento dei 60 MPa risulta essere necessario mantenersi al di sotto del valore di 0.45; ne consegue il raggiungimento di una resistenza maggiore di quella minima. Dalla tabella 8 si definisce anche la quantità minima di cemento da utilizzare che risulta essere di

360 kg/m³. Arbitrariamente si sceglie di utilizzare 370 kg/m³ di cemento; l'eccesso rispetto al valore minimo ha come obiettivo il mantenere un margine di sicurezza sull'accettabilità della miscela.

Per determinare la quantità di acqua, e di conseguenza di cemento, da utilizzare si dovrebbe fare ricorso allo slump utilizzando il grafico in figura 18. Per questo studio non viene richiesto un valore preciso di slump ma è comunque utile andare a determinare il valore teorico che si dovrebbe ottenere per poter fare un confronto con i valori ottenuti in fase sperimentale.

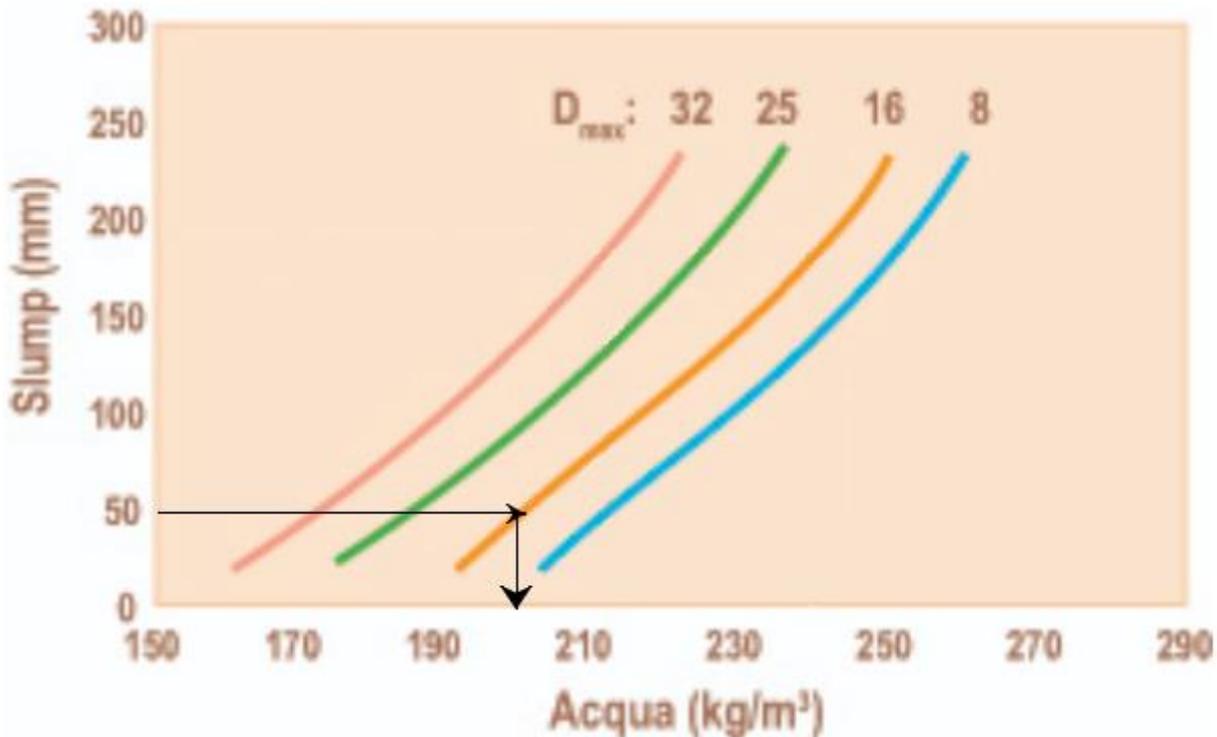


Figura 18 Quantità di acqua richiesta per ottenere un determinato slump in funzione della dimensione massima degli aggregati [11]

Dato che la pasta cementizia risulta essere il componente più costoso della miscela di calcestruzzo si potrebbe ipotizzare di utilizzarne la quantità minima richiesta. Conoscendo la quantità di cemento e il rapporto w/c si determina la quantità d'acqua da inserire nella miscela e di conseguenza lo slump che si otterrebbe. L'acqua da inserire risulta di 167 kg/m³, non risulta possibile intersecare la curva del diametro 16 mm da cui si deduce uno slump di circa 0 mm. Utilizzare uno slump così basso potrebbe causare problemi nel raggiungimento di una miscela omogenea, per cui si prospettano due soluzioni; si potrebbe aggiungere un fluidificante o aumentare lo slump e di conseguenza sia la quantità d'acqua che di cemento utilizzato.

Se si scegliesse un valore di slump minimo, per esempio di 50 mm, si ricaverebbe una quantità di acqua di circa 200 kg/m³ a cui corrisponde una quantità di cemento di 444 kg/m³. Come già detto, essendo la pasta di cemento il componente più costoso della miscela è sempre preferibile limitarne l'utilizzo. Di conseguenza, si sceglie di utilizzare un super-fluidificante; si ha a disposizione il Msure HES1540 [11]. Tale fluidificante garantisce di aumentare la lavorabilità di minimo il 120% e di poter ridurre il contenuto d'acqua di almeno il 12%. Le variazioni dipendono ovviamente dalla percentuale di fluidificante che viene introdotta in miscela. Da dati sperimentali ottenuti da test effettuati internamente all'azienda Overail è emerso che l'aggiunta del 9% di additivo, calcolato sulla massa di pasta di cemento, permette una riduzione del quantitativo di acqua del 18%, da cui si ottiene un valore di 137 kg/m³ di acqua, e uno slump di circa 70 mm.

La diminuzione della quantità d'acqua da inserire in miscela porta anche a una diminuzione del rapporto acqua/cemento che risulta essere di 0.37. la diminuzione del rapporto acqua/cemento permette di raggiungere dei valori di resistenza a compressione maggiori di quelli richiesti in progettazione.

È necessario definire le percentuali dei diversi aggregati da utilizzare tenendo conto delle frazioni di materiale da riciclo su materiale vergine. Inoltre, si cerca di prediligere la sostituzione di materiale grossolano dato che dalle norme tecniche ^[4] l'utilizzo di materiale fine riciclato risulta essere sconsigliato a causa dell'elevato assorbimento d'acqua.

La definizione delle percentuali di aggregato da utilizzare si effettua attraverso l'uso della curva di Fuller. La curva permette, date le dimensioni dei vagli disponibili per le misure delle distribuzioni granulometriche, di ottenere la distribuzione granulometrica teorica ottimale. Per costruirla si usa l'equazione 8.

$$p = 100 * \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [8]$$

Dove:

p percentuale passante attraverso un setaccio di apertura d (d espresso in mm)

D diametro massimo dell'aggregato impostato a 16 mm

Date le aperture dei setacci, le stesse utilizzate per la costruzione delle curve granulometriche, si ottiene la curva a cui dovrà tendere il più possibile la curva granulometrica sperimentale. Dato che risulta impossibile ottenere una sovrapposizione perfetta è necessario definire dei limiti, superiore e inferiore, che la curva reale non deve superare; tali limiti sono detti fuso granulometrico. Dal punto di vista normativo non esiste un metodo univoco per determinare il fuso granulometrico che resta a discrezione del progettista. Considerando gli aggregati utilizzati per le miscele e le rispettive curve di distribuzione granulometrica (figure 10, 11 e 16) risulta chiaro che per poter avere una curva che rientra nel fuso è necessario che il limite superiore raggiunga il valore di 100% passante non oltre i 14 mm (valore definito dalla curva dell'aggregato 8-16 mm del frantumato A). Le curve del fuso granulometrico vengono costruite utilizzando la stessa equazione usata per la curva di Fuller (8) andando però a sostituire D con un'apertura maggiore (limite inferiore D_m) e inferiore (limite superiore D_i). Tenendo conto delle curve granulometriche si sceglie di imporre D_i di 12 mm e D_m di 23 mm. Si è scelto di lasciare un margine abbastanza largo sia superiormente che inferiormente in quanto la frazione granulometrica 4-6.3 mm risulta essere praticamente assente e, di conseguenza, nella costruzione delle curve si otterrà un gradino. Le tre curve così ottenute si riportano in figura 19.

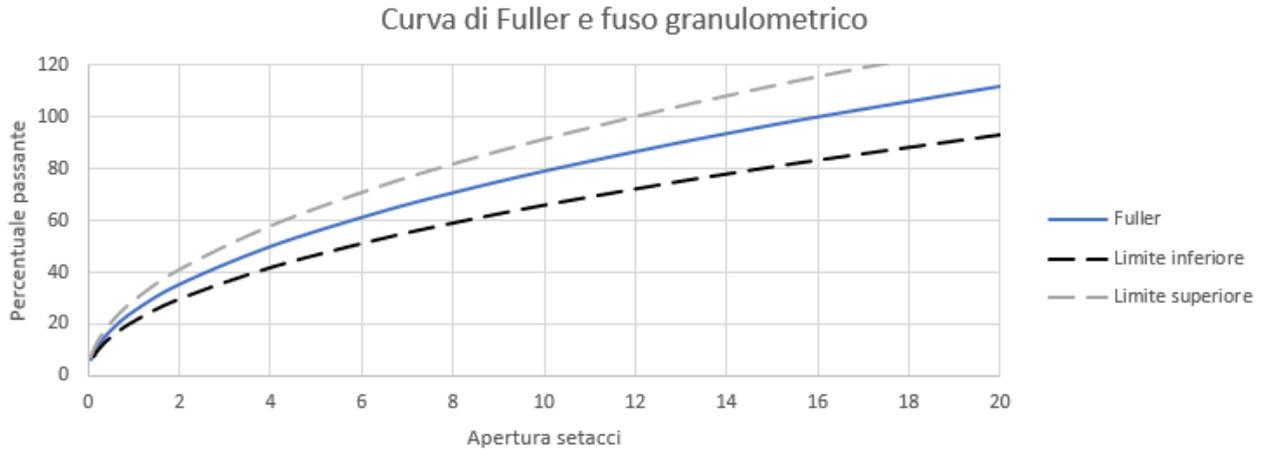


Figura 19 Curva di Fuller e fuso granulometrico

Ottenuta la curva di Fuller si procede a determinare le percentuali di aggregati da utilizzare per ciascuna miscela. I risultati ottenuti vengono riportati in tabella 9, in figure dalla 20 alla 24 si riportano le sovrapposizioni della curva di Fuller con le curve sperimentali. In appendice B si riportano i dati utilizzati per la costruzione delle curve.

	% da riciclo	NF1 [%]	RXF2 ^[1] [%]	NG1 [%]	NG2 [%]	RXG3 ^[1] [%]	RXG4 ^[1] [%]
Miscela 0	0	53	0	12	35	0	0
Miscela 60A	60	36	14	0	4	13	33
Miscela 100A	100	0	50	0	0	9	41
Miscela 60F	60	40	10	0	0	19	31
Miscela 100F	100	0	47	0	0	27	26

[1] X indica la lettera di denominazione del frantumato come in tabella 2

Tabella 9 Percentuali dei diversi aggregati utilizzati in ciascuna miscela di calcestruzzo

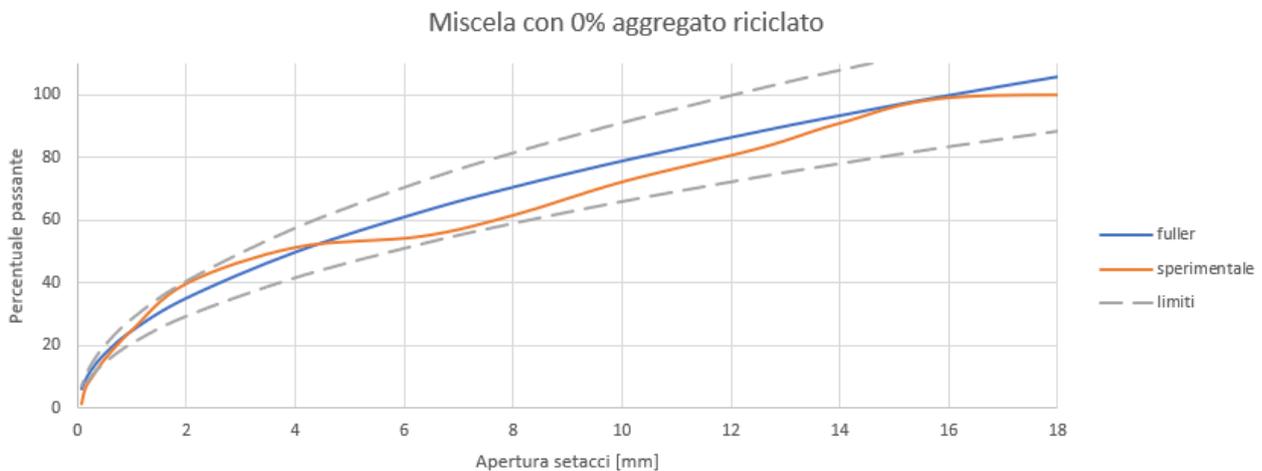


Figura 20 Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale di aggregato da cava

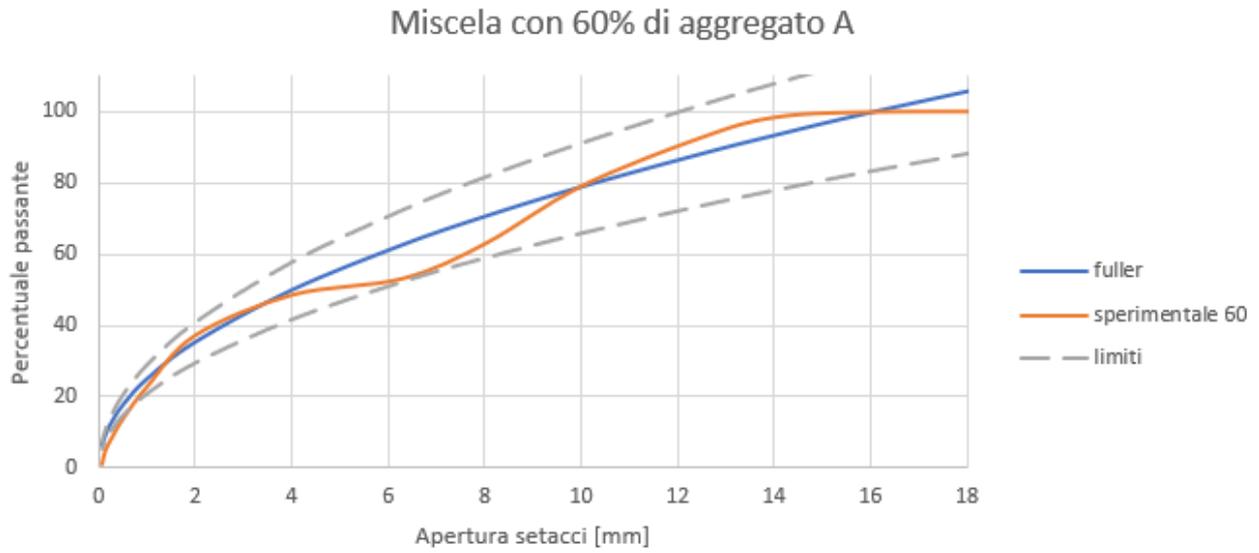


Figura 21 Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 60% di aggregato A

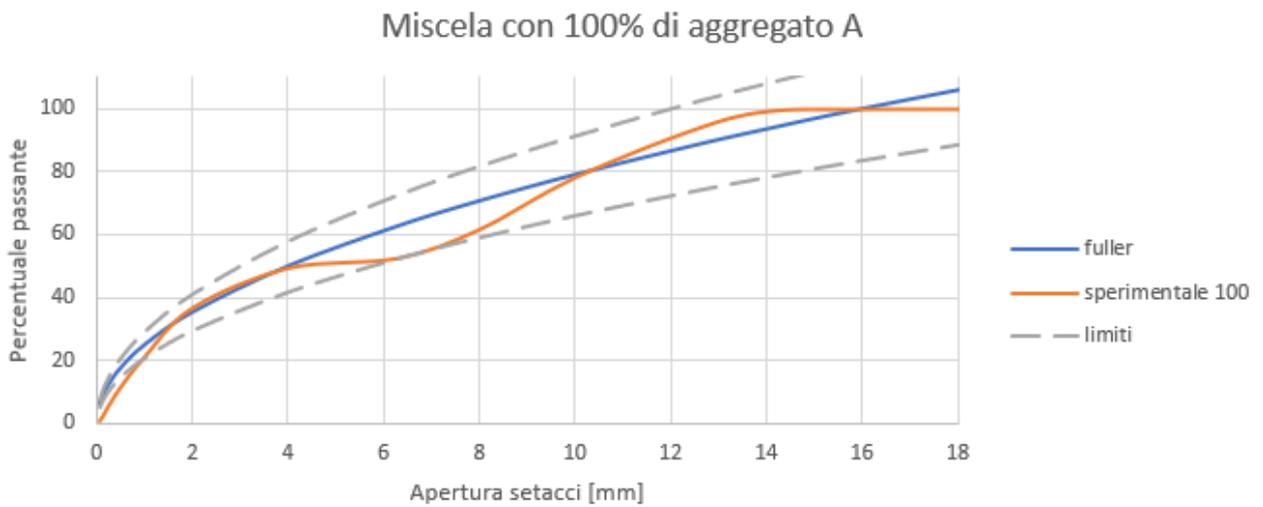


Figura 22 Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 100% di aggregato A

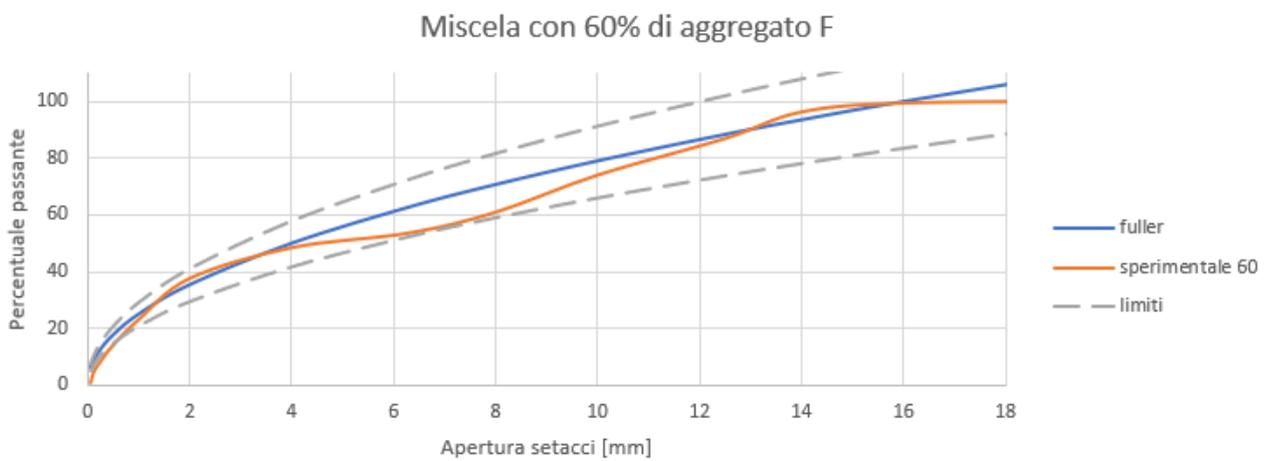


Figura 23 Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 60% di aggregato F

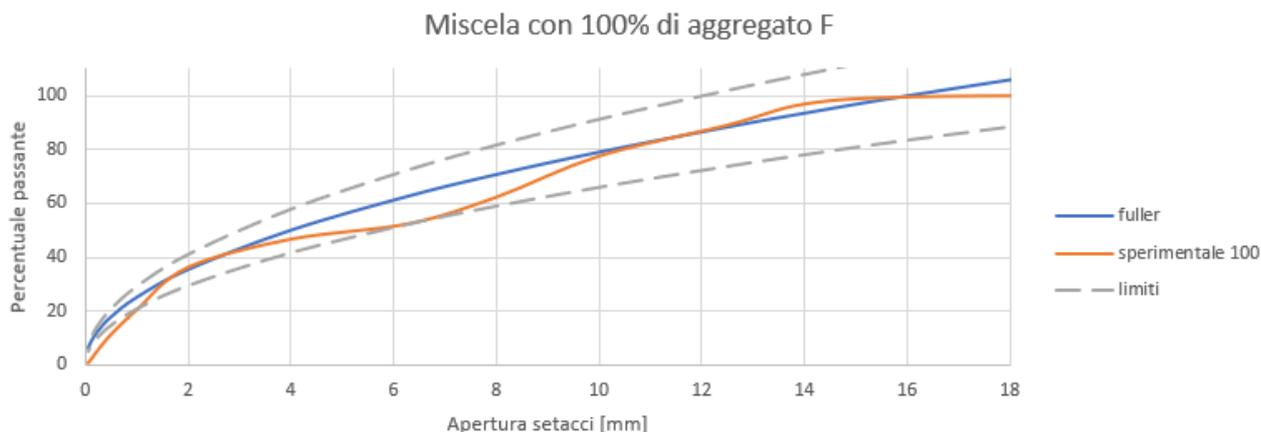


Figura 24 Sovrapposizione curva di Fuller con curva sperimentale contenente il 100% di aggregato F

Nessuna delle curve sperimentali, come previsto, risulta combaciare con la curva di Fuller. I dati riportati in tabella 9 sono stati ottenuti modificando ripetutamente le percentuali di ogni miscela con l'intento di ottenere la sovrapposizione migliore con la curva teorica restando all'interno del fuso granulometrico.

È importante conoscere sia la quantità di acqua assorbita sia l'assorbimento di acqua in condizioni di superficie satura asciutta degli aggregati. Questo perché una volta miscelati tutti i componenti del calcestruzzo gli aggregati assorbiranno o rilasceranno tanta acqua quanta ne serve per raggiungere la condizione di superficie satura asciutta. L'assorbimento o il rilascio di acqua comporterebbe una variazione alla miscela teorica, per evitarlo si valuta quello che sarebbe il cambiamento per poterlo compensare in fase di realizzazione del mix.

Prima di definire la compensazione dell'acqua è necessario definire il volume teorico di ogni aggregato che deve essere inserito in miscela. Per poterlo fare è necessario conoscere il volume dell'acqua teorico da inserire, il volume del cemento, dell'additivo e di aria inglobata. La quantità di aria inglobata teorica si determina graficamente con il grafico in figura 25; verrà poi confrontato con il valore ottenuto sperimentalmente.

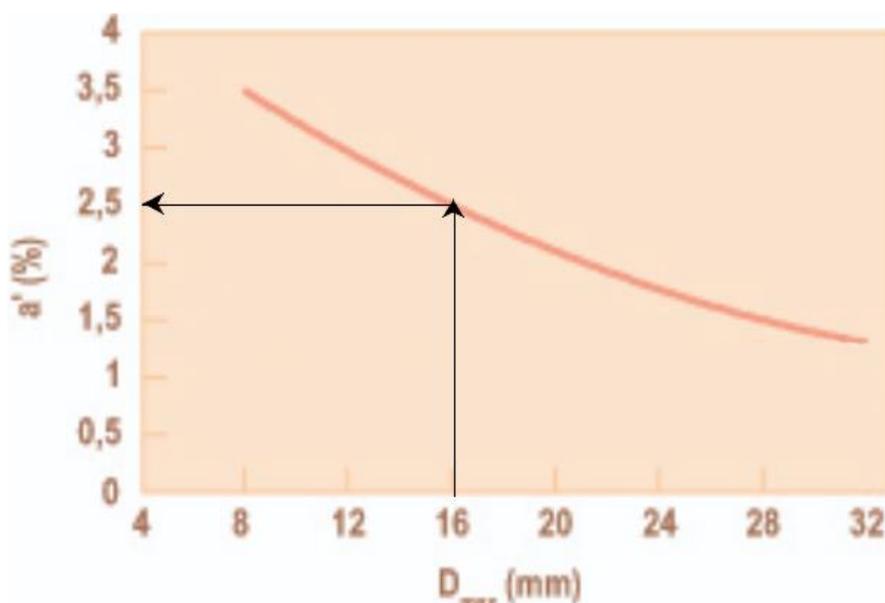


Figura 25 Aria inglobata in funzione del diametro massimo degli aggregati [11]

Il 2.5% corrisponde a 25 l/m³ di aria teorica. La presenza del fluidificante influisce anche sulla quantità di aria intrappolata nella miscela; da dati sperimentali risulta che la quantità diminuisca fino ad un valore di circa 1%. Si utilizzerà il valor di 1% per la definizione delle miscele di calcestruzzo, che corrisponde a 10 l/m³, tale valore dovrà poi essere confrontato con i risultati ottenuti. Per calcolare il volume di cemento si considera la massa volumica, che è 3.1 kg/l; si ottiene il valore di 119.4 l/m³ di polvere di cemento. Si effettua lo stesso ragionamento per l'acqua ma, essendo la massa volumica di 1 kg/l, si ottengono sempre 137 l/m³. Si è scelto di inserire il 9% di additivo, considerando 370 kg/m³ di cemento si ottengono 3.33 l/m³ di fluidificante, essendo la massa volumica di 1.06 kg/l, che corrispondono a 3.53 kg/m³ da inserire nell'impasto. Per calcolare il volume teorico di ogni aggregato da inserire in miscela si ricorre all'equazione 9.

$$V_{aggregato} = (1000 - V_{H2O} - V_{cemento} - V_{aria} - V_{add}) * F_{aggregato} \quad [9]$$

Dove:

$V_{aggregato}$ corrisponde al volume occupato dall'aggregato espresso in l/m³

V_{H2O} corrisponde al volume di acqua che è 137 l/m³

$V_{cemento}$ corrisponde al volume di cemento che è 119.4 l/m³

V_{aria} corrisponde al volume di aria che è 10 l/m³

V_{add} corrisponde al volume di additivo che è 3.33 l/m³

$F_{aggregato}$ corrisponde alla frazione di aggregato di cui si vuole calcolare il volume in miscela (ottenuto dividendo per 100 il valore della % in tabella 9)

Per determinare le quantità degli aggregati a superficie satura asciutta (M_{ssa}) da inserire in ogni miscela si moltiplica il volume determinato con l'equazione 9 con la rispettiva massa volumica a superficie asciutta (riportati in tabella 3). La massa così determinata deve essere modificata in base alla quantità di acqua che contiene l'aggregato usando l'equazione 10.

$$M_b = \frac{m_b}{m_{ssa}} * M_{ssa} \quad [10]$$

Dove:

M_b corrisponde alla massa di aggregato da inserire nella miscela espresso in kg/m³

M_{ssa} corrisponde alla massa dell'aggregato a superficie satura asciutta da inserire in miscela espresso in kg/m³

m_b corrisponde alla massa di aggregato bagnato per 100 kg di aggregato secco espresso in kg, si ottiene sommando la $Q_{ta_{H2O}}$ % a 100

m_{ssa} corrisponde alla massa di aggregato a superficie satura asciutta per 100 kg di aggregato secco espresso in kg, si ottiene sommando la WA_{24} % a 100

Definite le masse degli aggregati da pesare si procede alla modifica della quantità di acqua da inserire in miscela. Per farlo è necessario valutare, per ogni aggregato, la quantità di acqua assorbita o rilasciata (a_i) per il raggiungimento della condizione di superficie satura asciutta attraverso la differenza tra M_b e M_{ssa} del rispettivo aggregato. Infine, si ottiene la quantità di acqua da inserire in miscela con l'equazione 11. In tabella 10 si riportano le composizioni di ogni miscela.

$$A = 200 - \sum_{i=1}^n a_i \quad [11]$$

Dove:

A è la quantità di acqua da inserire in miscela espressa in kg/m^3

a_i è la quantità di acqua rilasciata o assorbita da ogni aggregato espressa in kg/m^3

	0	60A	100A	60F	100F
NF1 [kg/m³]	1010.7	686.5	0	762.8	0
RXF2 ^[1] [kg/m³]	0	263.3	940.3	181.5	853.3
NG1 [kg/m³]	246.2	0	0	0	0
NG2 [kg/m³]	712.8	81.5	0	0	0
RXG3 ^[1] [kg/m³]	0	253.7	175.6	372.3	529.1
RXG4 ^[1] [kg/m³]	0	649.9	807.4	618.8	519.0
Cemento [kg/m³]	370	370	370	370	370
Acqua [kg/m³]	145.4	150.8	149.0	133.5	141.3
Aria [l/m³]	10	10	10	10	10
Additivo [kg/m³]	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53

[1] X indica la lettera di denominazione del frantumato come in tabella 1

Tabella 10 Miscela

Durante le fasi di ottenimento delle miscele 100A e 100F ci si è accorti che la quantità di acqua teorica risulta essere insufficiente per ottenere una pasta omogenea. Si è deciso di procedere in due modalità distinte; si è ipotizzato che i valori degli assorbimenti degli aggregati grossolani fossero sbagliati e si è provato ad aggiungere acqua, la seconda strada è stata quella di aumentare la percentuale di super-fluidificante. Nel primo caso la quantità di acqua è stata aumentata del 8.4% per la miscela 100A e del 13.3% per la miscela 100F mantenendo invariate le altre componenti; in questo modo teoricamente si dovrebbe raggiungere un rapporto acqua/cemento dello 0.43 per entrambe le miscele (si sarebbe raggiunto tale valore se gli assorbimenti fossero stati corretti). Per evitare di aggiungere un'elevata quantità di acqua si è scelto di aumentare la percentuale di super-fluidificante fino al 10% e di considerare gli aggregati come saturi e non sovra-saturi, in questo modo si evita la rimozione di acqua rispetto all'impasto teorico. Si è scelto di non mantenere la quantità d'acqua in base ai risultati ottenuti sulle analisi effettuate sul fresco con la singola aggiunta di acqua.

2.3 Prove su calcestruzzo

Per valutare in maniera ottimale come una percentuale di aggregato proveniente dalla frantumazione di traverse ferroviarie dismesse vada ad influire sulle proprietà del calcestruzzo si sceglie di fare valutazioni sia sul fresco che dopo ventotto giorni di stagionatura. Sul calcestruzzo fresco si effettuano prove di massa volumica, contenuto d'aria, determinazione del contenuto d'acqua e valutazione della consistenza attraverso test di abbassamento del cono di Abrams. Le prove effettuate sul calcestruzzo fresco vengono effettuate contemporaneamente alla realizzazione dei provini destinati alle prove sul calcestruzzo indurito facendo particolare attenzione al fatto di concluderle tutte prima che inizi la presa del calcestruzzo. Il produttore del cemento utilizzato fornisce come valore medio del tempo d'inizio presa di 151 minuti circa.

La progettazione della miscela di calcestruzzo viene fatta con l'obiettivo di ottenere una resistenza a compressione minima; nonostante questo è importante valutare ulteriori proprietà in quanto, nel momento della produzione di prefabbricati, sono molteplici i casi in cui la resistenza a compressione non è il solo parametro da rispettare. Si andranno a valutare, oltre alla resistenza alla compressione a 1, 7 e 28 giorni, il valore del ritiro a 7 e 28 giorni di stagionatura, il valore del modulo elastico e la resistenza a flessione.

I provini destinati alle prove di resistenza dovrebbero essere confezionati e stagionati secondo la normativa UNI EN 12390-2 ^[20]. Dopo aver gettato il calcestruzzo nelle casseforme è necessario compattarlo attraverso l'utilizzo di vibrazioni meccaniche oppure manualmente, utilizzando un pestello o una barra di compattazione, colpendo la cassaforma 25 volte. Prima dell'indurimento del calcestruzzo è necessario livellare la superficie eliminando la pasta che eccede dalla cassaforma e identificare il provino come mostrato in figura 26.



Figura 26 Provini di calcestruzzo a superficie livellata con targhetta identificativa

I provini devono essere sformati dopo almeno 16 ore ma senza aspettare più di 3 giorni; per questo studio si aspetteranno 24 ore circa. Da normativa ^[20], i provini dovrebbero essere posizionati in camere di stagionatura a (20 ± 2) °C e umidità $\geq 95\%$; per questo studio l'invecchiamento avverrà a temperatura ambiente e all'aria aperta per i provini destinati alle prove di resistenza a compressione e secondo normativa per i provini destinati alle prove di resistenza a flessione e misura del modulo elastico. La motivazione della scelta è legata al fatto che i provini destinati alla resistenza a flessione e alla valutazione del modulo elastico vengono stagionati e testati esternamente all'azienda e, di conseguenza, devono essere maturati secondo normativa ^[20]. Per i provini destinati alla prova di resistenza a compressione e alla misura del ritiro volumetrico si è scelto di effettuare un processo di stagionatura naturale per simulare meglio le condizioni di resistenza che si otterrebbero durante un reale utilizzo del calcestruzzo.

2.3.1 Misura della massa volumica

Per la determinazione della massa volumica si procede facendo riferimento a quanto riportato nella normativa UNI EN 12350-6 ^[21]. Si utilizza un contenitore conforme alla UNI EN 12350-1 ^[22]; liscio internamente, avente volume di almeno 5 l e diametro maggiore di 150 mm, non deve essere costituito da materiale assorbente e non deve essere aggredibile dalla pasta cementizia. Il contenitore deve essere pulito internamente, inumidito con un panno bagnato e pesato (m_1 espresso in kg). Si procede poi al riempimento del contenitore in più step per assicurare una compattazione completa del materiale. Si livella la superficie e si pulisce e asciuga esternamente il contenitore per poi procedere alla seconda pesata (m_2 espresso in kg) come mostrato in figura 27. Il valore della massa volumica si determina usando l'equazione 12.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [12]$$

Dove:

D è la massa volumica espressa in kg/m^3

V volume del contenitore espresso in m^3

m_1 è la massa del contenitore espressa in kg

m_2 è la massa del contenitore pieno di calcestruzzo espresso in kg



Figura 27 Prova di misura della massa volumica

2.3.2 Contenuto d'aria

La valutazione del contenuto d'aria viene fatto secondo la UNI EN 12350-7 ^[23]. È possibile utilizzare due metodologie, la colonna d'acqua e il metodo gauge. La metodologia a colonna d'acqua prevede di coprire un volume noto di calcestruzzo compattato con un'altezza nota di acqua e di applicare una pressione; si valuta poi la differenza delle altezze di acqua. Il metodo di gauge introduce in un contenitore una quantità nota di aria a pressione nota e una quantità nota di calcestruzzo e valuta il cambiamento di pressione. Per questo studio si utilizza il metodo a colonna d'acqua e teoricamente si è previsto di ottenere un valore di aria inglobata del 1% circa.

Dopo aver pulito il contenitore lo si riempie con il calcestruzzo cercando di rimuovere l'aria intrappolata. Il riempimento avviene in più step per garantire una buona compattazione, essenziale per non ottenere un risultato falsato. Sarebbe preferibile utilizzare un tavolo vibrante al posto di una compattazione manuale. Si deve cercare di non mettere materiale in eccesso in quanto è da preferire una piccola aggiunta di calcestruzzo per riempire il contenitore alla rimozione dell'eccesso, la motivazione è legata al fatto che poi risulta difficile pulire la superficie per ottenere una chiusura ottimale. Si procede poi alla chiusura dello strumento facendo attenzione a ottenere una chiusura ermetica come mostrato in figura 28.



Figura 28 Strumento per la valutazione del contenuto d'aria

Si riempie l'apparato con acqua fino al livello 0. Si inizia poi ad applicare una pressione di 1 bar tramite una pompa di aria. Si legge il livello h_1 , si rilascia la pressione e si legge il livello h_2 . Se h_2 indica un contenuto d'aria inferiore allo 0.2% si registra la differenza $h_1 - h_2$ come contenuto apparente di aria (A_1); se è maggiore si applica nuovamente la pressione misurando h_3 e, dopo aver rilasciato la pressione, h_4 . Se $h_4 - h_2$ è al più pari allo 0.1% di aria allora si registra il valore di $h_3 - h_4$ come quantità di aria apparente, in caso negativo è probabile la presenza di una perdita e risulta necessario ripetere la prova. Il valore misurato dovrebbe essere modificato utilizzando il fattore di correzione dell'aggregato (G), ma essendo insignificante per la maggior parte degli aggregati lo si considera nullo.

2.3.3 Abbassamento del cono di Abrams

La consistenza del calcestruzzo fresco si valuta attraverso la misura dell'abbassamento al cono di Abrams effettuato secondo la normativa UNI EN 12350-2 ^[24]. Le miscele sono state progettate per ottenere un risultato prossimo ai 70 mm. Il cono e la piastra base devono essere puliti e inumiditi utilizzando un panno. Dopo aver posizionato il cono sulla base si procede al riempimento che deve essere effettuato in tre strati di circa uguale altezza. È necessario applicare 25 colpi di assestamento che devono essere distribuiti in maniera uniforme senza colpire la base di supporto. Una volta finita la compattazione è necessario livellare la superficie e procedere con lo sfilamento del cono in un tempo compreso tra i 2 s e 5 s. Si aspetta poi che si verifichi l'abbassamento del cono; se dopo un minuto l'altezza non si è ancora assestata significa che l'abbassamento del cono non è un metodo adatto alla misura della consistenza. È importante che l'abbassamento sia uniforme e che non si

verifichi un collasso del cono in una direzione specifica. In figura 29 si riporta un esempio di esito della prova.



Figura 29 Slump test di calcestruzzo S1

Appena l'altezza del calcestruzzo si è assestata si effettua la misura e si determina l'abbassamento come differenza tra l'altezza del cono e la misura effettuata. Dato che la consistenza varia nel tempo a causa dell'idratazione del cemento sarebbe meglio cercare di effettuare la prova sulle diverse miscele dopo lo stesso intervallo di tempo dalla miscelazione. Se l'abbassamento non risulta essere uniforme è necessario ripetere la prova.

2.3.4 Determinazione del contenuto d'acqua

La normativa UNI 11201 ^[25] fornisce le indicazioni per ricavare sperimentalmente il contenuto totale d'acqua, il contenuto d'acqua efficace e il rapporto acqua/cemento reale della miscela di calcestruzzo. La prova dovrebbe essere effettuata entro 30 minuti dall'introduzione dell'acqua nell'impasto per avere la certezza che la classe di consistenza del calcestruzzo sia mantenuta costante e la presa non sia iniziata.

Si utilizza una bacinella pulita e asciutta di peso m_0 , la si riempie di calcestruzzo e si registra il peso m_u . Il calcestruzzo non deve essere compattato nella bacinella. Si procede con l'inserimento della bacinella nel sistema di riscaldamento che consente un'evaporazione rapida dell'acqua (inferiore di 30') fino all'ottenimento di un materiale dall'aspetto polverulento, come in figura 30. Durante il processo di essiccazione potrebbe essere necessario rompere dei grumi di calcestruzzo per permettere una facile evaporazione dell'acqua.



Figura 30 Aspetto del calcestruzzo dopo essiccazione

Si rimuove la bacinella dal sistema di riscaldamento e la si mette a raffreddare coperta, si registra poi m_s . Si procede al calcolo dei risultati con le equazioni 13, 14, 15 e 16. L'equazione 14 viene modificata in base al numero degli aggregati presenti nella miscela.

$$D_{w,t} = \frac{m_{w,t} * \rho_{cls}}{m_c} \quad [13]$$

$$D_{w,ass} = \frac{WA_{24,g} * D_{agg,g}}{100} + \frac{WA_{24,f} * D_{agg,f}}{100} \quad [14]$$

$$D_w = D_{w,t} - D_{w,ass} \quad [15]$$

$$\frac{w}{c} = \frac{D_w}{D_c} \quad [16]$$

Dove:

$D_{w,t}$ è il contenuto totale di acqua espresso in kg/m^3

$m_{w,t}$ è la quantità di acqua nel campione sottoposto a prova, che si calcola sottraendo m_s a m_u espresso in kg

ρ_{cls} è la massa volumica del calcestruzzo fresco espresso in kg/m^3

m_c è la massa del campione di calcestruzzo calcolato sottraendo m_0 a m_u espresso in kg

$D_{w,ass}$ è l'assorbimento di acqua da parte dell'aggregato espresso in kg/m^3

$WA_{24,g}$ e $WA_{24,f}$ sono rispettivamente gli assorbimenti di acqua da parte dell'aggregato grosso e fine espressi in %

$D_{agg,g}$ e $D_{agg,f}$ sono rispettivamente i contenuti di aggregati grosso e fine espressi in kg/m^3 di materiale essiccato in stufa

D_w è il contenuto d'acqua efficace espresso in kg/m^3

D_c è il contenuto di cemento espresso in kg/m^3

w/c è il rapporto acqua/cemento

2.3.5 Resistenza a compressione

La resistenza a compressione viene valutata come andamento della resistenza nel tempo. Le miscele di calcestruzzo sono state progettate con lo scopo di raggiungere, al termine dei 28 giorni di stagionatura, una resistenza a compressione cubica minima di 60 MPa anche se, visto il rapporto acqua/cemento, dovrebbero raggiungere una resistenza maggiore. Dato che la miscela di confronto supererà i 60 MPa di resistenza cubica si andrà a valutare se la presenza di aggregato da riciclo permetta il raggiungimento del valore di soglia oppure porti all'ottenimento di un valore più prossimo a quello della miscela 0.

I provini che si utilizzano sono cubici di lato 150 mm come mostrato in figura 31.



Figura 31 Provino cubico per la prova di resistenza a compressione

La prova viene effettuata seguendo le direttive presenti nella normativa UNI EN 12390-3 [26]. È necessario assicurarsi che il provino e la macchina (figura 32) siano entrambi puliti e non presentino materiale estraneo sulle facce che entreranno in contatto. I provini devono essere posizionati così da applicare il carico perpendicolarmente alla direzione di getto e centrato rispetto alle piastre. Il carico viene applicato a velocità costante di 0.8 MPa/s fino alla rottura del provino. La rottura, per poter essere ritenuta valida, deve essere omogenea. Esempi di rotture soddisfacenti dei provini cubici vengono riportati in figura 33.



Figura 32 Macchinario per la prova di resistenza a compressione

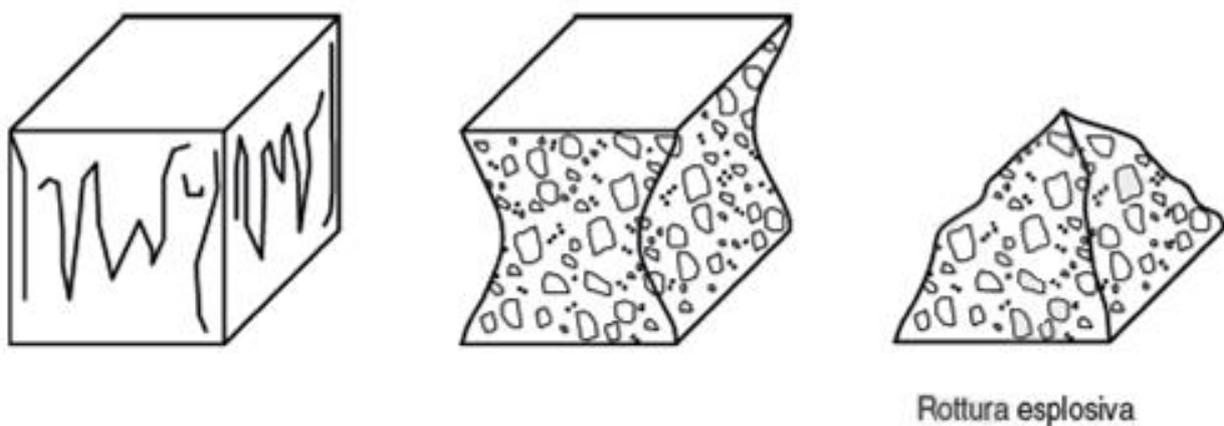


Figura 33 Esempi di rotture soddisfacenti di provini cubici [26]

Il calcolo della resistenza a compressione viene fatto utilizzando l'equazione 17.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [17]$$

Dove:

f_c è la resistenza a compressione espressa in MPa

F è il carico massimo a rottura espresso in N

A_c è l'area della sezione trasversale del provino su cui agisce la forza espresso in mm²

La prova viene ripetuta su due campioni così da poter ricavare un valore medio; se però le misure si scostano l'una dall'altra di più del 9% (limite da normativa [26]) la prova viene ripetuta su un terzo provino al fine di scartare la misura errata. Per ciascuna miscela la prova viene effettuata dopo 1, 7 e 28 giorni di stagionatura.

2.3.6 Resistenza a flessione

La resistenza a flessione viene valutata su provini prismatici di dimensioni 10*10*50 cm³ stagionati 28 giorni e seguendo la normativa UNI EN 12390-5 [27]. Un esempio di provino adatto alla prova di flessione è mostrato in figura 34.



Figura 34 Set di provini destinati alla misura della resistenza a flessione

La prova a flessione che viene fatta è a quattro punti e il provino deve essere montato come in figura 35, facendo attenzione che la macchina sia pulita e non presenti residui nei rulli di contatto con il calcestruzzo; inoltre, il provino deve essere posizionato centralmente sui rulli di appoggio e con l'applicazione del carico perpendicolare alla direzione del getto del provino.

Disposizione del provino al carico (carico a due punti)

Legenda

- 1 Rullo di carico (in grado di ruotare e di essere inclinato)
- 2 Rullo di supporto
- 3 Rullo di supporto (in grado di ruotare e di essere inclinato)

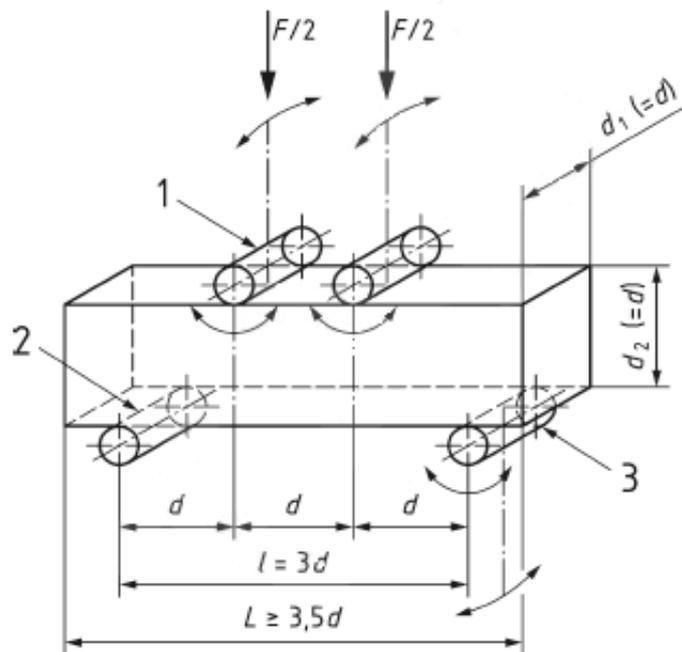


Figura 35 Modello del montaggio dello strumento per la prova a flessione a quattro punti [27]

Il carico deve essere applicato a velocità costante compresa tra 0.04 e 0.06 MPa/s solo dopo che tutti e quattro i rulli siano entrati in contatto con il provino. La resistenza a flessione viene calcolata utilizzando l'equazione 18.

$$f_{cl,fl} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad [18]$$

Dove:

$f_{cl,fl}$ è la resistenza a flessione espressa in MPa

F è il carico massimo applicato espresso in MPa

l è la distanza tra i rulli inferiori espressa in mm

d_1 e d_2 sono le dimensioni laterali del provino espresse in mm

Da normativa ^[27] è possibile anche effettuare una prova a tre punti montando il provino sui supporti come in figura 36.

Disposizione del provino al carico (carico centrato)

Legenda

- 1 Rullo di carico (in grado di ruotare e di essere inclinato)
- 2 Rullo di supporto
- 3 Rullo di supporto (in grado di ruotare e di essere inclinato)

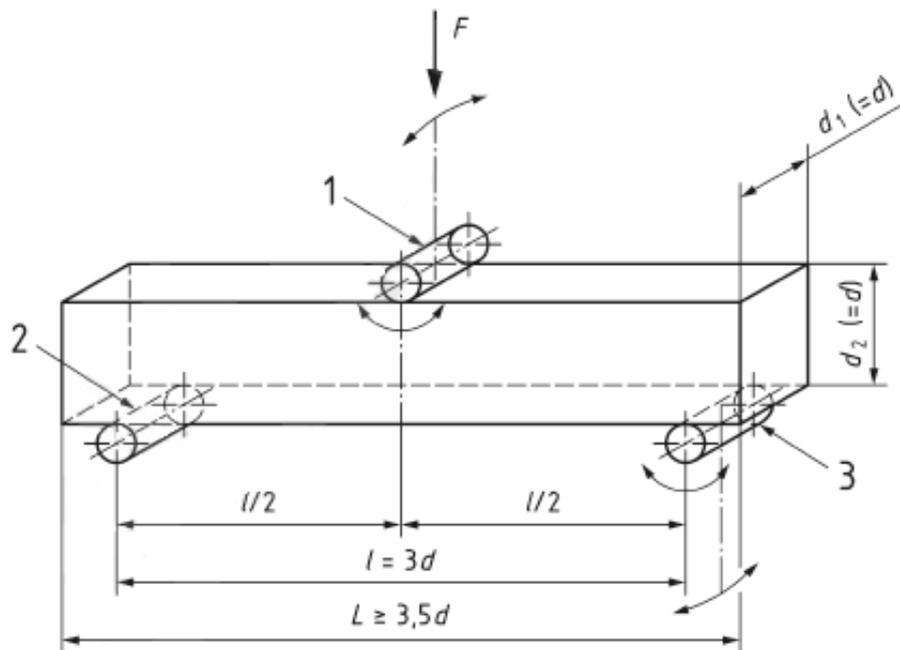


Figura 36 Modello del montaggio dello strumento per la prova a flessione a tre punti ^[27]

Oltre al montaggio dello strumento varia anche l'equazione per il calcolo della resistenza che risulta essere la 19.

$$f_{cl,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad [19]$$

Da normativa basterebbe effettuare il test su due provini, ma per ottenere un valore medio il più possibile significativo verrà effettuata su tre. Da normativa non è indicata una percentuale massima di differenza tra le misure oltre la quale una delle due non può essere ritenuta valida, di conseguenza si considera la media ricavate dalle tre misure effettuate come valore della resistenza a flessione a quattro punti.

2.3.7 Misura del modulo elastico

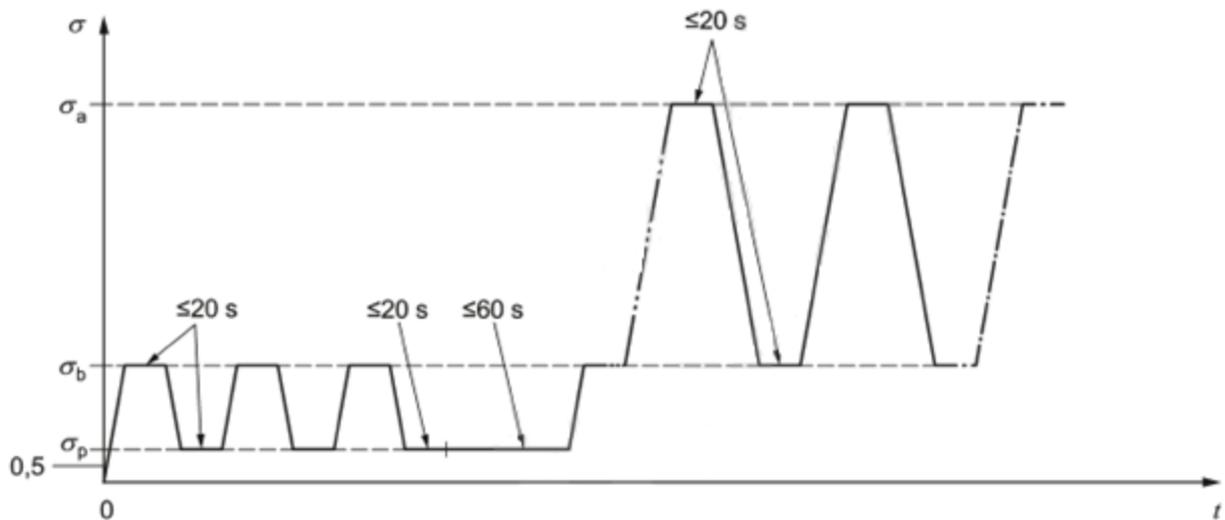
L'esecuzione della misura del modulo elastico a compressione viene effettuata seguendo la normativa UNI EN 12390-13 [28]. Per la misura sono necessari dei provini cilindrici stagionati 28 giorni e aventi il diametro di almeno 3.5 volte il diametro massimo degli aggregati, dato che gli aggregati hanno come massimo diametro 16 mm il diametro minimo dei provini deve essere di 48 mm. I provini che si utilizzeranno per la realizzazione delle prove presentano un diametro di 150 mm e altezza di 300 mm come quelli in figura 37.



Figura 37 Provini destinati alla prova di misura del modulo elastico

Prima di misurare il modulo elastico è necessario valutare la resistenza a compressione del calcestruzzo su tre provini avente la stessa forma e dimensione di quelli destinati alla valutazione del modulo elastico. In questo modo si evita di dover tenere conto di differenze dovute alla forma del provino. È importante conoscere il valore della resistenza a compressione prima di effettuare la prova di flessione perché così facendo si evita di sottoporre a una pressione eccessiva il provino e di conseguenza di danneggiarlo.

Dopo aver determinato la resistenza a compressione si procede alla determinazione del modulo elastico. Sul provino vengono applicati carichi ciclici a intensità crescente (seguito quanto indicato in figura 38) e si registrano la deformazione che ne conseguono.



Legenda

- Ciclo di applicazione del carico
- - - - - Ciclo di applicazione del carico per la determinazione del modulo di elasticità secante iniziale - Metodo A
- · — · — Ciclo di applicazione del carico per la determinazione del modulo di elasticità secante stabilizzato - Metodo A
- σ Sforzo applicato in MPa
- σ_a Sforzo superiore - $f_c / 3$
- σ_b Sforzo inferiore - $0,10 \times f_c \leq \sigma_b \leq 0,20 \times f_c$
- σ_p Sforzo di precarico - $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
- t Tempo in s

Figura 38 Ciclo di applicazione del carico per la determinazione del modulo elastico [28]

In questo modo è possibile determinare il modulo elastico secante iniziale e stabilizzato utilizzando le equazioni 20 e 21.

$$E_{C,0} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_0} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0}} \quad [20]$$

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad [21]$$

Dove:

$E_{C,0}$ è il modulo di elasticità secante iniziale espresso in GPa

$E_{C,S}$ è il modulo di elasticità secante stabilizzato espresso in GPa

σ_a^m è lo sforzo misurato corrispondente allo sforzo nominale superiore, σ_a espresso in GPa

σ_b^m è lo sforzo misurato corrispondente allo sforzo nominale superiore, σ_b espresso in GPa

$\varepsilon_{a,n}$ è la deformazione media allo sforzo superiore al ciclo n di applicazione del carico

$\epsilon_{b,n}$ è la deformazione media allo sforzo sforzo inferiore al ciclo n di applicazione del carico

La differenza tra i due moduli elastici così calcolati dipende dal fatto che il modulo iniziale fa riferimento alla pendenza della curva sforzo deformazione alla prima applicazione del carico, mentre quello stabilizzato viene valutato dopo tre cicli di applicazione del carico. In questo modo si ottiene una minima valutazione della possibile variazione del modulo all'aumentare del numero dei cicli.

2.3.8 Ritiro volumetrico

La misura del ritiro non viene effettuata seguendo perfettamente la normativa UNI EN 12390-16 ^[29] in quanto non si producono e invecchiano dei provini specificatamente per questa prova; si effettuano le misure sui provini realizzati per la misura della resistenza a compressione. La temperatura di stagionatura risulta essere quella interna al laboratorio (considerando una temperatura ambiente si può ipotizzare mediamente di 25°C) e non i 22°C da normativa ^[29]. L'umidità risulta difficile da misurare e impossibile da mantenere costante in quanto dipende dalle condizioni ambientali del periodo d'invecchiamento; non risulta quindi combaciare con il 50/70% previsto da normativa ^[29]. Inoltre, non si utilizzano provini cilindrici o prismatici ma cubici. Per massimizzare la precisione delle misure si utilizzerà un calibro come in figura 39.



Figura 39 Misura della lunghezza del lato per la valutazione del ritiro del provino

I provini devono essere realizzati entro un'ora da quando inizia la miscelazione dell'acqua con il cemento e sformati dopo circa ventiquattro ore. La lunghezza di riferimento che si considera è il lato dello stampo del provino, 150 mm. La misura della diminuzione della lunghezza del lato viene effettuata a 7 e 28 giorni di stagionatura, si sceglie di non effettuarla a 24 ore in quanto il ritiro

risulterebbe impercettibile e di conseguenza non misurabile. Per ogni misura si valuta il ritiro utilizzando l'equazione 22.

$$\varepsilon_{CS}(t, t_0) = [L_0 - l_{CS}(t)]/L_0 \quad [22]$$

Dove:

$\varepsilon_{CS}(t, t_0)$ è la deformazione da ritiro totale del provino al tempo t

L_0 è la lunghezza di riferimento espressa in mm

$l_{CS}(t)$ è la lunghezza al tempo t espressa in mm

3. Risultati

Non vengono effettuate tutte le prove su tutte le miscele. In particolare, il rapporto acqua/cemento viene effettuato solo due volte in quanto è un'analisi che non fornisce un risultato utile al confronto tra le diverse miscele; serve soprattutto come verifica dell'esecuzione della miscela di calcestruzzo.

Per la miscela di confronto 0 l'unica prova che non viene effettuata è la valutazione sul fresco del rapporto acqua/cemento in quanto non essendo andati a modificare la quantità di acqua rispetto a quella teorica e non avendo dubbi sull'assorbimento degli aggregati si sarebbe determinato un valore di 0.37.

Per le miscele 100A e 100F ottenute aumentando le percentuali di acqua in miscela si effettuano solo prove di massa volumica, slump, rapporto acqua/cemento e prova di compressione a 24 ore. Si sceglie di non effettuare la valutazione del contenuto d'aria e le altre prove meccaniche in quanto la modifica della quantità di acqua porta a una variazione delle proprietà e di conseguenza non risulterebbe possibile effettuare nessun tipo di confronto con la miscela 0. La prova di compressione a 24 ore si effettua per valutare la differenza della resistenza raggiunta rispetto alle miscele 100A e 100F ottenute aumentando la quantità di super-fluidificante e per avere un dato sui possibili errori nei dati di assorbimento.

Le miscele 60A, 60F, 100A e 100F, ottenute aumentando la percentuale di super-fluidificante e considerando saturi gli aggregati, vengono testate allo stesso modo della miscela di confronto. L'aggiunta del super-fluidificante non porta a variazioni delle proprietà meccaniche del calcestruzzo indurito e l'acqua in più rispetto al valore teorico è considerata essenziale e non in eccesso, di conseguenza si potrà effettuare un confronto per le condizioni del calcestruzzo indurito. Il confronto sul fresco dovrà tenere conto della variazione di composizione. Per la preparazione della miscela 100F è stato necessario aumentare ulteriormente la quantità di acqua del 4% oltre a quanto preventivato per poter ottenere una buona omogeneità.

3.1 Prove su calcestruzzo fresco

La misura del rapporto acqua/cemento viene effettuata solamente sulle miscele 100A e 100F a cui è stata aggiunta sola acqua per ottenere l'omogeneità. Il rapporto acqua/cemento teorico iniziale è di 0.37, l'aggiunta di acqua avrebbe dovuto portare ad un aumento fino al valore di 0.43. I risultati ottenuti dalla prova sperimentale vengono riportati in tabella 11.

Miscela	Rapporto acqua/cemento
100A (con aggiunta di acqua)	0.38 ± 0.01
100F (con aggiunta di acqua)	0.36 ± 0.01

Tabella 11 Valori di rapporto acqua/cemento

Visti i dati ottenuti risulta chiara la presenza di un errore nei dati di assorbimento; in alternativa si potrebbe ipotizzare un comportamento degli aggregati riciclati diverso rispetto a quelli da cava a causa della presenza di pasta di cemento indurito intorno agli inerti. Volendo prendere in considerazione l'ipotesi di un comportamento particolare sono state effettuate delle ricerche in letteratura scientifica senza però trovare nulla di rilevante. L'ipotesi dell'errore nella determinazione dell'assorbimento resta la più probabile. Inoltre, la miscela 100F risulta presentare un rapporto acqua/cemento inferiore della 100A nonostante la quantità di acqua aggiunta avrebbe dovuto portare ad un risultato uguale. L'ipotesi più probabile è che l'assorbimento dell'aggregato F sia stato sottostimato maggiormente rispetto all'aggregato A.

Le misure della massa volumica vengono effettuate su tutte le miscele e i risultati si riportano in tabella 12.

Miscela	Massa volumica [kg/m ³]
0	2510 ± 1
60A	2413 ± 1
100A (con aggiunta acqua)	2287 ± 1
100A (con aggiunta super-fluidificante)	2349 ± 1
60F	2421 ± 1
100F (con aggiunta acqua)	2338 ± 1
100F (con aggiunta super-fluidificante)	2268 ± 1

Tabella 12 Valori della massa volumica

Tutte le miscele ottenute con aggregato riciclato presentano una massa volumica inferiore rispetto alla miscela di confronto; risultato che ci si aspettava dato che la massa volumica degli aggregati riciclati a superficie satura asciutta (tabella 3) risulta essere inferiore rispetto a quella degli aggregati da cava. La massa volumica degli aggregati non è la sola possibile motivazione per i risultati ottenuti, è necessario valutare anche la quantità di aria inglobata in quanto più la percentuale di aria risulta essere elevata minore risulta essere la massa volumica del calcestruzzo.

Valutando i dati di massa volumica per le due miscele 100A e per le due miscele 100F si potrebbe ipotizzare che le percentuali di aria inglobata risulterebbero essere più elevate nel caso di aggiunta del super-fluidificante per l'utilizzo di aggregati di tipo F e con sola acqua nel caso di utilizzo di aggregati A. Considerando anche i dati ottenuti dal rapporto acqua/cemento è probabile che l'acqua aggiunta per considerare gli aggregati saturi (9% rispetto all'acqua teorica) non sia sufficiente per gli inerti di tipo F e che gli aggregati assorbano ancora più acqua. Per gli aggregati di tipo A probabilmente si riesce a raggiungere la saturazione e il fluidificante in aggiunta porta ad una migliore compattazione.

Le miscele 60A e 60F presentano all'incirca la stessa massa volumica e i rispettivi aggregati presentano una massa volumica a superficie satura asciutta confrontabile; di conseguenza, la quantità d'aria inglobata dovrebbe risultare simile. Rispetto alla totalità delle miscele contenenti il 100% di aggregati riciclati le miscele al 60% presentano una massa volumica maggiore che però non è dovuta all'utilizzo di sabbia da cava in quanto le masse volumiche sature a superficie asciutta sono

praticamente identiche per tutte le tipologie di aggregati fini. Ne consegue che l'aria inglobata nelle miscele al 60% sia notevolmente inferiore rispetto alle miscele 100% riciclato.

Le misure di aria inglobata si riportano in tabella 13.

Miscela	Quantità d'aria A [%]
0	1.9 ± 0.2
60A	1.0 ± 0.2
100A (con aggiunta super-fluidificante)	1.7 ± 0.2
60F	1.2 ± 0.2
100F (con aggiunta super-fluidificante)	5.1 ± 0.2

Tabella 13 Valori di percentuale di aria inglobata

Dato che la quantità di super-fluidificante influenza la quantità di aria che resta intrappolata non è possibile fare un confronto ideale con la miscela 0. Considerando le miscele che contengono le stesse tipologie di aggregati si nota come la quantità di aria risulta essere maggiore per le miscele al 100% di riciclato, il che spiega anche la minor massa volumica. La quantità di aria inglobata è legata alla fluidità dell'impasto, più facilmente il calcestruzzo si compatta meno aria rimane nell'impasto. Gli esiti delle prove all'abbassamento del cono di Abrams vengono riportati in tabella 14.

Miscela	Abbassamento [mm]
0	70 ± 1
60A	150 ± 1
100A (con aggiunta acqua)	40 ± 1
100A (con aggiunta super-fluidificante)	80 ± 1
60F	150 ± 1
100F (con aggiunta acqua)	10 ± 1
100F (con aggiunta super-fluidificante)	2 ± 1

Tabella 14 Esiti dello slump test

Analizzando i dati ottenuti risulta chiaro che la lavorabilità dell'impasto 100F sia praticamente nulla sia nel caso in cui è stata aggiunta acqua che nel caso in cui si è aggiunta sia acqua che super-fluidificante; non è possibile legare il comportamento solo ad una minore presenza di materiale fine in quanto, dalla tabella 6, risultano delle percentuali di materiale passante al setaccio da 0.063 mm inferiori per l'aggregati di tipo A ma non si osserva lo stesso comportamento nel calcestruzzo. È possibile ipotizzare che l'assorbimento degli aggregati F sia stato sottostimato in maniera più importante rispetto all'aggregato A e che, di conseguenza, abbia assorbito molta più acqua andando a diminuire la lavorabilità dell'impasto. I dati in tabella 11 confermerebbero questa ipotesi insieme al fatto che è stato necessario fare un'ulteriore aggiunta di acqua durante la preparazione dell'impasto.

La presenza di una minore percentuale di super-fluidificante nella miscela 0 ovviamente porta all'impossibilità di un confronto vero e proprio rispetto al comportamento delle altre miscele.

Analizzando i risultati delle miscele al 60% e 100% contenenti la stessa tipologia di aggregati è possibile confermare l'ipotesi sulla mancanza di fino. Avendo sostituito quasi il 40% di aggregato fine con sabbia vergine, che presenta una percentuale di fino certificata notevolmente più elevata rispetto all'aggregato da recupero, si è notato un aumento elevato della lavorabilità.

La condizione di lavorabilità molto bassa della miscela 100F ottenuta con l'aggiunta di super-fluidificante è certamente una delle cause del valore molto elevato di aria inglobata. Questo potrebbe portare a una resistenza a compressione limitata.

3.2 Resistenza a compressione

L'obiettivo di resistenza a compressione che ci si è prefissati di raggiungere è minimo 60 MPa anche se, dato il rapporto acqua/cemento utilizzato, è chiaro che per la miscela di confronto il valore di soglia verrà superato. Ci si aspetta di trovare dei valori più elevati di 60 MPa anche per le miscele contenenti aggregati riciclato dato che la sottostima dell'assorbimento al più può portare ad un miglioramento della resistenza. L'unica miscela che potrebbe non raggiungere la resistenza minima richiesta è la 100F con aggiunta di super-fluidificante a causa dell'elevata percentuale di aria inglobata. In tabella 15 si riportano i risultati ottenuti dallo schiacciamento dei provini cubici.

Miscela	24 ore [MPa]	7 giorni [MPa]	28 giorni [MPa]
0	51.3 ± 0.1	68.2 ± 0.1	90.3 ± 0.1
	54.8 ± 0.1	71.7 ± 0.1	91.8 ± 0.1
60A	46.7 ± 0.1	64.4 ± 0.1	77.4 ± 0.1
	50.2 ± 0.1	64.9 ± 0.1	72.7 ± 0.1
100A (con aggiunta di acqua)	37.2 ± 0.1	-	-
	35.2 ± 0.1	-	-
100A (con aggiunta di super-fluidificante)	45.5 ± 0.1	65.9 ± 0.1	66.8 ± 0.1
	44.7 ± 0.1	66.4 ± 0.1	72.3 ± 0.1
60F	57.0 ± 0.1	76.8 ± 0.1	72.4 ± 0.1
	59.6 ± 0.1	76.8 ± 0.1	77.2 ± 0.1
100F (con aggiunta di acqua)	50.9 ± 0.1	-	-
	51.1 ± 0.1	-	-
100F (con aggiunta di super-fluidificante)	48.8 ± 0.1	58.2 ± 0.1	66.8 ± 0.1
	44.9 ± 0.1	54.4 ± 0.1	70.6 ± 0.1

Tabella 15 Valori della resistenza a compressione

È stato verificato che tutte le coppie di dati presentino una differenza inferiore del 9% come da normativa ^[26]; non è stato necessario ripetere la prova su di un terzo provino. Anche solo osservando i valori a ventiquattro ore è possibile notare come le miscele contenenti il 60% di aggregato riciclato

raggiungano una resistenza maggiore rispetto a quelle costituite da solo aggregato riciclato. Considerando le percentuali di aria inglobata in tabella 13 il risultato era prevedibile dato che la tipologia di sabbia influisce in maniera minima sulle resistenze finali. Sicuramente l'elevata percentuale di aria nella miscela 100F con aggiunta di super-fluidificante ha influenzato notevolmente la resistenza ottenuta perché, viste le differenze tra le resistenze delle miscele A, ci si sarebbe potuti aspettare dei valori molto più elevati e simili a quelli ottenuti dalla miscela 60F. Dai valori ottenuti risulta anche che le miscele ottenute con frantumato F presentino dei risultati più simili alla miscela 0 rispetto alle miscele ottenute con aggregato A; il risultato era previsto data la presenza di aggregati basaltici all'interno del frantumato F. Risulta invece essere più inaspettato il valore di resistenza della miscela 60F che non solo raggiunge, ma va anche a superare la resistenza della miscela di confronto. Inoltre, viste le resistenze ottenute dalla miscela 100F ottenuta con aggiunta di sola acqua è possibile pensare che, se si fosse raggiunta una buona compattazione anche in caso di aggiunta di super-fluidificante, si sarebbero potuti ottenere dei risultati molto prossimi o addirittura superiori alla miscela di confronto.

Raggiunti i sette giorni di stagionatura è possibile notare come l'unica miscela che non ha ancora raggiunto i 60 MPa previsti sia la 100F. La stagionatura non è stata uniforme per tutte le miscele; è possibile misurare degli incrementi percentuali medi di resistenza a compressione differenti. Le miscele 0, 60A e 60F hanno presentato un incremento del 30% circa; la miscela 100F del 20% e la miscela 100A quasi del 50%. Dato che l'incremento risulta essere non uniforme per tutte le miscele non risulta possibile fare una previsione sulla resistenza a compressione che andranno a raggiungere a ventotto giorni di stagionatura.

Avendo utilizzato lo stesso cemento per tutte le miscele il differente comportamento in stagionatura è da imputare solamente al comportamento degli aggregati. È possibile ipotizzare che sia l'aggregato fine a portare ad una variazione del comportamento visto che le tre miscele che contengono la stessa tipologia di sabbia presentano lo stesso incremento percentuale di resistenza. Per trovare una possibile spiegazione al comportamento della sabbia di tipologia A sono state effettuate delle ricerche in letteratura scientifica. EA. Ohemeng e SO. Ekolu ^[30] hanno raccolto gli esiti di molteplici studi che trattano della possibile riattivazione del cemento, anche se arrivano alla conclusione che questo avvenga dopo dei trattamenti, principalmente di tipo termico. In uno studio, condotto proprio su degli aggregati da riciclo ottenuti da traverse ferroviarie, S. Yang e Y. Lim ^[31] hanno però riportato come il cemento indurito si comporti come aggregato in fase di preparazione del mix e come cemento ad indurimento avvenuto; come se avvenisse una parziale riattivazione anche senza trattamento termico. Potrebbe essere possibile che il cemento indurito macinato fine presenti una parziale riattivazione nonostante non abbia subito nessun trattamento termico. Per la miscela 100F è complicato fare ipotesi, le porosità interne rendono più facile sia la formazione di una cricca sia la sua propagazione. Quindi, se anche la sabbia F si comportasse come la sabbia A non sarebbe possibile valutarlo.

La rottura dei provini a ventiquattr'ore e a sette giorni è stata dello stesso tipo su tutti i provini; considerando le figure 33 e 40, che mostra un esempio di rottura a sette giorni, è possibile affermare che le rotture sono valide.



Figura 40 Rottura esempio di un provino a sette giorni di stagionatura

La tipologia di rottura a ventotto giorni risulta essere di tipologia pressoché piramidale, come mostrato in figura 41, e accettabile secondo l'immagine 33. Tutti i provini hanno mostrato la stessa modalità di rottura.



Figura 41 Rottura esempio di un provino a ventotto giorni di stagionatura

I risultati ottenuti a ventotto giorni di stagionatura mostrano come le resistenze a compressione raggiunte con aggregati riciclati non siano paragonabili a quelle ottenute da aggregati da cava; superano però la resistenza minima richiesta dallo studio. Entrambe le miscele al 60% raggiungono delle resistenze di circa 75 MPa, indipendentemente dalle resistenze ottenute nei giorni precedenti.

Anche le miscele al 100% mostrano lo stesso comportamento raggiungendo però la resistenza di solo 70 MPa circa. Le miscele 100A e 60F mostrano un comportamento particolare, superati i sette giorni di stagionatura non mostrano un aumento della resistenza a compressione. Le miscele 60A e 100F mostrano un andamento della resistenza più simile alla miscela di confronto, anche se spostate verso resistenze inferiori. Gli andamenti delle resistenze vengono riportati in figura 42.

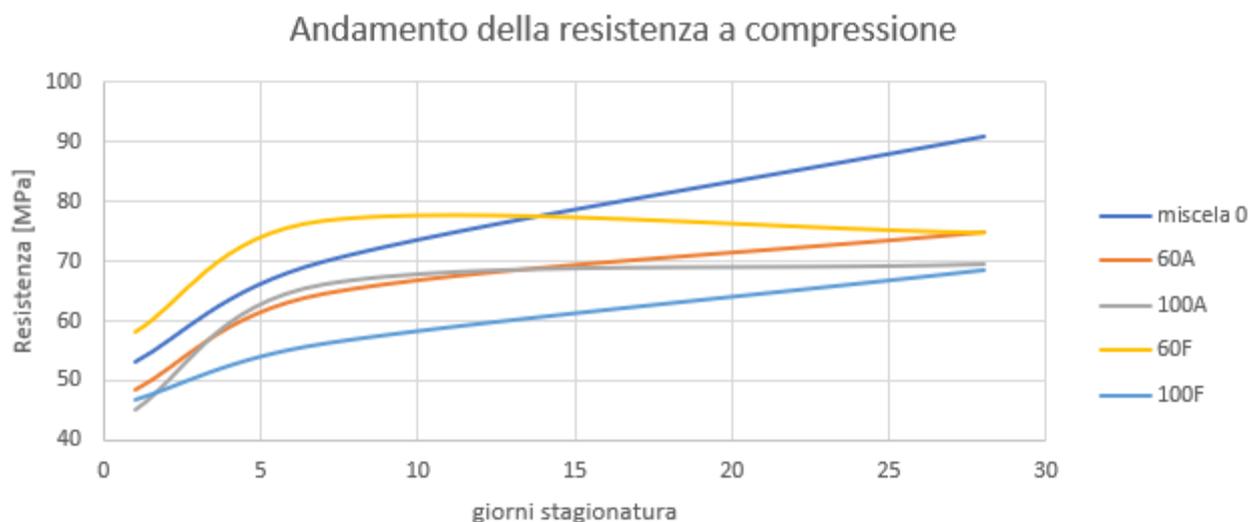


Figura 42 Aumento delle resistenze durante il processo di maturazione

Il comportamento della miscela 60F risulta essere il più anomalo; a ventotto giorni presenta una resistenza media inferiore rispetto a quella misurata a sette giorni. Osservando però i risultati in tabella 15 è possibile notare che uno dei due risultati ottenuti a ventotto giorni risulta essere maggiore rispetto a quelli ottenuti a sette; è anche possibile che i 72.4 MPa, che hanno abbassato la media, siano dovuti a un difetto all'interno del provino e non siano indice del fatto che il calcestruzzo perde di resistenza. L'ipotesi che gli aggregati F non causino una perdita di resistenza dopo sette giorni di stagionatura è avvalorata dal fatto che la miscela 100F non mostra un comportamento simile.

Il fatto che la resistenza a ventotto giorni delle miscele al 60% sia pressoché uguale potrebbe indicare il fatto che; con simili valori di lavorabilità, massa volumica e aria inglobata, la massima resistenza a compressione raggiungibile si attesti poco sotto gli 80 MPa indipendentemente dalla tipologia di aggregati riciclati. Il problema di questa ipotesi consiste nel fatto che anche le miscele al 100% mostrano un andamento simile ma non presentano uguali caratteristiche sul fresco.

Trascorsi ventotto giorni dal momento del getto è possibile che il calcestruzzo aumenti ulteriormente la propria resistenza a compressione; solitamente l'aumento è talmente piccolo che viene trascurato. Visti i comportamenti delle miscele con aggregato riciclato si potrebbe pensare di effettuare delle ulteriori prove di compressione a tempi di stagionatura più elevata; in questo modo sarebbe possibile valutare se le resistenze di 75 MPa circa raggiunte dalle miscele al 60% e di 70 MPa circa delle miscele al 100% siano le massime raggiungibili. Soprattutto per le miscele 60A e 100F sarebbe interessante capire se, raggiunto il plateau delle miscele 60F e 100A, l'andamento resti pressoché costante o se si mantenesse il valore raggiunto. Se si ottenessero dei plateau alle stesse resistenze si potrebbe ipotizzare che la massima resistenza a compressione raggiungibile con gli aggregati riciclati siano 75 MPa (per il rapporto acqua cemento utilizzato) a causa della pasta di cemento presente

intorno agli inerti e a possibili danneggiamenti degli aggregati causati dalla fatica; in questo caso la massima resistenza raggiunta dipenderebbe solamente dalle caratteristiche del calcestruzzo fresco, come aria inglobata e lavorabilità, e non dalla tipologia di aggregato riciclato utilizzato. Questa situazione sarebbe ideale perché significherebbe che sarebbe possibile utilizzare aggregati tutti insieme indipendentemente da anno e produttore senza temere che aggregati con caratteristiche inferiori peggiorino la resistenza del calcestruzzo. Se invece si registrasse un aumento significativo della resistenza a compressione il comportamento sarebbe più complicato da spiegare in quanto non coinvolge le miscele contenenti la stessa tipologia di aggregati.

3.3 Resistenza a flessione

Tendenzialmente quando un calcestruzzo deve resistere a flessione presenta internamente un'armatura in acciaio. Di conseguenza la maggior parte del carico non risulta gravare sul calcestruzzo ma sull'armatura; è però essenziale che il calcestruzzo non si fessuri o si rischia il degrado accelerato delle armature.

La progettazione della miscela non viene fatta con l'obiettivo di ottenere una resistenza a flessione minima, ma maggiore risulta essere il risultato maggiori saranno le possibili applicazioni della miscela in esame. I risultati della resistenza a flessione a ventotto giorni di stagionatura vengono riportati in tabella 16.

Miscela	$f_{cl,fl}$ [MPa]
0	6.5 ± 0.2
	6.3 ± 0.2
	6.6 ± 0.2
60A	5.6 ± 0.2
	6.2 ± 0.2
	6.0 ± 0.2
100A (con aggiunta super-fluidificante)	5.7 ± 0.2
	5.4 ± 0.2
	5.7 ± 0.2
60F	5.8 ± 0.2
	5.9 ± 0.2
	6.0 ± 0.2
100F (con aggiunta super-fluidificante)	5.4 ± 0.2
	5.3 ± 0.2
	5.2 ± 0.2

Tabella 16 Valori di resistenza a flessione a 28 giorni

Come per la resistenza a compressione la miscela di confronto presenta dei valori di resistenza alla flessione maggiori rispetto alle miscele contenenti aggregati riciclati; la differenza di resistenza è mediamente del 12% circa, leggermente inferiore al 17% di differenza media tra la resistenza a

compressione della miscela di confronto con le miscele al 60%. Le miscele al 60% di aggregato riciclato presentano delle resistenze a flessione leggermente maggiori rispetto alle miscele al 100%; considerando le differenze di aria inglobata il risultato rispetta quanto ci si aspettava di trovare. L'aria inglobata non è l'unico fattore che influenza la resistenza a flessione, altrimenti si sarebbero trovati dei valori per le miscele al 60% maggiori rispetto alla miscela di confronto. Durante l'applicazione di un carico per flessione una parte del provino subisce uno sforzo a trazione (la parte sui punti di appoggio) e l'altra uno sforzo di compressione (il lato su cui si applica il carico); la rottura avviene nella zona soggetta a trazione a causa dei difetti presenti nel materiale. Per difetti non s'intende solo l'aria che resta bloccata all'interno della miscela, ma anche i difetti presenti negli aggregati e le porosità causate dal ritiro del cemento. Ipotizzando un ritiro pressoché omogeneo per tutti i provini la causa della minore resistenza deve essere ricercata nei difetti degli aggregati. Sapendo che gli assorbimenti degli aggregati riciclati sono più elevati rispetto a quelli degli aggregati da cava e che l'assorbimento dipende dalle porosità dell'aggregato è possibile dire il cedimento dei provini si sia verificato, almeno per le miscele al 60%, all'interno degli aggregati e non a causa delle porosità del calcestruzzo. Per la miscela 100F molto probabilmente la rottura è stata causata dalle porosità causate dall'aria inglobata, dato che la percentuale risulta essere elevata.

La miscela 60F presenta dei risultati leggermente inferiori rispetto alla miscela 60A; probabilmente a causa della presenza di pezzetti di plastica all'interno che, potrebbero non essersi legati in maniera ottimale con la pasta di cemento. Se così fosse si sarebbero potute formare delle zone a elevata concentrazione di difetti portando ad una minore resistenza.

Le differenze di resistenza a flessione tra miscele contenenti aggregati di diversa tipologia risultano essere minime; è possibile dire che l'utilizzo di aggregati in miscela non porti a una perdita di resistenza rispetto all'utilizzo di aggregati separati in base alla tipologia.

Nonostante le miscele contenenti aggregati riciclati presentino delle resistenze a flessione inferiori rispetto a quella contenente aggregati da cava la differenza non è tale da impedirne un possibile utilizzo per applicazioni in cui sia presente l'applicazione di un carico a flessione.

3.4 Misura del modulo elastico

Conoscere il valore del modulo elastico a compressione è importante perché permette di conoscere la deformazione che subisce il calcestruzzo sotto l'applicazione di uno sforzo. Gli esiti della prova effettuata a ventotto giorni di stagionatura vengono riportati in tabella 17.

Miscela	$E_{c,0}$ [GPa]	$E_{c,s}$ [GPa]
0	41.7 ± 0.1	44.1 ± 0.1
	41.5 ± 0.1	43.2 ± 0.1
	44.4 ± 0.1	44.7 ± 0.1
60A	42.4 ± 0.1	41.0 ± 0.1
	40.2 ± 0.1	43.6 ± 0.1
	40.9 ± 0.1	43.2 ± 0.1

Miscela	$E_{c,0}$ [GPa]	$E_{c,s}$ [GPa]
100A (con aggiunta super-fluidificante)	36.4 ± 0.1	40.2 ± 0.1
	37.4 ± 0.1	39.5 ± 0.1
	39.4 ± 0.1	37.7 ± 0.1
60F	36.9 ± 0.1	38.2 ± 0.1
	37.2 ± 0.1	40.0 ± 0.1
	39.4 ± 0.1	41.9 ± 0.1
100F (con aggiunta super-fluidificante)	28.2 ± 0.1	29.7 ± 0.1
	31.2 ± 0.1	32.4 ± 0.1
	34.0 ± 0.1	35.3 ± 0.1

Tabella 17 Valori del modulo elastico a ventotto giorni di stagionatura

I risultati ottenuti dalla valutazione del modulo elastico presentano gli stessi andamenti delle misure di resistenza a compressione e a flessione; la miscela di confronto è quella che presenta i risultati migliori seguita dalle miscele contenenti il 60% di aggregato riciclato.

La miscela 60A presenta dei risultati molto simili alla miscela di confronto; è possibile che la maggiore densità del calcestruzzo compensi le inferiori caratteristiche dei aggregati riciclati. Lo stesso comportamento non si osserva con la miscela 60F che presenta dei risultati più simili alla miscela 100A. È molto probabile che la motivazione sia legata alla presenza di pezzetti di plastica all'interno della miscela dato che i materiali polimerici presentano dei moduli elastici notevolmente inferiori al calcestruzzo. Le miscele al 100% di aggregato riciclato presentano lo stesso comportamento delle miscele al 60%, solo presentano dei moduli inferiori.

La presenza di plastica mescolata agli aggregati di tipo F rappresenta un problema non indifferente; causano una diminuzione del modulo mediamente del 8% (calcolato considerando la media dei moduli secanti iniziali delle miscele 60A e 60F). Nell'ottica di utilizzare tutte le tipologie di aggregati miscelate insieme l'abbassamento del modulo elastico causato dagli aggregati F rappresenta un limite. È necessario riuscire a rimuovere tutta la plastica che contamina gli aggregati prima di procedere alla produzione del calcestruzzo.; specialmente i pezzi di dimensione maggiore presenti nelle frazioni 6.3-12.5 e 8-16 mm.

Tenendo conto dei risultati è chiaro che gli aggregati riciclati presentino dei moduli elastici inferiori rispetto agli aggregati da cava e che quindi non risulta possibile eguagliare i risultati della miscela di confronto anche se il calcestruzzo presenta meno aria all'interno. Lo stesso comportamento viene osservato per tutte le caratteristiche valutate.

3.5 Ritiro volumetrico

La misura del ritiro viene effettuata sui lati del provino che erano a contatto con le pareti della cassaforma per rendere la misura più precisa vista la planarità di tali lati. In tabella 18 si riportano gli esiti delle misure.

Miscela	Ritiro a 7 giorni	Ritiro a 28 giorni
0	0	$(0.1 \pm 0.1) * 10^{-3}$
60A	0	$(0.2 \pm 0.1) * 10^{-3}$
100A (con aggiunta super-fluidificante)	0	$(0.1 \pm 0.1) * 10^{-3}$
60F	0	$(0.2 \pm 0.1) * 10^{-3}$
100F (con aggiunta super-fluidificante)	0	$(0.2 \pm 0.1) * 10^{-3}$

Tabella 18 Misure del ritiro

A sette giorni di stagionatura il ritiro risulta essere troppo piccolo per essere misurato con il calibro.

I valori di ritiro a ventotto giorni sono tutti confrontabili. A causa delle piccole dimensioni del provino i risultati sono affetti da un errore molto grande e, di conseguenza non possono essere considerati dei valori attendibili. Per ottenere dei risultati ottimali sarebbe necessario ripetere la misura utilizzando dei provini di dimensione maggiore e uno strumento di misurazione che permetta di avere una precisione superiore al centesimo di millimetro; come il micrometro.

Per una valutazione ottimale del ritiro sarebbe necessario effettuare una misura della variazione di dimensione a stagionature più avanzate, la normativa ^[29] indica come tempi standard 56 e 90 giorni.

4. Conclusioni

Dai dati ottenuti e dalle analisi fatte risulta evidente la necessità di una nuova valutazione degli assorbimenti d'acqua degli aggregati grossolani utilizzati per la preparazione delle miscele di calcestruzzo; in quanto, i risultati ottenuti dall'analisi del rapporto acqua/cemento presentano delle incongruenze con il valore teorico che ci si sarebbe aspettati di trovare. Viste però le similitudini dei risultati di assorbimento sarebbe consigliabile ripetere la prova anche sugli aggregati che non sono stati utilizzati in quanto, probabilmente, è stato fatto un errore su tutte le misure.

Tenendo conto di tutte le analisi svolte sugli aggregati risulta che presentino delle proprietà simili tra loro. Probabilmente, miscelando tutti gli aggregati appartenenti alla stessa classe granulometrica e utilizzando dei valori medi per i dati necessari alla definizione del mix design, non si incorre in un errore tale da portare all'ottenimento di un calcestruzzo di scarse caratteristiche. L'unico accorgimento da considerare, nel caso nel ripetere le prove di assorbimento si trovassero dei valori per l'aggregato F troppo differenti rispetto agli altri, sarebbe quello di utilizzare un dato di assorbimento calcolato sulla media ponderata delle frazioni di aggregati nella miscela.

Per utilizzare aggregato fine riciclato mantenendo la lavorabilità è risultato necessario aumentare la quantità di super-fluidificante; in un'ottica commerciale non è un risultato positivo. Si potrebbe pensare di sostituire il 50% il fino riciclato con fino da cava, mantenendo la quantità di super-fluidificante e valutare l'ammontare della perdita di lavorabilità per capire se una sostituzione parziale possa bilanciare il problema del costo e della fluidità dell'impasto.

Gli esiti delle prove di resistenza a compressione hanno dato risultati positivi; non è stato possibile raggiungere i valori della miscela ottenuta utilizzando aggregati da cava ma, per tutte le miscele, è stata raggiunta la resistenza minima richiesta di 60 MPa. Le miscele contenenti il 60% di aggregato riciclato raggiungono delle resistenze maggiori delle miscele che ne contengono il 100%; probabilmente a causa della minor quantità di aria inglobata. A lunghi tempi di stagionatura non si sono misurate differenze nelle resistenze in base all'aggregato riciclato; se età e produttore non influenzano la resistenza finale gli aggregati possono essere utilizzati tutti assieme.

È possibile che la presenza di pasta di cemento indurita attorno agli inerti renda gli aggregati riciclati molto porosi e, di conseguenza, più fragili degli aggregati da cava. Se così fosse potrebbe essere che l'innesco della cricca che ha portato alla rottura dei provini si sia formato all'interno degli aggregati; In questo caso non potrebbe essere possibile utilizzare gli aggregati riciclati per calcestruzzi con resistenza minima richiesta superiore a 70-75 MPa. Per avvalorare o confutare questa ipotesi è necessario effettuare ulteriori prove sviluppando delle miscele che, teoricamente, dovrebbero raggiungere resistenze sia maggiori che inferiori a quella considerata in questo studio. Un'altra prova che sarebbe possibile fare consiste nella sostituzione parziale degli aggregati grossi riciclati con aggregati grossi da cava; se la cricca si formasse internamente alla pasta di cemento intorno agli inerti la rottura dovrebbe avvenire all'incirca allo stesso sforzo applicato.

È possibile che la presenza di porosità all'interno della pasta di cemento indurita porti alla presenza di un massimo di resistenza a flessione; similmente a come accade per la resistenza a compressione. Il fatto che le miscele al 60% di aggregato riciclato presentino una resistenza a flessione inferiore rispetto alla miscela di confronto, nonostante la minore aria inglobata, confermerebbe questa ipotesi.

I limiti di resistenza che si è dimostrato si possano ottenere, sia a flessione che a compressione, utilizzando aggregati riciclati con provenienza da traverse ferroviarie dismesse risultano essere inferiori rispetto a quelli ottenibili con aggregati da cava ma comunque più che sufficienti per giustificare ulteriori studi sull'argomento.

Le analisi sul modulo elastico hanno confermato quanto emerso dalle altre analisi; le caratteristiche meccaniche degli aggregati riciclati sono inferiori a quelli da cava e non permettono di ottenere calcestruzzo con le stesse caratteristiche. È però necessario tenere presente che la miscela di confronto prodotta presenta delle caratteristiche superiori a quelle della maggior parte dei calcestruzzi prodotti e che la maggior parte delle applicazioni non richiede tali performance. Di conseguenza, è possibile dire che l'utilizzo di aggregati riciclati sia sconsigliabile nel momento in cui si desidera ottenere un calcestruzzo molto performante ma che sia assolutamente possibile utilizzarli nel caso di calcestruzzo a cui sono richieste caratteristiche limitate.

I risultati delle prove meccaniche effettuate, indipendentemente dalla bontà dei dati ottenuti, non risultano essere esaustivi per determinare se sia possibile sostituire totalmente o parzialmente gli aggregati da cava con aggregati riciclati; è necessario valutare anche proprietà chimiche e fisiche del calcestruzzo. Particolare attenzione deve essere riposta nella valutazione della resistenza al gelo/disgelo del calcestruzzo visti i risultati ottenuti sulle analisi degli aggregati.

Appendice A – Curve granulometriche

Per la costruzione delle curve granulometriche del materiale riciclato si è misurata la massa trattenuta ai setacci. Per gli aggregati da cava si sono utilizzati dati interni all'azienda Overall. In tabella A1 si riportano le percentuali passanti ai setacci per gli aggregati da cava.

Apertura setacci [mm]	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm
20			100
16			97.5
14			74.4
12.5		100	51.3
10		82.1	27
8	100	64.2	2.7
6.3	99.7	15.4	
4	96.4	1	
2	74.9		
1	47.1		
0.5	29.6		
0.25	18.1		
0.125	11.2		
0.063	2.2	0.5	0.5

Tabella A 1 Percentuali passanti ai setacci dell'aggregato da cava

Per calcolare le percentuali passanti al setaccio partendo dalle masse trattenute si è utilizzata l'equazione A1.

$$\%_i = 100 - \frac{100 \cdot R_i}{R_n} \quad [A1]$$

Dove:

$\%_i$ è la percentuale passante al setaccio i

R_i è la massa cumulativa trattenuta dal setaccio i

R_n è la massa totale del materiale sottoposto a setacciatura

In tabella A2 si riportano le masse trattenute e le rispettive percentuali passanti degli aggregati ottenuti con la frantumazione delle traverse di tipo "A".

Apertura setacci [mm]	Masse trattenute [g]			Percentuali passanti		
	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm
16			0 ± 0.5			100
14			44 ± 0.5			98.2
12.5		0 ± 0.5	374.5 ± 0.5		100	84.5
10		154.5 ± 0.5	1258 ± 0.5		93.7	48.1
8		968 ± 0.5	2059 ± 0.5		60.4	15.0
6.3	0 ± 0.5	1905.5 ± 0.5	2421 ± 0.5	100	22.0	1.2
4	15.5 ± 0.5	2438.5 ± 0.5		98.5	0.12	
2	286.5 ± 0.5	2439.5 ± 0.5		73.1	0.08	
1	619 ± 0.5			41.9		
0.5	825.5 ± 0.5			22.6		
0.25	950.5 ± 0.5			10.8		
0.125	1023 ± 0.5			4.0		
0.063	1053 ± 0.5	2440.5 ± 0.5	2422.5 ± 0.5	1.2	0.04	0.02
Fondo	1066 ± 0.5	2441.5 ± 0.5	2423 ± 0.5			

Tabella A 2 Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "A"

In tabella A3 si riportano le masse trattenute e le rispettive percentuali passanti degli aggregati ottenuti con la frantumazione delle traverse di tipo "B".

Apertura setacci [mm]	Masse trattenute [g]			Percentuali passanti		
	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm
20			0 ± 0.5			100
16			0 ± 0.5			100
14		0 ± 0.5	35 ± 0.5		100	98.6
12.5		2 ± 0.5	432 ± 0.5		99.9	82.5
10		199 ± 0.5	1252 ± 0.5		92.0	49.3
8		1086 ± 0.5	2153 ± 0.5		56.2	12.8
6.3	0 ± 0.5	1963 ± 0.5	2430 ± 0.5	100	20.8	1.6
4	19 ± 0.5	2470 ± 0.5	2466 ± 0.5	98.6	0.32	0.16
2	395 ± 0.5	2473 ± 0.5		70.7		
1	760 ± 0.5	2474 ± 0.5		43.6		
0.5	955 ± 0.5			29.1		
0.25	1089 ± 0.5			19.2		
0.125	1230 ± 0.5			8.7		
0.063	1300 ± 0.5	2475 ± 0.5	2469 ± 0.5	3.5	0.12	0.04
Fondo	1347 ± 0.5	2478 ± 0.5	2470 ± 0.5			

Tabella A 3 Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "B"

In tabella A4 si riportano le masse trattenute e le rispettive percentuali passanti degli aggregati ottenuti con la frantumazione delle traverse di tipo "C".

Apertura setacci [mm]	Masse trattenute [g]			Percentuali passanti		
	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm
20			0 ± 0.5			100
16			0 ± 0.5			100
14		0 ± 0.5	60 ± 0.5		100	97.6
12.5		2 ± 0.5	407 ± 0.5		99.9	83.5
10		357 ± 0.5	1467 ± 0.5		84.7	40.4
8		1286 ± 0.5	2220 ± 0.5		44.9	9.8
6.3	0 ± 0.5	1890 ± 0.5	2437 ± 0.5	100	19.0	0.9
4	36 ± 0.5	2310 ± 0.5	2458 ± 0.5	97.6	1.0	0.08
2	445 ± 0.5	2330 ± 0.5		70.8	0.17	
1	812 ± 0.5	2330 ± 0.5		46.8	0.13	
0.5	1127 ± 0.5			26.1		
0.25	1347 ± 0.5			11.7		
0.125	1483 ± 0.5			2.8		
0.063	1514 ± 0.5	2331 ± 0.5	2459 ± 0.5	0.7	0.13	0.04
Fondo	1525 ± 0.5	2334 ± 0.5	2460 ± 0.5		0.13	0.04

Tabella A 4 Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "C"

In tabella A5 si riportano le masse trattenute e le rispettive percentuali passanti degli aggregati ottenuti con la frantumazione delle traverse di tipo "D".

Apertura setacci [mm]	Masse trattenute [g]			Percentuali passanti		
	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm
20			0 ± 0.5			100
16			5 ± 0.5			99.8
14		0 ± 0.5	73 ± 0.5		100	97.0
12.5		9 ± 0.5	234 ± 0.5		99.6	90.4
10		326 ± 0.5	1038 ± 0.5		86.8	57.4
8		1430 ± 0.5	1893 ± 0.5		42.3	22.4
6.3	0 ± 0.5	2100 ± 0.5	2337 ± 0.5	100	15.3	4.2
4	13 ± 0.5	2474 ± 0.5	2434 ± 0.5	99.2	0.2	0.21
2	278 ± 0.5	2477 ± 0.5		81.9	0.08	
1	748 ± 0.5	2477 ± 0.5		51.4	0.08	
0.5	1110 ± 0.5			27.8		
0.25	1321 ± 0.5			14.1		
0.125	1466 ± 0.5			4.7		
0.063	1515 ± 0.5	2478 ± 0.5	2439 ± 0.5	1.5	0.04	0.04
Fondo	1538 ± 0.5	2479 ± 0.5	2439 ± 0.5			

Tabella A 5 Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "D"

In tabella A6 si riportano le masse trattenute e le rispettive percentuali passanti degli aggregati ottenuti con la frantumazione delle traverse di tipo "E".

Apertura setacci [mm]	Masse trattenute [g]			Percentuali passanti		
	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm
20			0 ± 0.5			100
16			20 ± 0.5			99.2
14		0 ± 0.5	71 ± 0.5		100	97.0
12.5		4 ± 0.5	354 ± 0.5		99.8	85.3
10		233 ± 0.5	1201 ± 0.5		90.8	50.0
8	0 ± 0.5	1215 ± 0.5	1897 ± 0.5	100	51.8	21.1
6.3	1 ± 0.5	1995 ± 0.5	2266 ± 0.5	99.9	20.9	5.7
4	36 ± 0.5	2513 ± 0.5	2398 ± 0.5	97.8	0.32	0.25
2	454 ± 0.5	2518 ± 0.5		71.8	0.12	
1	937 ± 0.5	2518 ± 0.5		41.9	0.12	
0.5	1275 ± 0.5			20.9		
0.25	1462 ± 0.5			9.3		
0.125	1573 ± 0.5			2.4		
0.063	1599 ± 0.5	2519 ± 0.5	2403 ± 0.5	0.81	0.08	0.04
Fondo	1612 ± 0.5	2521 ± 0.5	2404 ± 0.5		0.08	0.04

Tabella A 6 Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "E"

In tabella A7 si riportano le masse trattenute e le rispettive percentuali passanti degli aggregati ottenuti con la frantumazione delle traverse di tipo "F".

Apertura setacci [mm]	Masse trattenute [g]			Percentuali passanti		
	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm	0 – 4 mm	6.3 – 12.5 mm	8 – 16 mm
20			0 ± 0.5			100
16			52.5 ± 0.5			97.8
14			295 ± 0.5			87.7
12.5		0 ± 0.5	1018.5 ± 0.5		100	57.5
10		158 ± 0.5	1913 ± 0.5		93.3	20.2
8		1084 ± 0.5	2347 ± 0.5		54.2	2.0
6.3	0 ± 0.5	1900.5 ± 0.5	2392 ± 0.5	100	19.7	0.15
4	12.5 ± 0.5	2364 ± 0.5	2392.5 ± 0.5	98.9	0.08	0.13
2	269.5 ± 0.5	2364.5 ± 0.5		76.7	0.06	
1	660 ± 0.5			42.9		
0.5	886.5 ± 0.5			23.3		
0.25	1025 ± 0.5			11.3		
0.125	1106.5 ± 0.5			4.2		
0.063	1140 ± 0.5	2365 ± 0.5	2395.5 ± 0.5	1.3	0.04	0.02
Fondo	1155.5 ± 0.5	2366	2396 ± 0.5			

Tabella A 7 Masse trattenute e percentuali passanti ai setacci per gli aggregati ottenuti da frantumazione delle traverse di tipo "F"

Appendice B – Curve di miscela

Per la determinazione delle percentuali delle diverse frazioni di aggregati da inserire in miscela è stato necessario procedere a tentativi. In tutti i casi si è partiti inserendo il 50% di materiale fine e il 50% di grosso per poi variare le percentuali in base alla posizione della curva sia rispetto a Fuller sia al fatto che si trovasse o meno all'interno del fuso granulometrico. La curva sperimentale è stata costruita utilizzando l'equazione B1 Utilizzando i dati presenti in appendice A.

$$%_i = \sum_{j=1}^n (%_{ij} * f_j) \quad [B1]$$

Dove:

$%_i$ è la percentuale della curva sperimentale passante al setaccio i

$%_{ij}$ è la percentuale del frantumato j passante per il setaccio i

f_j è la quantità di frantumato j all'interno del mix di calcestruzzo espressa come $\%/100$

In tabella B1 si riportano i dati relativi alla miscela contenete lo 0% di materiale riciclato.

Apertura setacci [mm]	Limite superiore	Fuller	Limite inferiore	0%
20	129.1	111.8	93.3	100
16	115.5	100	83.4	99.1
14	108	93.5	78.0	91.0
12.5	102.1	88.4	73.7	83.0
10	91.3	79.1	65.9	72.3
8	81.6	70.7	59.0	61.6
6.3	72.5	62.7	52.3	54.7
4	57.7	50	41.7	51.4
2	40.8	35.4	29.5	39.9
1	28.9	25	20.9	25.2
0.5	20.4	17.7	14.7	15.9
0.25	14.4	12.5	10.4	9.8
0.125	10.2	8.8	7.4	6.2
0.063	7.2	6.3	5.2	1.4

Tabella B 1 Costruzione della miscela allo 0% di materiale riciclato

In tabella B2 si riportano i dati relativi alle miscele ottenute utilizzando le frazioni di frantumato provenienti dalle traverse di tipo "A".

Apertura setacci [mm]	Limite superiore	Fuller	Limite inferiore	60%	100%
20	129.1	111.8	93.3	100	100
16	115.5	100	83.4	99.9	100
14	108	93.5	78.0	98.4	99.3
12.5	102.1	88.4	73.7	92.8	93.5
10	91.3	79.1	65.9	79.1	78.2
8	81.6	70.7	59.0	62.9	61.6
6.3	72.5	62.7	52.3	53.2	52.5
4	57.7	50	41.7	48.5	49.3
2	40.8	35.4	29.5	37.3	36.6
1	28.9	25	20.9	22.9	21.0
0.5	20.4	17.7	14.7	13.9	11.3
0.25	14.4	12.5	10.4	8.1	5.4
0.125	10.2	8.8	7.4	4.6	2.0
0.063	7.2	6.3	5.2	1.0	0.6

Tabella B 2 Costruzione delle miscele contenenti aggregati da traverse "A"

In tabella B3 si riportano i dati relativi alle miscele ottenute utilizzando le frazioni di frantumato provenienti dalle traverse di tipo "A".

Apertura setacci [mm]	Limite superiore	Fuller	Limite inferiore	60%	100%
20	129.1	111.8	93.3	100	100
16	115.5	100	83.4	99.3	99.4
14	108	93.5	78.0	96.2	96.8
12.5	102.1	88.4	73.7	86.8	88.9
10	91.3	79.1	65.9	74.0	77.4
8	81.6	70.7	59.0	60.9	62.2
6.3	72.5	62.7	52.3	53.7	52.4
4	57.7	50	41.7	48.5	46.6
2	40.8	35.4	29.5	37.7	36.1
1	28.9	25	20.9	23.2	20.2
0.5	20.4	17.7	14.7	14.2	11.0
0.25	14.4	12.5	10.4	8.4	5.3
0.125	10.2	8.8	7.4	4.5	2.0
0.063	7.2	6.3	5.2	1.0	0.6

Tabella B 3 Costruzione delle miscele contenenti aggregati da traverse "F"

È possibile notare come in tutte le costruzioni le percentuali passanti ai setacci ad apertura inferiore non rientrano all'interno del fuso granulometrico. La condizione viene comunque considerata accettabile in quanto, effettuando diverse prove, si è visto che facendo rientrare queste percentuali la curva delle frazioni sperimentali si sarebbe spostata verso l'alto a tal punto da non rientrare nel fuso granulometrico a frazioni superiori. Si è ritenuto più importante rientrare nel fuso per le frazioni superiori in quanto le frazioni fini possiedono delle dimensioni molto simili e di conseguenza potrebbero essere concentrate in un'unica frazione passante per il setaccio a 1 mm.

Bibliografia

- [1] Zhang C., Hu M., Yang X., Miranda-Xicotencatl M., Sprecher B., Di Maio F., Zhong X., Tukker A.; “Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands”; *Journal of Cleaner Production*; v. 266; 2020
- [2] Gschwenter V.L.S., Tubino R.M.C., Ambrós W.M., Miltzarek G.L., Sampaio C.H., Moncunill, J.O., Cazacliu B.G., Dal Molin D.C.C.; “Production of High-Quality Coarse Recycled Aggregates through a Two-Stage Jigging Process”; *Minerals*; 12, 532; 2022; <https://doi.org/10.3390/min12050532>
- [3] Legambiente; “Rapporto cave 2021”
- [4] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti; “Aggiornamento delle <<Norme tecniche per le costruzioni>>”; Supplemento ordinario della “Gazzetta Ufficiale”; n. 42; 20 febbraio 2018 – serie generale
- [5] UNI EN 206, “Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità”, aprile 2021
- [6] UNI 8520-1, “Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l’applicazione della EN 12620 – Parte 1: Designazione e criteri di conformità”, ottobre 2015
- [7] UNI EN 12620, “Aggregati per calcestruzzo”, settembre 2008
- [8] RFI Rete Ferroviaria Italiana Gruppo ferrovie dello Stato Italiane, “Specifica tecnica di fornitura”, RFI TCAR SF AR 03 002 F
- [9] UNI EN 1097-6, “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Parte 6: Determinazione della massa volumica dei granuli e dell’assorbimento d’acqua”, marzo 2022
- [10] UNI 8520-2, “Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l’applicazione della EN 12620 – Parte 2: Requisiti”, maggio 2016
- [11] UNI EN 1367-1, “Prove per determinare le proprietà termiche e la degradabilità degli aggregati – Parte 1: Determinazione della resistenza al gelo e disgelo”, luglio 2007
- [12] UNI EN 1097-3, “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Parte 3: Determinazione della massa volumica in mucchio e dei vuoti intergranulari”, ottobre 2012
- [13] UNI EN 933-1, “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per setacciatura”, febbraio 2012
- [14] UNI EN 933-11, “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Parte 11: Prova di classificazione per i costituenti degli aggregati grossi riciclati”, luglio 2009
- [15] UNI EN 1097-2, “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Parte 2: Metodi per la determinazione della resistenza alla frammentazione”, maggio 2020

- [16] UNI EN 1744-1, "Prove per determinare le proprietà chimiche degli aggregati – Parte 1: Analisi chimica", marzo 2013
- [17] UNI EN 1744-6, "Prove per determinare le proprietà chimiche degli aggregati – Parte 6: Determinazione dell'influenza di un estratto di aggregato riciclato sul tempo di inizio presa del cemento", giugno 2007
- [18] UNI EN 1367-2, "Prove per determinare le proprietà termiche e la degradabilità degli aggregati – Parte 2: Prova al solfato di magnesio", gennaio 2010
- [19] UNI EN 1367-6, "Prove per determinare le proprietà termiche e la degradabilità degli aggregati – Parte 6: Determinazione della resistenza al gelo e disgelo in presenza di sale (NaCl)", novembre 2008
- [20] UNI EN 12390-2, "Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza", agosto 2019
- [21] UNI EN 12350-6, "Prova sul calcestruzzo – Parte 6: Massa volumica", luglio 2019
- [22] UNI EN 12350-1, "Prova sul calcestruzzo fresco – Parte 1: Campionamento e apparecchiatura comune", luglio 2019
- [23] UNI EN 12350-7, "Prova sul calcestruzzo fresco – Parte 7: Contenuto d'aria – Metodo per pressione", febbraio 2022
- [24] UNI EN 12350-2, "Prova sul calcestruzzo fresco – Parte 2: Prova di abbassamento al cono", luglio 2019
- [25] UNI 11201, "Prove sul calcestruzzo fresco – Determinazione del contenuto d'acqua", settembre 2017
- [26] UNI EN 12390-3, "Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini", settembre 2019
- [27] UNI EN 12390-5, "Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 5: Resistenza a flessione dei provini", settembre 2019
- [28] UNI EN 12390-13, "Prova sul calcestruzzo indurito – Parte 13: Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione", dicembre 2013
- [29] UNI EN 12390-16, "Prova sul calcestruzzo indurito – Parte 16: Determinazione del ritiro del calcestruzzo", novembre 2019
- [30] Eric A. Ohemeng, Stephen O. Ekolu; "A review on the reactivation of hardened cement paste and treatment of recycled aggregates"; Magazine of Concrete Research, v. 72; Issue 10; pp. 526-539; May 2020; DOI 10.1680/jmacr.18.00452
- [31] Sungchul Yang, Yujin Lim; "Mechanical strength and drying shrinkage properties of RCA concretes produced from old railway concrete sleepers using by a modified EMW method"; Construction and Building Materials; v. 185; pp. 499-507; 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.074>

Sitografia

[I] <https://gccassociation.org/>

[II] <https://www.encosrl.it/abc-del-calcestruzzo-mix-design-del-calcestruzzo/>

[III] <https://www.master-builders-solutions.com/it-it/products/mastersure/mastersure-hes-1540>