
Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio
Rischi naturali e protezione civile



Tesi di Laurea Magistrale

GLI AGGREGATI RICICLATI

UTILIZZI E PRESTAZIONI ALL'INTERNO DEI CALCESTRUZZI

Relatore:
Prof. Jean Marc Tulliani

Candidato:
Bosio Andrea

Anno Accademico 2019/2020

ELENCO DEI SIMBOLI E ACRONIMI	5
1. INTRODUZIONE	7
1.1 Il rifiuto	8
Codice CER	8
Principale normativa europea sui rifiuti	9
Situazione italiana	10
2. LA PRODUZIONE DI RIFIUTI A VARIE SCALE GEOGRAFICHE	12
2.1 Premessa	12
2.2 La produzione dei rifiuti a scala mondiale	12
2.3 La produzione dei rifiuti a scala europea	13
Premessa	13
La produzione, la gestione e il recupero dei rifiuti in Europa	14
2.4 La produzione dei rifiuti speciali a scala nazionale	16
Premessa	16
Produzione totale dei rifiuti speciali	16
Produzione dei rifiuti speciali per attività economica	17
Il Codice Ateco	17
Produzione dei rifiuti speciali per capitolo dell'Elenco Europeo dei rifiuti	19
2.5 La produzione dei rifiuti speciali a scala locale	20
Premessa	20
Produzione totale dei rifiuti speciali per macroarea geografica e a livello regionale	20
3. LA GESTIONE DEI RIFIUTI SPECIALI NON PERICOLOSI IN ITALIA	22
Premessa	22
Gestione dei rifiuti speciali	22
4. TRACCIABILITÀ DEI RIFIUTI	24
4.1 Il registro di carico e scarico	25
4.2 I formulari di identificazione dei rifiuti (FIR)	26
4.3 Il Modello Unico di Dichiarazione ambientale	26
4.4 Schema di gestione del rifiuto	27
5. I RIFIUTI DA OPERAZIONI DI COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE	28
5.1 Definizione	28
5.2 Trend di produzione e riciclo dei rifiuti da C&D	28
5.3 Obiettivi di riciclaggio	29
5.4 Test di Cessione ai sensi del DM 5 Febbraio 1998	30

6. GLI AGGREGATI RICICLATI	31
6.1 Definizione	31
6.2 Utilizzi	31
6.3 Ciclo produttivo	32
6.4 Tipologie di impianto di trattamento	35
Premessa	35
Impianti di recupero fissi	35
Impianti di recupero mobili	36
6.5 Aggregati per il confezionamento dei calcestruzzi	37
Origine degli aggregati	37
Requisiti degli aggregati	37
Marcatura CE	38
Dichiarazione di prestazione	40
Etichetta CE	40
Documentazione di accompagnamento	40
Nomenclatura	41
Classificazione in base alla massa volumica	41
Classificazione in base alla granulometria	41
Serie di setacci	42
Composizione granulometrica	43
Diametro massimo dell'aggregato	44
7. CARATTERISTICHE DEGLI AGGREGATI RICICLATI E DEI CALCESTRUZZI DERIVATI	45
7.1 Premessa	45
7.2 Proprietà fisico-chimiche	50
Composizione	50
Densità	52
Porosità	54
Assorbimento d'acqua	62
Distribuzione granulometrica e forma	64
Resistenza all'abrasione	65
Permeabilità all'Elío	67
Cessione al Nitrato d'Ammonio	68
7.3 Proprietà meccaniche	70
Slump	70
Resistenza a compressione	76
Resistenza a trazione	83
Resistenza a trazione indiretta	84
Ritiro e deformazione sotto carichi di lunga durata	85
7.4 Metodi di miglioramento della qualità degli aggregati	86
Meccanismi di idratazione del cemento	86
Metodi di miglioramento delle prestazioni degli aggregati riciclati	89
Rimozione malta aderente	92
Trattamento termico	92
Pulizia ultrasonica	93
Immersione in acidi	93
Miglioramento della malta aderente	95
Miglioramento con materiali pozzolanici	95

Differenti metodi di mix	97
Precipitazione di carbonato di calcio	99
Emulsione con polimeri	101
7.5 Metodo di predizione della resistenza a compressione di un RAC	120
“Generalised mix design rules for concrete with recycled aggregates”	120
Caratterizzazione sperimentale degli RCA	120
Caratterizzazione sperimentale degli RAC e modelli dei processi di idratazione	121
Proprietà fisiche degli RCA: il ruolo di AM	122
Mix design per RAC	123
Diagrammi di design e modelli potenziali	124
7.6 Metodo di mix design per i RAC	126
“Equivalent mortar volume”	126
Determinazione delle proporzioni di un mix equivalente contenente soli aggregati naturali	126
Determinazione di RCA e NA nel mix RCA	126
Minimo grado di sostituzione nel mix RCA	128
Massimo contenuto di malta residua nel mix RAC con il 100% di RCA	130
Determinazione del contenuto di malta residua (RMC)	130
Analisi statistica	134
8. IL PROGETTO INIZIALE	137
8.1 Premessa	137
8.2 Inquadramento del lavoro	137
8.2 I materiali utilizzati	139
Aggregati	139
Processo di produzione	142
Naturali	145
Riciclati	147
Ciclo di lavorazione	147
Cemento	156
Additivi e disarmanti	157
Acqua	158
8.3 Metodo di mix design	159
Premessa	159
Descrizione del mix design tradizionale	159
8.4 Prove	161
Prima prova	161
Seconda prova	163
Mix design	164
Lavorabilità, acqua, inerte e additivi	164
Resistenza caratteristica, cemento e rapporto w/c	165
Durabilità, rapporto w/c ed aria inglobata	166
Combinazione degli inerti disponibili	167
Terza prova	172
Quarta prova	173
Quinta prova	173
9. CONCLUSIONI	174
BIBLIOGRAFIA	176

APPENDICE A	187
APPENDICE B	192
APPENDICE C	197
APPENDICE D	203

ELENCO DEI SIMBOLI E ACRONIMI

\emptyset : diametro
 ρ : massa volumica
 AD: air-dried, asciugato all'aria
 ANOVA: ANalysis Of VAriance
 AVCP: Assessment and Verification of Constancy of Performance
 C&D: costruzione e demolizione
 CER: Codice Europeo del Rifiuto
 COD: Chemical Oxygen Demand
 CPR: Regolamento Prodotti da Costruzione
 CRA: Carbonated Recycled Aggregates
 D_{max} : diametro massimo
 DDT: Documento Di Trasporto
 DOE: Designation Of Experiments
 DoP: Declaration of Performance (Dichiarazione di Prestazione)
 E: Modulo elastico
 E_c : Modulo elastico del calcestruzzo contenente CRA
 f_{cc} : Resistenza a compressione di provini cilindrici
 $f_{cm@7d}$: resistenza a compressione a 7 giorni
 $f_{cm@28d}$: resistenza a compressione a 28 giorni
 f_f : Resistenza alla flessione
 f_t : Resistenza alla trazione indiretta
 FA: Ceneri volanti
 FAV: Fibre Artificiali Vetrose
 FG: Fine Gravel
 FIR: Formulario di Identificazione dei Rifiuti
 FPC: Factory Production Control
 G: Gravel
 ITZ: Interfacial Transition Zone
 MUD: Modello Unico di Dichiarazione ambientale
 MCA: Materiali Contenenti Amianto
 MIP: Mercury Intrusion Porosimetry
 MMA: Metodo di mix della malta
 NAC: Natural Aggregate Concrete
 NCA: Natural Concrete Aggregates, rappresentanti sia le frazioni granulometriche fini che grosse
 NL: Nano calcari
 NS: Nano silice
 NSM: Nuovi Stati Membri
 NTC: Norme Tecniche per le Costruzioni
 OD: over-dried, asciugato in forno
 OTM: Metodo di miscelazione tripla ottimizzato
 PVA: Alcool polivinilico
 RAU: Rifiuti Assimilabili agli Urbani
 RAC: Recycled Aggregate Concrete
 RCA: Recycled Concrete Aggregates, rappresentanti sia le frazioni granulometriche fini che grosse
 RFA: Recycled Fine Aggregates
 RH: umidità relativa
 RILEM: International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
 RS: Rifiuti Speciali
 RS NP: Rifiuti Speciali Non Pericolosi
 RS P: Rifiuti Speciali Pericolosi
 RU: Rifiuti Urbani

S: Sabbia
SEM: Scanning Electron Microscope
SEMA: Approccio di mix nella sabbia
SF: Fumi di silice
SSD: saturated-surface dry, saturo a superficie asciutta
TdC: Test di Cessione
TM: Metodo di miscelazione tripla
TSMA: Metodo di mix in due stadi
TUA: testo unico ambientale
TU: Testo Unico sulla sicurezza sul lavoro
UE15: Unione Europea a 15 stati
UE28: Unione Europea a 28 stati
WA: Water Absorbition
w/c: rapporto acqua/cemento

1. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo, grazie alla facilità di produzione e del reperimento dei materiali costituenti, nonché alle buone prestazioni meccaniche che garantisce, è ad oggi il materiale da costruzione più utilizzato al mondo.

La presenza del cemento nel suo impasto, ed in particolare del clinker, rende però questo materiale tutt'altro che ecosostenibile. Infatti, il calcestruzzo pur avendo una bassa energia incorporata (1-2 MJ/kg) concorre pesantemente all'inquinamento ambientale. Questo perché uno dei suoi costituenti, il cemento, è prodotto annualmente in gran quantità, circa 4Gt.

L'utilizzo degli aggregati naturali rappresenta un altro aspetto problematico in campo ambientale. Nelle strutture realizzate con calcestruzzo ordinario l'energia necessaria è ripartita al 90% per la produzione delle materie prime, soprattutto del clinker, e il restante 10% per il confezionamento del calcestruzzo, il suo trasporto e per l'utilizzo. Questo significa che, se si vuole progettare in un'ottica maggiormente ecologica, è necessario selezionare calcestruzzi aventi un basso impatto ambientale in termini di "carbon footprint" (ovvero produzione di CO₂), "embodied energy" (energia incorporata) e "water footprint", riducendo anche la massa complessiva di calcestruzzo impiegato nelle opere civili.

Valutando il ciclo di vita di questo materiale si può osservare come esso ricada, a fine ciclo di vita, nei cosiddetti rifiuti da costruzione e demolizione per cui è destinato alla demolizione ed al deposito in discarica. Considerata l'abbondante presenza di manufatti e strutture in calcestruzzo, non stupisce che una componente considerevole dei rifiuti prodotti annualmente sia legata alla loro demolizione.

In quest'ottica di riduzione dell'impatto ambientale una possibilità per ridurre l'impronta ambientale del calcestruzzo è utilizzare aggregati riciclati provenienti dal trattamento dei rifiuti da C&D, in sostituzione agli aggregati naturali utilizzati ordinariamente. Oltre a ridurre l'inquinamento ambientale, la sostituzione tra questi due inerti riduce lo sfruttamento del suolo dovuto all'estrazione dell'aggregato naturale, oltre a portare altri innumerevoli vantaggi quali:

- la limitazione degli aggregati naturali ad usi specifici per cui gli aggregati riciclati non siano in grado di soddisfare in parte le prestazioni richieste;
- la riduzione del problema dello smaltimento dei rifiuti operata recuperando i rifiuti da C&D, i quali ne costituiscono la principale voce di produzione, in Europa e in Italia, sia in termini volumetrici sia di peso, evitando la formazione di discariche o peggio il fenomeno dell'abbandono dei rifiuti nell'ambiente con i relativi costi sociali che la cosa comporta;
- avere costi di fornitura di mercato generalmente più bassi degli aggregati naturali.

L'utilizzo degli aggregati riciclati tuttavia finora non ha avuto molto successo. Da diverse analisi di settore emerge che le principali cause di questo mancato decollo commerciale sono:

- la mancanza di certezza sulle caratteristiche tecniche degli aggregati riciclati dovuta all'estrema variabilità delle fonti;
- la difficoltà nel reperimento di tale materia prima seconda;
- l'assenza di offerta di aggregati riciclati nel territorio di competenza;
- il mancato sviluppo di adeguate miscele.

Lo scopo della presente tesi era quello di analizzare, in via sperimentale, il comportamento di alcuni aggregati riciclati, prodotti dalla F.G. srl, all'interno dei calcestruzzi, per arrivare allo sviluppo di una miscela che potesse avere sbocchi commerciali. L'attività sperimentale è stata interrotta a causa dell'emergenza Covid-19 perciò è stato ripensato il lavoro di tesi implementando una ricerca bibliografica su tali materie prime secondarie.

Il lavoro che verrà presentato si strutturerà inizialmente fornendo un quadro generale riguardante la produzione dei rifiuti a diverse scale geografiche, prestando attenzione ai rifiuti speciali e in particolare ai rifiuti da C&D.

Successivamente si illustrerà l'iter per passare dal rifiuto alla materia prima secondaria, ovvero l'aggregato riciclato, e si focalizzerà l'attenzione sulle loro caratteristiche peculiari e su quelle dei calcestruzzi che ne derivano, analizzando le pubblicazioni scientifiche. Si illustreranno poi le principali criticità legate alla produzione e all'utilizzo degli aggregati riciclati e si presenterà un particolare processo di mix design specifico per i calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati.

Inoltre, verrà presentata l'attività sperimentale svolta, oltre a illustrarne il proseguimento futuro.

1.1 Il rifiuto

Poiché l'aggregato riciclato deriva dal trattamento dei rifiuti da C&D è utile conoscere la definizione e la classificazione del rifiuto.

Secondo l'articolo 183 del D.Lgs. n. 152/2006 [1], conosciuto come "Testo Unico Ambientale" si definisce:

"Rifiuto: qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi"

identificando il Detentore come: *"il produttore dei rifiuti o la persona fisica o giuridica che ne è in possesso"*.

Il rifiuto è classificato secondo l'articolo 184 del D.Lgs. n. 152/2006 [1] in base alla sua origine e alle sue caratteristiche di pericolosità, ottenendo le seguenti combinazioni indicate in Tabella 1:

Tabella 1: classificazione del rifiuto

		Pericolosità	
Origine	Urbani non pericolosi	Urbani pericolosi	
	Speciali non pericolosi	Speciali pericolosi	

I rifiuti da C&D da cui hanno origine gli aggregati riciclati trattati in questa sede rientrano nei rifiuti speciali non pericolosi perciò anche nei capitoli successivi, per maggior semplicità di trattazione, si farà riferimento solo a quest'ultimi.

Codice CER

La normativa europea prevede che ciascun rifiuto sia identificato secondo la nomenclatura dell'Elenco Europeo dei Rifiuti (Decisione 2014/955/CE [2]).

Il Codice dell'Elenco Europeo dei Rifiuti o CER [3] è composto da 6 cifre e ha lo scopo di creare un linguaggio comune nella Comunità Europea per identificare il rifiuto e garantirne la rintracciabilità.

Le 6 cifre si suddividono in tre coppie che individuano rispettivamente:

- la classe, ossia il processo produttivo di provenienza del rifiuto;
- la sottoclasse, approfondimenti riguardanti il processo produttivo o il rifiuto;
- la categoria, ulteriori precisazioni sulla tipologia del rifiuto.

Sono state individuate 20 classi tra cui figurano i rifiuti da C&D, costituenti la classe 17, designati come:

"Rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (compreso il terreno proveniente da siti contaminati)"

A scopo di maggiore completezza si riporta che l'articolo 184 del D.Lgs. n. 152/2006 [1] prevede inoltre che si definiscano "rifiuti pericolosi" i rifiuti che contengono concentrazioni di sostanze pericolose al di sopra di soglie limite.

Tali rifiuti sono contrassegnati con un asterisco finale (*) nell'elenco europeo dei rifiuti (Decisione 2014/955/CE [2]) ma non vengono presi in considerazione ai fini della presente trattazione.

Maggiori dettagli sui codici dei rifiuti maggiormente recuperati verranno descritti in seguito.

Principale normativa europea sui rifiuti

La principale normativa riguardante le misure volte a proteggere la salute umana e l'ambiente è la Direttiva 2008/98/CE [4]. La stessa introduce novità rispetto alle priorità che la politica dovrebbe sostenere in materia di prevenzione e gestione dei rifiuti. È prevista infatti il concetto di "ordine di priorità di gestione dei rifiuti" al fine di mitigare gli impatti sulla salute e sull'ambiente dovuti allo smaltimento di quest'ultimi (Figura 1).



Figura 1: ordine di priorità di gestione dei rifiuti

È previsto che alcuni rifiuti specifici, come i rifiuti da C&D, possano cessare di essere tali, quando siano sottoposti a un'operazione di recupero, incluso il riciclaggio, e soddisfino criteri specifici, raggiungendo così l'"end of waste" rappresentante la cessazione dello stato di rifiuto e la promozione della qualifica a materia prima secondaria.

L'operazione di recupero, introdotta con la presente direttiva, è ripresa dal D.Lgs. n. 152/2006 [1] ed è definita come:

"qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o nell'economia in generale"

Il suddetto decreto indica tali operazioni designandole con la lettera R seguita da un numero compreso tra 1 e 13. I rifiuti da C&D sono soggetti ad operazioni di tipo R5 o R13, le quali sono operazioni che rientrano nella categoria del recupero di materia e sono definite rispettivamente come:

"R5 - Riciclo/recupero di altre sostanze inorganiche"

"R13 - Messa in riserva di rifiuti per sottoporli ad una delle operazioni indicate nei punti da R1 a R12 (escluso il deposito temporaneo, prima della raccolta, nel luogo in cui sono prodotti)"

La direttiva illustrata è stata successivamente modificata da alcune nuove direttive che hanno avuto il compito di semplificare e chiarire la normativa oltre che accorpate le discipline.

Anche in questo caso per semplicità di trattazione nel successivo Capitolo 3 verrà considerata solamente la categoria delle operazioni di recupero di materia.

Situazione italiana

La legislazione italiana in materia di rifiuti, antecedente al 1997, era stata formulata per lo più per arginare situazioni di emergenza ambientale.

Il Decreto Ronchi, entrato in vigore nel 1997 (D.Lgs. n. 22/1997 [5] abrogato dall'art. 264, c. 1, lett. i del D.Lgs n. 152/2006 [1] che ne ricalca le linee), offre per la prima volta un quadro omogeneo sulla normativa di questo settore, prevedendo precisi obblighi di indirizzo, di pianificazione e di attuazione della politica di gestione dei rifiuti.

La novità più importante del decreto, che si muove in linea con le direttive dell'UE, è l'introduzione dell'obbligo di compilazione dei formulari di identificazione dei rifiuti per le ditte operatrici nel settore.

Lo scopo è garantire la tracciabilità e la valorizzazione del rifiuto attraverso il suo recupero, diminuendo di conseguenza i quantitativi smaltiti in discarica ed incrementandone la raccolta differenziata per garantire sia elevati tassi di recupero sia elevata qualità del prodotto recuperato.

Questi obiettivi si traducono nel settore edile si traducono nell'ottimizzazione di alcune fasi del processo edilizio, individuate in:

- fase di progetto: in vista dell'intero ciclo di vita del prodotto edilizio;
- fase di demolizione: come stadio iniziale del processo di recupero;
- fase della raccolta differenziata: per valorizzare il prodotto finale.

Dopo il Decreto Ronchi è stato introdotto il nuovo codice CER/2002 [3], citato nel precedente paragrafo, che classifica i rifiuti da C&D tramite codici che servono da riferimento per la compilazione del MUD (Modello Unico di Dichiarazione ambientale), che a sua volta rappresenta un'ottima banca dati per la riorganizzazione del Catasto dei Rifiuti e dell'Osservatorio nazionale sui rifiuti.

Successivamente, sempre nel 2002, è stata introdotta la norma UNI 10006 [6], denominata "Criteri di impiego degli aggregati riciclati", la quale disciplina:

- le composizioni tipo degli aggregati riciclati in funzione della provenienza (da macerie di cls, da macerie edilizie, da demolizioni stradali, da scarti industriali, da rifiuti di vetro ecc.);
- le modalità di campionamento e di saggio;
- le cautele di impiego ai diversi livelli di utilizzo.

Lo scopo principale fu quello portare gli aggregati riciclati al pari di quelli naturali, superando i problemi e i pregiudizi derivanti dalle loro caratteristiche particolari quali: forma, disomogeneità di composizione nel tempo, resistenza differenziata, presenza di legno e altri degradabili ecc.

In seguito, UNI ritira la norma UNI 10006 [6] e introduce nel biennio 2003/2004 le seguenti normative con l'intento di sostituirla:

- UNI EN 13242 [7], introdotta nel 2004, la quale specifica le proprietà degli aggregati ottenuti mediante trattamento di materiali naturali o artificiali o riciclati da utilizzare come materiali non legati e legati con leganti idraulici, per impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade. Essa fornisce inoltre i criteri di classificazione del materiale secondo caratteristiche geometriche, fisiche e chimiche e rientra in un sistema di controllo della produzione per la marcatura CE;
- UNI EN 13285 [8], introdotta nel 2004, che specializza la EN 13242 [7] per le miscele all-in (0/D) non legate di aggregati naturali, artificiali e riciclati destinati alle strade;
- UNI EN ISO 14688-1 [9], introdotta nel 2003, e UNI EN ISO 14688-2 [10], introdotta nel successivo anno, che stabiliscono i principi generali per l'identificazione e la classificazione delle terre naturali in situ, delle terre movimentate e ridepositate dall'uomo e indica i criteri per raggrupparle in classi di composizione e proprietà simili.

Tuttavia, queste nuove normative si occupano solo delle procedure per la corretta classificazione degli aggregati, indicando le norme con cui eseguire le prove di caratterizzazione delle proprietà geometriche, fisiche e chimiche, oltre che fornire uno schema per la classificazione delle terre in situ. Sono ancora assenti i controlli e i limiti prestazionali di accettazione sia delle terre che degli aggregati.

Il 15 luglio 2005 il contenuto della UNI 10006 [6] è stato trasposto nella Circolare n°5205/2005 [11], la quale, oltre a fornire le indicazioni per rendere operativo il D.M. n. 203/2003 [12] fornisce le indicazioni affinché le Amministrazioni pubbliche e le società a prevalente capitale pubblico coprano il loro fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo, specificando ulteriormente i requisiti minimi dei materiali riciclati in termini di composizione, forma e caratteristiche granulometriche.

Nel 2008 è stata pubblicata la UNI EN 12620 [13], la norma principe degli aggregati riciclati oggetto di studio nella presente tesi, la quale specifica le proprietà degli aggregati e dei filler ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali o riciclati miscelati per essere utilizzati nella confezione di calcestruzzi che soddisfano i requisiti della UNI EN 206 [14] compresi i calcestruzzi destinati alle pavimentazioni stradali e alla produzione di prefabbricati.

Nel 2014, è stata introdotta la UNI 11531-1 [15] “Regole applicative per l’impiego di aggregati nella costruzione di strade” finalizzata alla scelta delle terre e degli aggregati costituenti le opere civili atte a sopportare il transito dei veicoli aerei e terrestri: essa contiene istruzioni utili per l’applicazione delle norme precedenti, ragguagli sulla classificazione delle terre, sulla designazione degli aggregati e sui criteri per la verifica di conformità, indicando anche i valori di riferimento per le caratteristiche tecniche in relazione a ciascuna destinazione d’impiego.

Queste sono solo alcune delle norme principali in materia di rifiuti e aggregati riciclati. Alcune di esse sono state aggiornate e/o accorpate nel corso degli ultimi anni.

2. LA PRODUZIONE DI RIFIUTI A VARIE SCALE GEOGRAFICHE

2.1 Premessa

Essendo l'oggetto della tesi, l'RCA, un prodotto derivante dal trattamento del rifiuto da C&D, è importante conoscere i quantitativi di tali rifiuti presenti sul mercato oltre che le modalità di gestione degli stessi.

Nei paragrafi successivi perciò verranno illustrati i quantitativi di rifiuti prodotti, e le modalità di gestione degli stessi, a diverse scale geografiche, partendo dalla scala mondiale fino ad arrivare alla scala locale, facendo riferimento nello specifico al RS NP.

2.2 La produzione dei rifiuti a scala mondiale

La produzione mondiale annua di rifiuti, nell'anno 2012, era stimata in circa 4 miliardi di tonnellate, di cui circa il 50% rappresentato da RU e l'altro 50% rappresentato dai RS.

Anche se non esistono stime univoche, in questo decennio si potrebbe arrivare a un aumento di questa produzione anche del 50%, quindi, ad oggi, i rifiuti globalmente prodotti potrebbero ammontare a oltre 6 miliardi di tonnellate.

La causa di questo aumento è la crescita della popolazione mondiale e lo sviluppo economico [16].

La gestione dei rifiuti solidi è fondamentale per città e comunità sostenibili, sane e inclusive, ma è spesso trascurata, in particolare nei paesi a basso reddito. Nei paesi ad alto reddito oltre un terzo dei rifiuti viene recuperato attraverso il riciclaggio e il compostaggio, mentre, di contro, solo il 4% dei rifiuti viene recuperato nei paesi a basso reddito. I sistemi di gestione dei rifiuti sono essenziali per costruire un'economia circolare in cui i prodotti sono progettati e ottimizzati per il riutilizzo e il riciclaggio. Mentre i governi nazionali e locali adottano l'economia circolare, i modi intelligenti e sostenibili per gestire i rifiuti contribuiranno a promuovere una crescita economica efficiente riducendo al minimo l'impatto ambientale [17]. L'economia circolare è un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile.



Figura 2: economia circolare [18]

L'applicazione di tale modello è necessaria perché con la crescita della popolazione mondiale cresce la domanda di prodotti e di conseguenza di materie prime. Le materie prime in natura sono limitate, ed è perciò necessario recuperarne la maggior quantità possibile dai prodotti a fine ciclo di vita.

I vantaggi derivanti dall'applicazione di tale modello sono molteplici e interessano tutti i soggetti coinvolti con il prodotto, dalla sua realizzazione al suo sfruttamento:

- per le imprese si ridurrebbero i costi di produzione riducendo allo stesso tempo le emissioni di gas serra;
- per la società si ridurrebbe la pressione ambientale con un conseguente miglioramento della qualità di vita;
- per i consumatori, grazie ai principi dell'ecodesign che hanno come cardine la longevità del prodotto, si avrebbero a disposizione dei prodotti più duraturi.

2.3 La produzione dei rifiuti a scala europea

Premessa

I dati¹ illustrati nei paragrafi seguenti sono relativi alla produzione e gestione dei rifiuti prodotti dalle attività economiche e da nuclei domestici nei Paesi membri dell'Unione europea a 28 Stati Membri riferiti all'anno 2016, e sono stati estratti dal Rapporto Rifiuti Speciali Ispra ed. 2019 [19].

In Figura 3 è riportata la mappa dell'Unione europea aggiornata, nella quale sono rappresentati i 28 Stati membri con indicazione dei rispettivi anni di adesione.



Figura 3: Mappa UE [19]

¹ Fonte dati principale: Eurostat.

Dati riferiti ai rifiuti totali, comprensivi di quelli urbani

La produzione, la gestione e il recupero dei rifiuti in Europa

Nell'UE28 nel 2016 sono stati prodotti circa 2,5 miliardi di tonnellate di rifiuti (Tabella 2), di cui:

- il 96 % NP (pari a oltre 2,4 miliardi di tonnellate);
- il 4% P (pari a oltre 100 milioni di tonnellate).

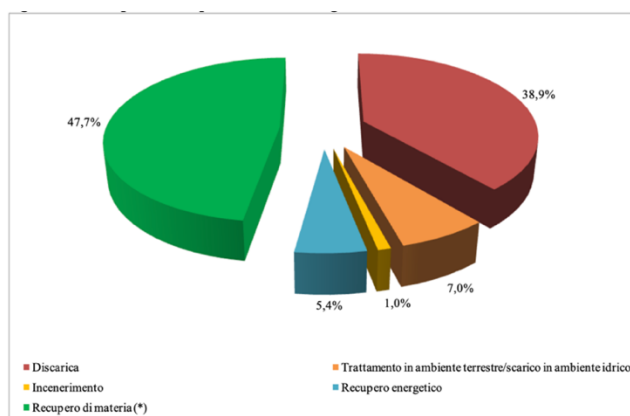
Tabella 2: Produzione di rifiuti nell'UE (tonnellate), anno 2016 [19]

Paese/Raggruppamento	Non pericolosi	Pericolosi	Totale
UNIONE EUROPEA (28 SM)	2.437.028.527	100.741.543	2.537.770.070
UNIONE EUROPEA (15 SM)	1.884.798.041	72.313.647	1.957.111.689
NUOVI STATI MEMBRI	552.230.486	28.427.896	580.658.381
Belgio	59.339.506	3.812.878	63.152.384
Bulgaria	107.180.038	13.328.437	120.508.475
Repubblica Ceca	24.292.712	1.088.714	25.381.426
Danimarca	18.971.191	2.010.740	20.981.931
Germania	377.032.518	23.039.154	400.071.672
Estonia	14.595.715	9.682.164	24.277.879
Irlanda	14.717.702	533.987	15.251.689
Grecia	71.853.744	504.282	72.358.026
Spagna	125.774.677	3.183.846	128.958.523
Francia	312.463.988	11.010.282	323.474.270
Croazia	5.103.273	174.325	5.277.598
Italia	154.288.084	9.706.964	163.995.048
Cipro	2.303.423	159.080	2.462.503
Lettonia	2.466.454	66.230	2.532.684
Lituania	6.468.366	175.950	6.644.315
Lussemburgo	9.702.636	427.440	10.130.076
Ungheria	15.480.938	457.139	15.938.077
Malta	1.831.513	134.001	1.965.514
Paesi Bassi	135.889.865	5.134.155	141.024.020
Austria	59.964.084	1.260.953	61.225.037
Polonia	180.088.543	1.917.134	182.005.677
Portogallo	13.904.534	834.601	14.739.135
Romania	176.937.926	624.979	177.562.905
Slovenia	5.370.745	123.617	5.494.362
Slovacchia	10.110.840	496.126	10.606.966
Finlandia	120.480.693	2.388.490	122.869.183
Svezia	139.246.486	2.379.232	141.625.718
Regno Unito	271.168.333	6.086.643	277.254.977

L'Italia produce circa 164 milioni di tonnellate di rifiuti, di cui 154 milioni di tonnellate sono NP e 10 milioni di tonnellate sono P. Il rapporto tra le due tipologie di rifiuti è in linea con quello europeo.

I rifiuti totali sono così gestiti (Figura 4):

- il 38,9% è smaltito in discarica
- il 7% è avviato a trattamento in ambiente terrestre o scaricato in ambiente idrico
- l'1% è incenerito
- il 5,4% è avviato al recupero energetico
- il 47,7% è avviato al recupero di materia (incluso il backfilling²).



- Figura 4: Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti totali in UE28, anno 2016 [19]

² Per backfilling o riempimento si intende "un'operazione di recupero in cui i rifiuti idonei sono utilizzati a fini di bonifica in aree scavate o per interventi paesaggistici e in cui i rifiuti sostituiscono materiali che non sono rifiuti".

Nella Figura 5 viene illustrata per ogni Stato membro dell'UE28 la ripartizione percentuale delle principali forme di gestione (discarica, trattamento in ambiente terrestre/scarico in ambiente idrico, incenerimento, recupero energetico, recupero di materia), a cui sono avviati i rifiuti totali nell'anno 2016. Si evidenzia un'estrema variabilità di approccio alla gestione dei rifiuti e, in riferimento al solo recupero di materia, l'Italia fa registrare una tra le migliori prestazioni tra i Paesi dell'UE28, attestandosi al 79% di recupero di materia.

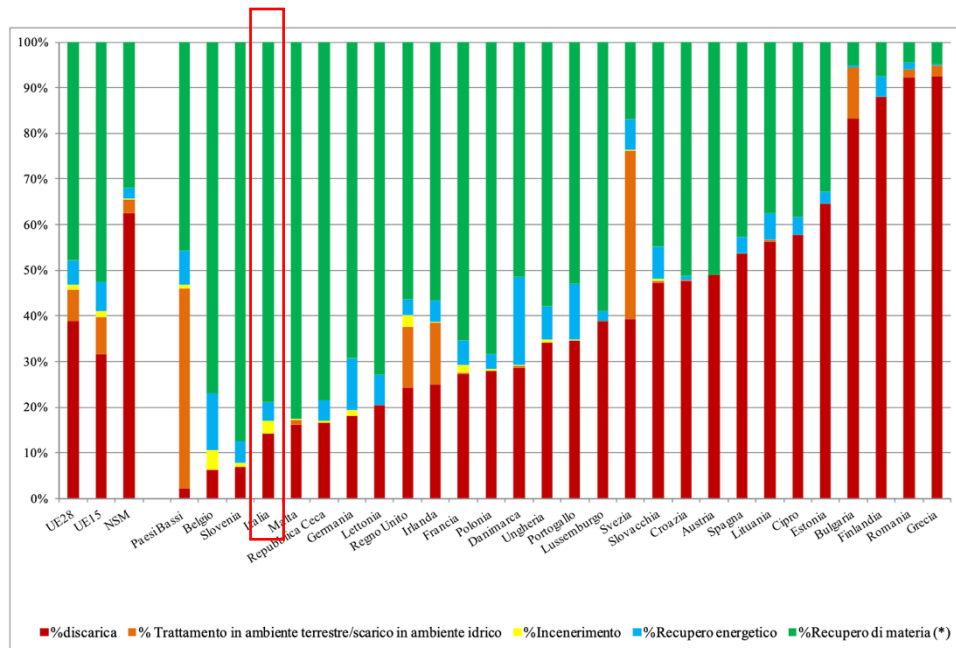


Figura 5: Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti nell'UE, anno 2016 (dati ordinati per percentuali crescenti di smaltimento in discarica) [19]

2.4 La produzione dei rifiuti speciali a scala nazionale

Premessa

I dati illustrati successivamente sono stati estratti dal Rapporto Rifiuti Speciali dell'ISPRA ed. 2019 [19] riferito in questo caso all'anno 2017 e sono stati desunti dalle dichiarazioni presentate nell'anno 2018. La produzione nazionale dei rifiuti speciali è stata dedotta dalle informazioni contenute nelle banche dati MUD relative alle dichiarazioni annuali effettuate ai sensi della normativa di settore.

Produzione totale dei rifiuti speciali

Nel 2017 la produzione nazionale di RS si attesta a 138,9 milioni di tonnellate (Figura 6) comprensivi dei quantitativi di RS provenienti dal trattamento dei rifiuti urbani, pari a circa 10,9 milioni di tonnellate.

I quantitativi sono così distribuiti:

- 129,2 milioni di tonnellate di RS NP, di cui 56,1 milioni di tonnellate derivanti dalle operazioni di C&D afferenti alla Classe 17;
- 9,7 milioni di tonnellate di RS P (di cui 1,3 milioni di tonnellate di veicoli fuori uso, pari al 13,5% del dato complessivo), quantitativo esiguo se rapportato a quello dei RS NP.

I RS NP rappresentano il 46,9% del totale prodotto (43,6% della quantità complessiva di RS), soprattutto per effetto del contributo rilevante dei rifiuti da C&D.

Nel biennio 2016-2017 si rileva un aumento nella produzione totale dei RS, pari al 2,9%, corrispondente a circa 4 milioni di tonnellate.

L'incremento registrato è quasi del tutto dovuto ai RS NP, e in particolare a quelli da C&D che aumentano del 4,9%, ovvero oltre 2,6 milioni di tonnellate in termini quantitativi.

La Figura 6 evidenzia chiaramente il contributo dovuto a questa tipologia di rifiuto che, in termini quantitativi è quasi pari alla quantità totale di RS NP prodotti (56 milioni di tonnellate contro 73 milioni).

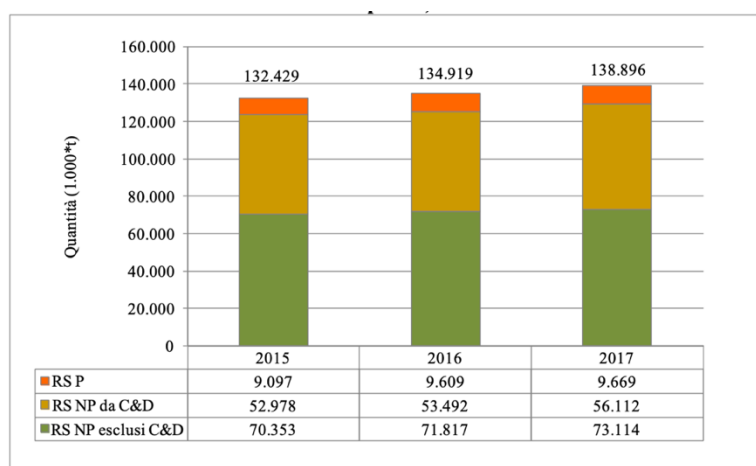


Figura 6: Produzione nazionale di RS, anni 2015 – 2017 [19]

Produzione dei rifiuti speciali per attività economica

La produzione di rifiuti speciali per attività economica, relativa al biennio 2016-2017, secondo la classificazione Ateco 2007 [20], viene riportata nel Rapporto Ispra [19], e di seguito ne viene riportato al seguito lo stralcio per l'Attività Economica "Costruzioni", seguito dai totali parziali, rappresentati nella Tabella 3.

Tabella 3: Produzione di RS per attività economica, anni 2016 - 2017

Attività Economica	Codice ATECO 2007	2016			2017		
		RS NP MUD+Stime	RS P	Totale	RS NP MUD+Stime	RS P	Totale
		tonnellate			tonnellate		
Costruzioni	41 42 43	54.396.681	414.896	54.811.577	57.041.115	346.541	57.387.656
TOTALE		125.309.546	9.609.056	134.918.736*	129.226.731	9.669.476	138.896.207*

Il Codice Ateco

Il codice Ateco è una combinazione alfanumerica che identifica una Attività Economica.

Le lettere individuano il macro-settore economico mentre i numeri (da due fino a sei cifre) rappresentano, con diversi gradi di dettaglio, le specifiche categorie e sottocategorie dei settori stessi [20].

Le attività vengono raggruppate con dettaglio crescente secondo:

- Sezioni
- Divisioni
- Gruppi
- Classi
- Categorie
- Sottocategorie

Ad esempio:

38.11.0 – Raccolta di rifiuti solidi non pericolosi

	Codice	Definizione
Sezione	E	Fornitura di acqua, reti fognarie, attività di gestione dei rifiuti e risanamento
Divisione	38	Attività di raccolta, trattamento e smaltimento dei rifiuti; recupero dei materiali
Gruppo	38.1	Raccolta dei rifiuti
Classe	38.11	Raccolta di rifiuti non pericolosi
Categoria	38.11.0	Raccolta di rifiuti solidi non pericolosi
Sottocategoria	38.11.00	Raccolta di rifiuti solidi non pericolosi

Questa codifica è necessaria per:

- l'apertura di un'attività (nuova partita IVA) affinché ciascuna attività sia classificata in modo standardizzato ai fini fiscali, contributivi e statistici;
- l'individuazione della macrocategoria di rischio dell'attività secondo le linee guida INAIL.

Nel 2017, la maggiore produzione di RS NP deriva dal settore delle C&D con una percentuale pari al 44,1% del totale prodotto, corrispondente a 56 milioni di tonnellate (Figura 7, Figura 8).

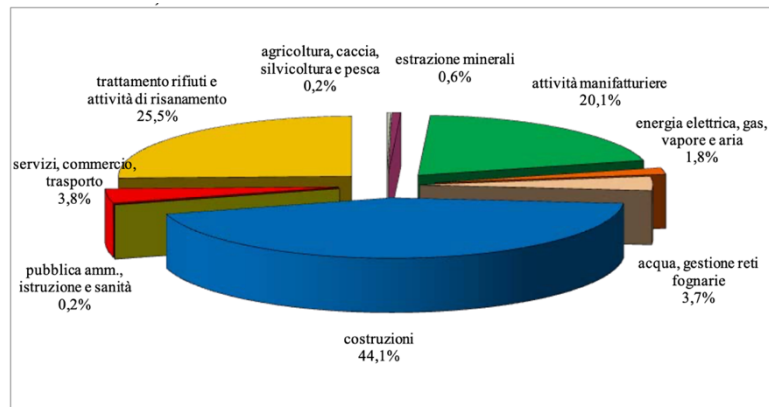


Figura 7: Ripartizione percentuale della produzione dei RS NP per attività economica, anno 2017 [19]

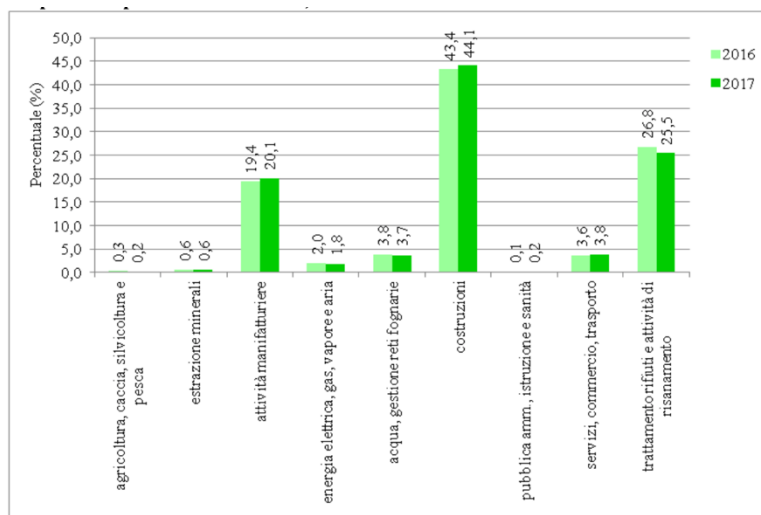


Figura 8: Andamento della ripartizione percentuale della produzione dei RS NP per attività economica, anni 2016 – 2017 [19]

Produzione dei rifiuti speciali per capitolo dell'Elenco Europeo dei rifiuti

In analogia con i dati precedenti raggruppati per attività economica, nel 2017, i rifiuti alla Classe 17 rappresentano la quota prevalente dei RS NP prodotti, con una percentuale del 43,4% (Figura 9).

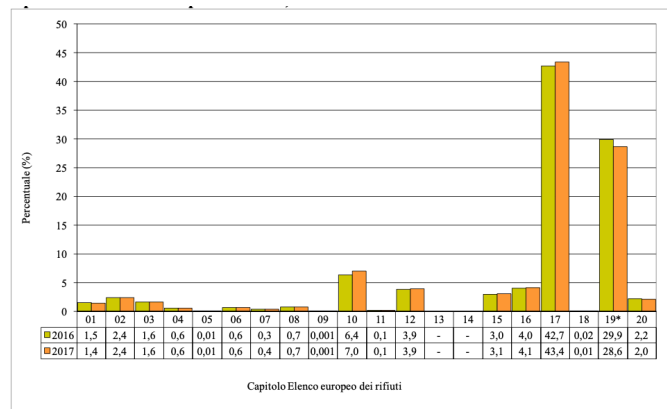


Figura 9: Ripartizione percentuale della produzione RS NP per capitolo dell'Elenco Europeo dei rifiuti, anni 2016 – 2017 [19]

Osservando la ripartizione del dato di produzione dei rifiuti speciali tra rifiuti pericolosi e non pericolosi si può notare come i rifiuti appartenenti alla Classe 17 siano costituiti quasi interamente da RS NP (Figura 10).

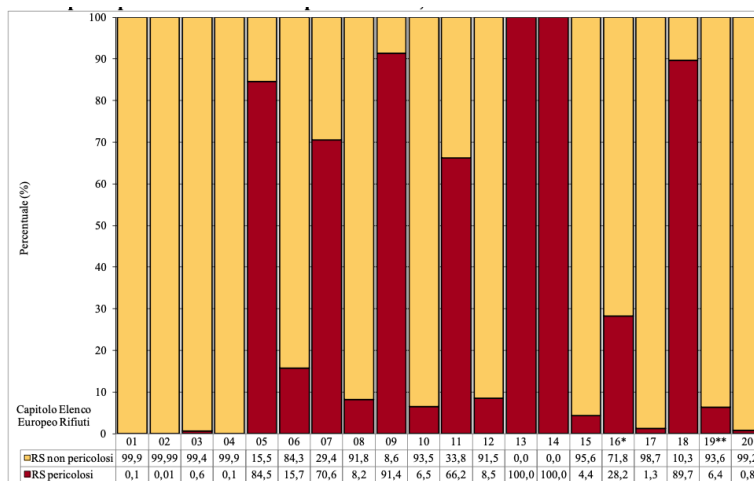


Figura 10: Ripartizione percentuale della produzione dei RS tra RS P e RS NP per capitolo dell'Elenco Europeo dei Rifiuti, anno 2017 [19]

2.5 La produzione dei rifiuti speciali a scala locale

Premessa

A scopo di maggior completezza si fornisce un quadro sintetico a livello di macroarea geografica e a livello regionale della produzione dei rifiuti da C&D facendo riferimento al caso specifico del Nord Italia e del Piemonte.

Produzione totale dei rifiuti speciali per macroarea geografica e a livello regionale

I maggiori valori di produzione totale dei RS si concentrano nel Nord Italia con quasi 81 milioni di tonnellate nel 2017 (pari, in termini percentuali, al 58,3% del dato complessivo nazionale, Tabella 4).

Tra il 2016 ed il 2017, si assiste a un aumento della produzione totale dei RS che è pari a quasi 3,4 milioni di tonnellate (+4,3%). Tale incremento è imputabile interamente ai RS NP.

In particolare, aumenta di circa 2,5 milioni di tonnellate la produzione di rifiuti da C&D (+8,1% rispetto al 2016, Figura 11).

Tabella 4: Produzione dei RS per macroarea geografica, anni 2016 – 2017 [19]

Tipologia rifiuto	Nord		Centro		Sud		Italia	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
RS NP (MUD)*	37.358.084	38.119.505	13.464.490	13.088.250	16.628.567	17.405.130	67.451.141	68.612.885
RS NP esclusi i rifiuti da C&D (stime)	2.483.231	2.559.752	739.769	750.300	1.137.822	1.188.268	4.360.822	4.498.320
RS non pericolosi da C&D (stime)	31.241.543	33.770.567	9.781.857	9.852.875	12.468.799	12.488.863	53.492.199	56.112.305
RS non pericolosi con attività ISTAT non determinata	1.316	240	490	527	3.578	2.454	5.384	3.221
Totale RS NP	71.084.174	74.450.064	23.986.606	23.691.952	30.238.766	31.084.715	125.309.546	129.226.731
RS pericolosi (MUD)*	5.909.618	5.907.600	1.024.159	1.089.134	1.362.847	1.367.290	8.296.624	8.364.024
RS pericolosi (stime)	1.166	1.236	441	466	609	648	2.216	2.350
Veicoli fuori uso	623.287	619.825	277.133	262.501	408.068	420.314	1.308.488	1.302.640
RS pericolosi con attività ISTAT non determinata	436	106	73	148	1.219	208	1.728	462
Totale RS P	6.534.507	6.528.767	1.301.806	1.352.249	1.772.743	1.788.460	9.609.056	9.669.476
RS con EER non determinato	3	-	1	-	130	-	134	0
Totale RS	77.618.684	80.978.831	25.288.413	25.044.201	32.011.639	32.873.175	134.918.736	138.896.207

* Inclusi i quantitativi di rifiuti speciali provenienti dal trattamento dei rifiuti urbani.

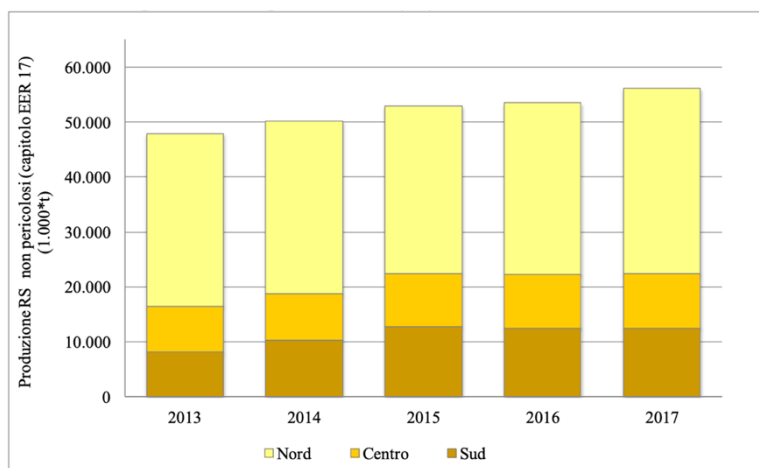


Figura 11: Andamento della produzione di rifiuti C&D (classe 17 dell'Elenco Europeo dei rifiuti), per macroarea geografica, anni 2013 – 2017 [19]

A livello regionale si può osservare dalla Figura 12 come il Piemonte sia la 4° regione per quantitativo di RS totali prodotti, con circa 21 milioni di tonnellate.

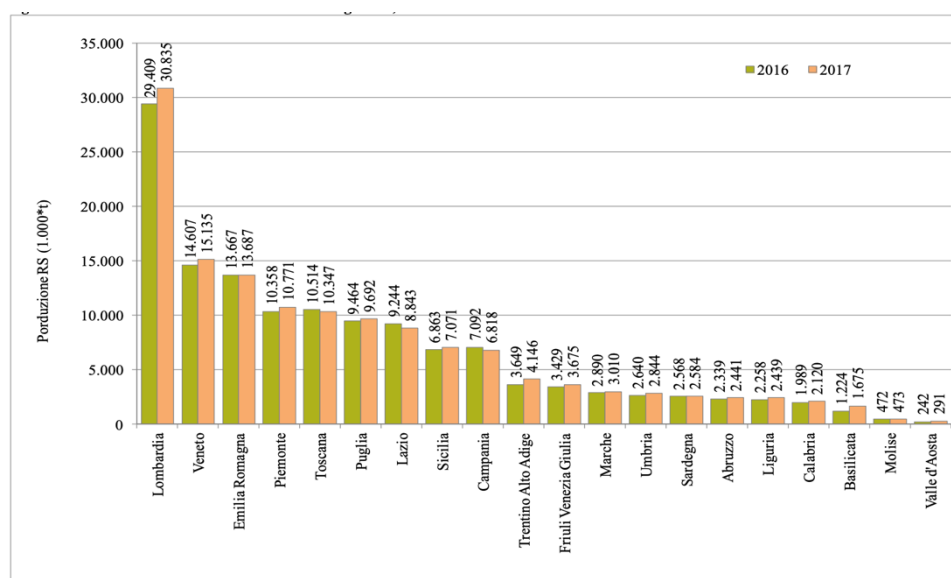


Figura 12: Produzione totale dei RS a livello regionale, anni 2016 – 2017 [19]

I rifiuti delle Classi 17 e 19 rappresentano, presi nel loro insieme, il 67,2% della produzione delle regioni del Nord.

Tabella 5: Produzione, per macroarea geografica, dei RS ripartiti per capitolo dell'Elenco Europeo dei rifiuti, anno 2017 [19]

Capitolo dell'Elenco europeo dei rifiuti	Nord			Centro			Sud			Italia		
	RS NP	RS P	Totale	RS NP	RS P	Totale	RS NP	RS P	Totale	RS NP	RS P	Totale
tonnellate												
01	1.079.585	440	1.080.025	527.757	394	528.151	147.868	1.746	149.614	1.755.210	2.580	1.757.790
02	1.821.100	138	1.821.238	398.763	41	398.804	849.200	17	849.217	3.069.063	196	3.069.259
03	1.411.736	9.364	1.421.100	539.573	1.099	540.672	128.784	1.421	130.205	2.080.093	11.884	2.091.977
04	369.386	290	369.676	280.866	184	281.050	75.346	4	75.350	725.598	478	726.076
05	3.888	22.772	26.660	12.591	6.452	19.043	1.456	68.720	70.176	17.935	97.944	115.879
06	240.762	103.333	344.095	563.252	12.340	575.592	22.726	38.134	60.860	826.740	153.870	980.547
07	336.877	999.749	1.336.626	68.119	62.221	130.340	58.342	51.924	110.266	463.338	1.113.894	1.577.232
08	801.769	63.926	865.695	83.673	8.997	92.670	27.454	8.714	36.168	912.896	81.637	994.533
09	827	10.942	11.769	122	1.288	1.410	327	1.358	1.685	1.276	13.588	14.864
10	5.202.737	500.248	5.702.985	1.169.938	22.304	1.192.242	2.657.391	103.800	2.761.191	9.030.066	626.352	9.656.418
11	122.770	234.312	357.082	40.758	33.101	73.859	17.507	86.751	104.258	181.035	354.164	535.199
12	4.219.467	428.572	4.648.039	404.220	20.157	424.377	473.945	25.389	499.334	5.097.632	474.118	5.571.750
13	0	669.979	669.979	0	98.639	98.639	0	174.973	174.973	0	943.591	943.591
14	0	35.491	35.491	0	5.951	5.951	0	2.726	2.726	0	44.168	44.168
15	2.745.853	127.017	2.872.870	622.337	34.486	656.823	606.735	23.146	629.881	3.974.925	184.649	4.159.574
16	2.260.174	1.039.058	3.299.232	831.566	435.128	1.266.694	2.254.037	620.792	2.874.829	5.345.777	2.094.978	7.440.755
17	33.770.567	562.894	34.333.461	9.852.875	88.445	9.941.320	12.488.863	111.547	12.600.410	56.112.305	762.886	56.875.191
18	11.596	77.443	89.039	4.562	37.402	41.964	2.403	45.970	48.373	18.561	160.815	179.376
19	18.458.127	1.629.694	20.087.821	7.723.306	481.230	8.204.536	10.796.920	416.291	11.213.211	36.978.353	2.527.215	39.505.568
20	1.592.603	12.999	1.605.602	567.147	2.242	569.389	472.957	4.829	477.786	2.632.707	20.070	2.652.777
Totale	74.449.824	6.528.661	80.978.485	23.691.425	1.352.101	25.043.526	31.082.261	1.788.252	32.870.513	129.223.510	9.669.014	138.892.524
RS ISTAT ND	240	106	346	527	148	675	2.454	208	2.662	3.221	462	3.683
RS EER ND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale RS	74.450.064	6.528.767	80.978.831	23.691.952	1.352.249	25.044.201	31.084.715	1.788.460	32.873.175	129.226.731	9.669.476	138.896.207

RS NP: Rifiuti speciali non pericolosi

RS P: Rifiuti speciali pericolosi

Fonte: ISPRA

3. LA GESTIONE DEI RIFIUTI SPECIALI NON PERICOLOSI IN ITALIA

Premessa

I dati sulla gestione dei rifiuti speciali sono stati elaborati a partire dalle informazioni contenute nelle dichiarazioni del Modello Unico di Dichiarazione Ambientale (MUD) presentate nell'anno 2018, anno di riferimento dati 2017.

Gestione dei rifiuti speciali

I RS gestiti in Italia, nell'anno 2017, sono pari a 147,1 milioni di tonnellate, di cui:

- 137,6 milioni di tonnellate (93,5% del totale gestito) di RS NP;
- 9,5 milioni di tonnellate (6,5% del totale gestito) di RS P.

Nel totale sono incluse 16,6 milioni di tonnellate di rifiuti rimaste in stoccaggio presso gli impianti e presso i produttori a fine anno.

I dati relativi alle diverse forme di recupero dei RS NP, nel biennio 2016-2017, sono rappresentati in Figura 13 e mostrano che nel 2017 sono state avviate alle operazioni di recupero (da R1 a R13), complessivamente 112,8 milioni di tonnellate di RS NP. Nello specifico l'operazione di recupero R5 è quella più diffusa, con più di 50 milioni di tonnellate di rifiuti interessate.

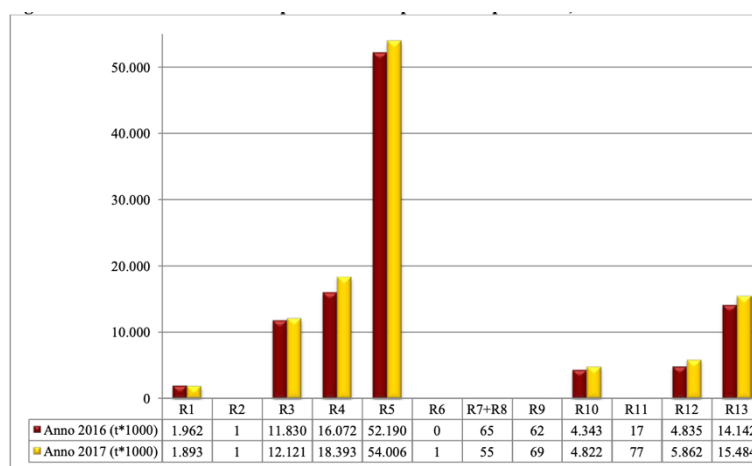
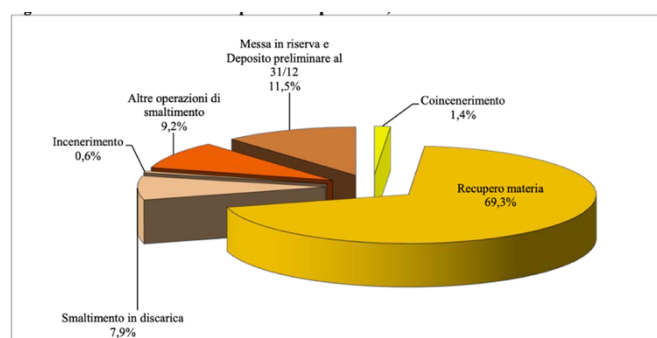


Figura 13: Andamento del recupero di RS NP, anni 2016 – 2017 [19]

I dati dell'anno 2017 relativi alla ripartizione percentuale delle forme di gestione dei RS NP sono rappresentati nella Figura 14 (137,6 milioni di tonnellate) e mostrano che, alle operazioni di recupero di materia (da R2 a R12), predominanti rispetto alle altre forme di gestione, sono avviati 95,4 milioni di tonnellate di rifiuti (69,3%).

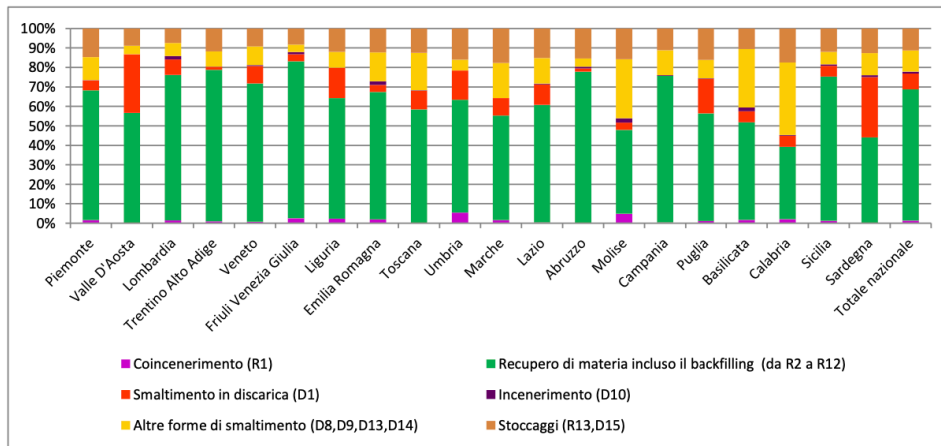


Nota: nell'incenerimento sono comprese le quantità di rifiuti speciali trattati in impianti di incenerimento con recupero energetico dedicati, prevalentemente, al trattamento dei rifiuti urbani e classificati R1 ai sensi dell'allegato II della direttiva 2008/98/CE.

Fonte: ISPRA

Figura 14: Gestione RS NP, anno 2017 [19]

La Figura 15 riportata infine la ripartizione percentuale delle forme di gestione a livello regionale, comprensiva degli stoccaggi a fine anno. Le percentuali non tengono conto delle quantità di rifiuti prodotti in ciascuna regione e trattate in altre, una pratica molto diffusa. Anche in questo caso emerge che l'operazione più diffusa è il recupero di materia. Si osservi come il Piemonte avvii a recupero di materia quasi il 70% dei rifiuti speciali prodotti.



Fonte: ISPRA

Figura 15: Ripartizione percentuale delle principali forme di gestione dei rifiuti speciali, anno 2017 [19]

I dati sulla gestione dei RS NP riferiti all'anno 2017 e suddivisi per capitolo dell'Elenco Europeo dei Rifiuti sono rappresentati in Figura 16.

Si nota che i RS NP avviati ad operazioni di recupero sono costituiti per più del 50%, 59% in particolare, corrispondenti a oltre 66 milioni di tonnellate, da rifiuti della Classe 17.

Nello specifico, i rifiuti della Classe 17 sono costituiti per il 35,2% da "rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione" (CER 170904) e per il 21,8% da "terra e rocce" (CER 170504); le percentuali si riferiscono al totale dei RS NP recuperati afferenti alla Classe in questione.

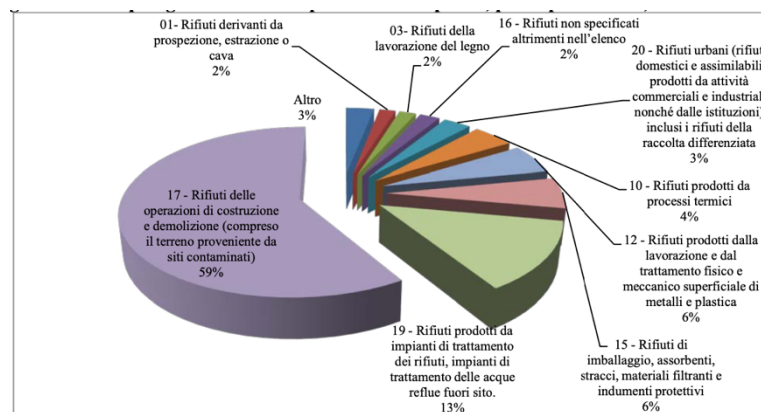


Figura 16: Tipologie di rifiuti non pericolosi recuperati, per capitolo EER, anno 2017 [19]

4. TRACCIABILITÀ DEI RIFIUTI

Il sistema di smaltimento dei rifiuti in Italia è severamente normato. Tutta la normativa al riguardo è principalmente raccolta nel D.Lgs. n. 152/2006 [1] ma sono moltissime le successive modificazioni ed integrazioni in materia.

Per una corretta gestione dei rifiuti, in tutto il loro percorso di smaltimento, dal produttore al trasportatore per arrivare ai destinatari addetti allo smaltimento, è stato costituito un impianto di gestione documentale atto a tenere traccia di tutte le informazioni che garantiscano la bontà del procedimento: dalla quantità e qualità dei rifiuti, al percorso di trasporto, all'identificazione degli attori del processo, tutte queste informazioni devono assicurare l'osservanza alla normativa ambientale.

Sono tre le principali tipologie di documenti che regolano la gestione amministrativa dei rifiuti, normati dal D.Lgs. n. 152/2006 [1]:

- il Registro di carico e scarico dei rifiuti;
- i formulari di identificazione dei rifiuti (FIR);
- il modello unico di dichiarazione ambientale (MUD).

Il Ministero dell'Ambiente ha ribadito la volontà di semplificare il processo amministrativo documentale nella gestione dei rifiuti. Infatti, nella Legge di Bilancio del 2018 è stato introdotto l'articolo 194 bis nel D.Lgs. n. 152/2006 [1] il quale prevede la possibilità di redigere e conservare in formato digitale il registro di carico e scarico e i formulari, consentendo per quest'ultimi la trasmissione della quarta copia in formato elettronico tramite posta certificata.

Dunque il registro di carico e scarico e il formulario di trasporto (altro modo di definire il FIR) possono diventare documenti nativamente digitali, ed essere gestiti e conservati in ottemperanza alle regole del CAD (Codice Amministrazione Digitale).

Il produttore, trasportatore e destinatario devono scegliere tra due opzioni:

- gestire l'intero processo digitalmente, con documenti nativamente digitali;
- effettuare la conservazione digitale dei documenti precedentemente analogici.

Per quanto riguarda la seconda opzione, la conservazione digitale a norma può essere applicata in qualsiasi punto del processo: la dematerializzazione di questi documenti qualora nati analogici e la relativa conservazione a norma può avvenire per qualsiasi degli attori in causa.

4.1 Il registro di carico e scarico

Il documento contiene informazioni sulle caratteristiche quantitative e qualitative dei rifiuti prodotti e/o gestiti. I registri sono tenuti presso ogni impianto di produzione, di stoccaggio, di recupero e di smaltimento di rifiuti, oltre che presso la sede delle imprese che effettuano attività di raccolta e trasporto, nonché presso la sede dei commercianti e degli intermediari.

I registri sono conservati per cinque anni dalla data dell'ultima registrazione, ad eccezione dei registri relativi alle operazioni di smaltimento dei rifiuti in discarica, che devono essere conservati a tempo indeterminato (ed al termine dell'attività devono essere consegnati all'autorità che ha rilasciato l'autorizzazione).

Il D.Lgs. n. 152/2006 [1] stabilisce che i registri siano numerati, vidimati dalle Camere di Commercio territorialmente competenti e gestiti con le procedure e le modalità fissate dalla normativa sui registri IVA.

Inoltre, il numero di protocollo del documento deve essere generato automaticamente dal sistema, e registrato in una forma non modificabile (D.P.R. n. 445/2000 [21]).

Il registro può quindi inserirsi in un sistema che curi sia la gestione del documento creato digitalmente, sia la conservazione nel rispetto delle regole tecniche vigenti che lo rendano giuridicamente valido.

Il registro è strutturato in due modi a seconda dell'utenza:

- Modello A (produttori, recuperatori, smaltitori, trasportatori, intermediari e commercianti con detenzione);
- Modello B (intermediari e commercianti con detenzione).

4.2 I formulari di identificazione dei rifiuti (FIR)

È il documento di accompagnamento per il trasporto dei rifiuti, e contiene tutte le informazioni sulla tipologia di rifiuti, sul produttore, trasportatore e destinatario.

Viene redatto in quattro copie, compilato, datato e firmato dal produttore o dal detentore dei rifiuti, e controfirmato dal trasportatore. Una copia rimane presso il produttore (o detentore), le altre tre, controfirmate e datate in arrivo dal destinatario, sono acquisite una dal destinatario, due dal trasportatore, che provvede a trasmetterne una al detentore.

Le copie vanno conservate per cinque anni.

È escluso dall'obbligo il trasporto di rifiuti urbani da parte del gestore del servizio pubblico ed il trasporto di rifiuti non pericolosi effettuati dal produttore in modo occasionale e saltuario e che non eccedano i 30 kg o L/giorno.

Figura 17: Fac-simile FIR

Il modello del formulario è definito dal D.M. n. 145/1998 [22] (così come riportato nell'articolo 193 del Testo Unico [1]).

4.3 Il Modello Unico di Dichiarazione ambientale

È l'insieme di dichiarazioni presentate annualmente alla Camera di commercio di pertinenza da soggetti quali discariche, trasportatori e produttori di rifiuti. Contiene la descrizione dei rifiuti raggruppati per tipologia, per produttore e provenienza. Sono previste eccezioni e le modalità di presentazione della comunicazione sono pubblicate tramite Decreto.

4.4 Schema di gestione del rifiuto

In definitiva la gestione del rifiuto può essere schematizzata nel seguente modo:

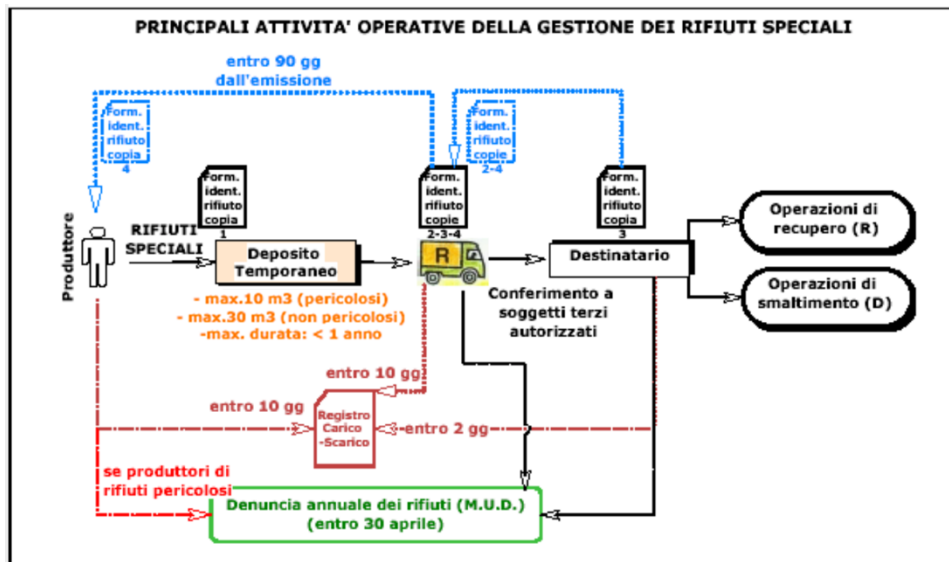


Figura 18: Schema del flusso di smaltimento di un rifiuto

5. I RIFIUTI DA OPERAZIONI DI COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE

5.1 Definizione

Per “Rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (compreso il terreno proveniente da siti contaminati)” si intendono quei rifiuti derivanti oltre che dalla costruzione o demolizione di edifici, anche provenienti dalla fase intermedia del ciclo di vita, la quale prevede operazioni di manutenzione e ristrutturazione.

5.2 Trend di produzione e riciclo dei rifiuti da C&D

Come evidenziato nel Capitolo 2, i rifiuti da C&D costituiscono una percentuale rilevante dei rifiuti prodotti complessivamente a livello nazionale ed europeo, perciò è importante analizzare il trend di produzione e di riciclo di questi rifiuti nel corso degli ultimi anni.

I quantitativi di rifiuti da C&D prodotti a livello nazionale nel periodo 2014-2017 sono riportati in Tabella 6, mentre quelli preparati per il riutilizzo, riciclati o recuperati nello stesso periodo, secondo la codifica del Regolamento CE n. 2150/2002 [23] relativo alle statistiche sui rifiuti, sono riportati in Tabella 7.

Si osserva un incremento notevole nel biennio 2016-2017 (+7,6%, corrispondente a quasi 3 milioni di tonnellate), con una produzione che si attesta a quasi 42,3 milioni di tonnellate nel 2017.

Analogamente al dato di produzione anche il dato relativo al recupero di materia conferma un trend di crescita nel 2017, con un aumento dei quantitativi totali recuperati pari al 6,1% rispetto al 2016, corrispondenti a circa 1,8 milioni di tonnellate.

Tabella 6: Produzione dei rifiuti da costruzioni e demolizioni secondo la codifica del Regolamento (CE) n. 2150/2002 relativo alle statistiche sui rifiuti, anni 2014 – 2017 [19]

Aggregazione delle categorie dei rifiuti di cui all'allegato 1, sezione 2 del Regolamento (CE) n. 2150/2002		Aggregazione delle attività economiche secondo la classificazione NACE Rev. 2 di cui al Regolamento (CE) n. 1893/2006			
		F: Costruzioni			
Voce	Descrizione	2014	2015	2016	2017
(tonnellate)					
6.1	Rifiuti metallici ferrosi	3.589.808	3.457.164	3.571.785	4.242.120
6.2	Rifiuti metallici non ferrosi	396.677	398.922	440.007	492.483
6.3	Rifiuti metallici misti, ferrosi e non ferrosi	151.012	143.314	211.285	122.317
7.1	Rifiuti in vetro	71.896	77.354	78.215	80.344
7.4	Rifiuti in plastica	24.845	36.908	29.189	40.965
7.5	Rifiuti in legno	151.670	152.560	168.046	175.413
12.1	Rifiuti minerali della costruzione e della demolizione	34.017.822	34.492.850	34.804.036	37.128.551
Totale nazionale		38.403.730	38.759.072	39.302.563	42.282.193

Fonte: ISPRA

Tabella 7: Preparazione per il riutilizzo, riciclaggio e altre forme di recupero di materia dei rifiuti da costruzioni e demolizioni secondo la codifica del Regolamento (CE) n. 2150/2002 relativo alle statistiche sui rifiuti, anni 2014 – 2017 [19]

Aggregazione delle categorie dei rifiuti di cui all'allegato 1, sezione 2 del Regolamento (CE) n. 2150/2002		Aggregazione delle attività economiche secondo la classificazione NACE Rev. 2 di cui al Regolamento (CE) n. 1893/2006			
		F: Costruzioni			
Voce	Descrizione	2014	2015	2016	2017
(tonnellate)					
6.1	Rifiuti metallici ferrosi	3.046.070	2.949.921	3.058.448	3.770.442
6.2	Rifiuti metallici non ferrosi	279.915	283.820	318.907	294.218
6.3	Rifiuti metallici misti, ferrosi e non ferrosi	101.754	103.566	117.085	67.713
7.1	Rifiuti in vetro	60.098	67.077	65.492	67.604
7.4	Rifiuti in plastica	11.537	21.980	14.888	15.725
7.5	Rifiuti in legno	113.260	119.110	137.173	150.650
12.1	Rifiuti minerali della costruzione e della demolizione	24.933.991	25.932.340	26.235.653	27.403.831
Totale nazionale		28.546.625^{a,b}	29.477.814^{a,b}	29.947.646^{a,b}	31.770.183^{a,b}

a) Inclusi i quantitativi di rifiuti avviati a copertura di discarica pari a 457.000 tonnellate nel 2014, 348.000 tonnellate nel 2015, 470.000 tonnellate nel 2016 e 513.000 tonnellate nel 2017.

b) Compresa le esportazioni pari a circa 89.000 tonnellate nel 2014, oltre 90.000 tonnellate nel 2015, quasi 89.000 tonnellate nel 2016 e 90.000 tonnellate nel 2017.

Fonte: ISPRA

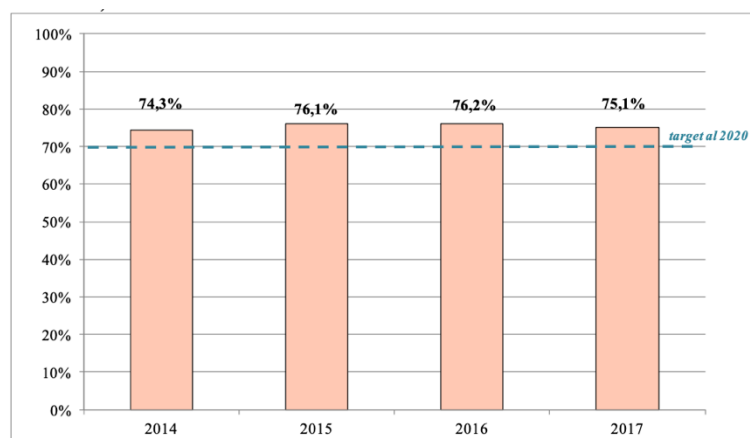
Il tasso di recupero è definito, secondo la Decisione 2011/753/UE [24], come il rapporto tra la “quantità recuperata di rifiuti da costruzioni e demolizioni” e la “quantità totale di rifiuti prodotti da costruzioni e demolizioni” ed è calcolato sulla base dei dati di produzione e gestione dei rifiuti da C&D.

Nel 2017 si attesta al 75,1%, al di sopra dell'obiettivo del 70% fissato dalla Direttiva 2008/98/CE [4] per il 2020 (Tabella 8, Figura 19).

Tabella 8: Tasso di recupero di materia dei rifiuti da costruzioni e demolizioni, anni 2014 - 2017 [19]

2014	2015	2016	2017
74,3%	76,1%	76,2%	75,1%

Fonte: ISPRA



Fonte: ISPRA

Figura 19: Andamento della percentuale di preparazione per il riutilizzo, riciclaggio e delle altre forme di recupero di materia, escluso il backfilling, dei rifiuti da costruzioni e demolizioni, anni 2014 - 2017 [19]

5.3 Obiettivi di riciclaggio

La Commissione Europea ha ritenuto necessario inserire il flusso di rifiuti da C&D tra quelli prioritari da sottoporre a monitoraggio per via delle volumetrie e dei quantitativi in gioco, fissando, nella Direttiva 2008/98/CE [4], uno specifico obiettivo di preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale, incluse le operazioni di colmatazione che utilizzano i rifiuti in sostituzione di altri materiali. Tale normativa è stata successivamente modificata dalla Direttiva 2018/851/UE [25] introducendo per la Commissione Europea la possibilità di modificare gli obiettivi.

L'obiettivo fissato per il 2020, come anticipato, è attualmente posto pari al 70% ad esclusione del materiale allo stato naturale definito dal codice CER 170504 dell'Elenco Europeo dei Rifiuti.

Le modalità di calcolo per la verifica del raggiungimento dell'obiettivo fissato dalla direttiva europea, sono state individuate dalla Decisione 2011/753/UE [24].

La preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio sono così definite:

- «preparazione per il riutilizzo»: le operazioni di controllo, pulizia e riparazione attraverso cui prodotti o componenti di prodotti diventati rifiuti sono preparati in modo da poter essere reimpiegati senza altro pretrattamento (articolo 3, punto 16 della Direttiva 2008/98/CE [4]);
- «riciclaggio»: qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i materiali di rifiuto sono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il ritrattamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento (articolo 3, punto 17 della Direttiva 2008/98/CE [4]).

5.4 Test di Cessione ai sensi del DM 5 Febbraio 1998

Il percorso di verifica della compatibilità ambientale dell'aggregato riciclato prodotto inizia già in fase di demolizione e di accettazione dei rifiuti nell'impianto di trattamento/produzione.

Giunto in tale impianto, un operatore effettua sul rifiuto, da cui si originerà l'aggregato, una verifica visiva del carico che permette l'individuazione di materiale estraneo o pericoloso (come MCA o FAV).

Nel caso di Codici CER a specchio viene eseguita in aggiunta una verifica analitica di laboratorio.

Ad esito positivo di questa prima ispezione è possibile accettare il rifiuto in ingresso ed avviarlo al processo produttivo dell'aggregato riciclato nello specifico impianto.

Dopo il trattamento di recupero è prevista l'esecuzione del test analitico di laboratorio, finalizzato a verificare l'impatto ambientale del rifiuto (verifica della sua compatibilità ambientale) e alla sua conseguente promozione da tale qualifica a quella di prodotto.

Il test è effettuato in accordo a quanto previsto dal D.M. 5 febbraio 1998 [26] come modificato dal D.M. n. 186/2006 [27].

Le attività di campionamento ed analisi dei campioni devono essere effettuate su lotti rappresentativi degli aggregati riciclati prodotti e devono essere condotte da operatori qualificati, in accordo alla normativa vigente.

Le attività di campionamento devono essere condotte sulla base della morfologia nella quale si presenta il lotto da sottoporre a prova, in accordo a quanto definito dalla UNI 10802 [28] e dalla UNI EN 14899 [29]. Tali attività devono essere corredate da un documento di tracciabilità dell'intervento relativo all'impianto, alla tipologia del materiale campionato, alle modalità di prelievo, al quantitativo del lotto, al numero di incrementi, ecc. Il campione dell'aggregato dopo l'accettazione da parte del Laboratorio è sottoposto alle attività di preparazione per la conduzione del Test di Cessione, che consistono nella riduzione dell'aggregato ad una granulometria inferiore ai 4 mm, al fine di rendere peggiorativa la prova.

Il TdC emula il contatto dell'aggregato con l'acqua piovana per valutare quali siano i quantitativi di specifici inquinanti rilasciati nel tempo alle matrici ambientali (suolo, sottosuolo e acque sotterranee).

La prova permette di valutare che le concentrazioni di quest'ultimi rispettino i limiti di legge previsti dal D.M. 5 febbraio 1998 [26], modificato dal D.M. n. 186/2006 All.3 [27], riportati nella Tabella 9:

Tabella 9: limiti previsti

Parametro	Unità di misura	Valori
pH	-	5.5 - 12
Arsenico	$\mu\text{g/l}$	50
Bario	Mg/l	1
Berillio	$\mu\text{g/l}$	10
Cadmio	$\mu\text{g/l}$	5
Cobalto	$\mu\text{g/l}$	250
Cromo totale	$\mu\text{g/l}$	50
Mercurio	$\mu\text{g/l}$	1
Nichel	$\mu\text{g/l}$	10
Piombo	$\mu\text{g/l}$	50
Rame	mg/l	0.05
Selenio	$\mu\text{g/l}$	10
Vanadio	$\mu\text{g/l}$	250
Zinco	mg/l	3
Cianuri totali	$\mu\text{g/l}$	50
Cloruri	mg/l	100
Fluoruri	mg/l	1.5
Nitrati	mg/l	50
Solfati	mg/l	250
Amianto	mg/l	30
COD	$\text{mg/l } O_2$	30

6. GLI AGGREGATI RICICLATI

6.1 Definizione

Gli aggregati sono una larga categoria di materiali minerali granulari usati nel settore edile e possono essere naturali, artificiali o riciclati da materiali precedentemente usati nelle costruzioni.

L'aggregato riciclato è più propriamente definito secondo la normativa UNI EN 12620 [13] come:

“aggregato risultante dalla lavorazione di materiale inorganico precedentemente utilizzato in edilizia”

6.2 Utilizzi

Tra i principali utilizzi degli aggregati riciclati si menzionano:

- aggregato riciclato per la realizzazione del corpo dei rilevati di opere in terra dell'ingegneria civile;
- aggregato riciclato per la realizzazione di sottofondi stradali, ferroviari, aeroportuali e di piazzali civili e industriali;
- aggregato riciclato per la realizzazione di strati di fondazione delle infrastrutture di trasporto e di piazzali civili e industriali;
- aggregato riciclato per la realizzazione di recuperi ambientali, riempimenti e colmate;
- aggregato riciclato per la realizzazione di strati accessori (aventi funzione anticapillare, antigelo, drenante, etc.);
- aggregato riciclato conforme alla norma armonizzata UNI EN 12620 [13] per il confezionamento di calcestruzzi secondo le indicazioni delle norme UNI 8520-1 [30], UNI 8520-2 [31].

Principalmente sono utilizzati come costituenti di materiali compositi, come i conglomerati cementizi e i conglomerati bituminosi, di cui ne costituiscono l'ossatura, e gli intonaci.

Nel caso dei conglomerati cementizi il loro compito è di resistere alle sollecitazioni meccaniche mentre la funzione di legante è affidata alla pasta cementizia.

Dal punto di vista quantitativo sono molto importanti poiché nella massa di un calcestruzzo ordinario rappresentano circa l'80% del peso. Per la buona riuscita di un calcestruzzo è fondamentale, oltre che la qualità degli aggregati (determinata tra l'altro alla loro durezza e alla loro purezza), anche la composizione granulometrica (curva granulometrica degli aggregati).

6.3 Ciclo produttivo

I rifiuti recuperabili più comuni della Classe 17 dell'Elenco Europeo dei Rifiuti, utilizzati nella produzione di aggregati riciclati, sono riportati in Tabella 10.

Tra quelli riportati, certamente i codici CER più importanti dal punto di vista quantitativo, con percentuali complessive superiori al 90% sono il codice CER 170904 (materiali misti da demolizione) e il codice CER 170504 (terre e rocce da scavo).

Tabella 10: principali codici CER di rifiuti recuperabili

CER	Descrizione
010408	Scarti di ghiaia e pietrisco, diversi da quelli di cui alla voce 010407
010413	Rifiuti prodotti dalla lavorazione della pietra, diversi da quelli di cui alla voce 010407
101311	Rifiuti della produzione di materiali compositi a base di cemento, diversi da quelli di cui alle voci 101309 e 101310
170101	Cemento
170102	Mattoni
170103	Mattonelle e ceramiche
170107	Miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse di quelle di cui alla voce 170106
170302	Miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 170301
170504	Terre e rocce, diverse da quelle di cui alla voce 170503
170508	Pietrisco per massicciate ferroviarie, diverse da quelle di cui alla voce 170507
170904	Rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 170901, 170902 e 170903

Un impianto di trattamento dei rifiuti da C&D, a prescindere dalla tecnologia utilizzata, deve essere in grado di suddividere il materiale in ingresso in tre flussi:

- la frazione lapidea nuovamente utilizzabile;
- la frazione leggera (carta, legno, plastica, impurezze, etc.);
- la frazione metallica.

Le principali fasi che caratterizzano un processo di trattamento tradizionale dei suddetti rifiuti sono:

- frantumazione, consistente in una riduzione delle dimensioni dei rifiuti per renderli adatti all'impiego finale;
- separazione, consistente nell'eliminazione dei materiali indesiderati, quali ferro, legno, plastica etc.;
- vagliatura, finalizzata a separare gli aggregati in base alla loro dimensione per ottenere le frazioni granulometriche desiderate.

Oltre alla tecnologia adottata, è importante anche il processo di demolizione effettuato.

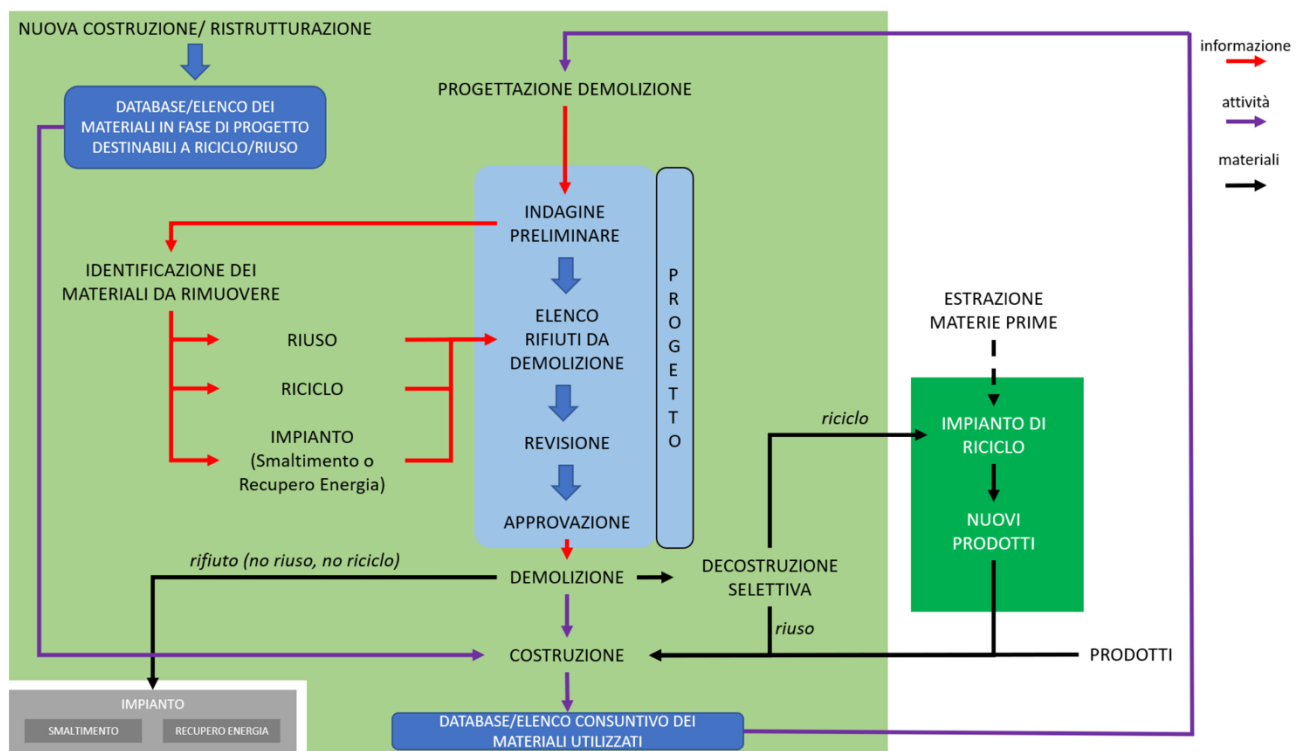
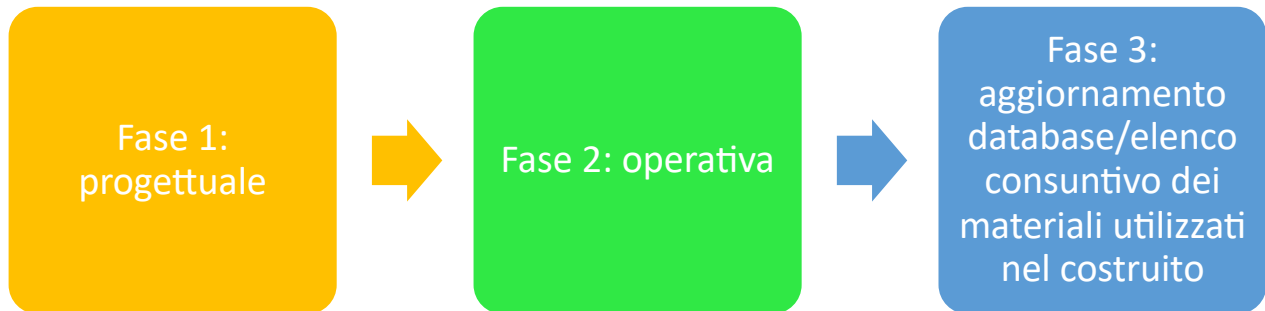
I rifiuti prodotti durante la demolizione delle strutture in calcestruzzo infatti sono costituiti da una molteplicità di materiali tra i quali sono presenti anche frazioni indesiderate (ad es. carta, plastica e legno, gesso, etc.), la cui presenza influirebbe negativamente sulla qualità dell'aggregato riciclato.

Un rifiuto selezionato permette invece di risparmiare sui costi di smaltimento o trattamento (i quali sono proporzionali all'eterogeneità del rifiuto e alla presenza di sostanze inquinanti), oltre che garantire al materiale riciclato un adeguato livello di qualità. Inoltre separando all'origine le differenti tipologie di rifiuti è possibile avviare a trattamento non solo i materiali tipici delle costruzioni ma anche il legno, la plastica, il vetro e i metalli, che possono essere avviati alle rispettive filiere di recupero. Nella comune pratica industriale le imprese edili tendono già oggi ad effettuare quanto più possibile questo processo di separazione dei rifiuti in flussi omogenei.

I capitolati relativi ai lavori di demolizione raramente prevedono l'adozione di procedure selettive, che permettono il recupero e la migliore valorizzazione dei rifiuti edili. Un cambiamento normativo in tal senso, oltre che un cambiamento a livello progettuale e del ciclo di vita della struttura, non sarebbe mal visto dagli operatori di settore, siano essi imprese di costruzione, sia essi siano produttori di aggregati riciclati e artificiali perchè vedrebbero semplificata la loro vita in impianto.

In merito a questa criticità è stata recentemente pubblicata una Prassi di Riferimento, la UNI/PdR 75:2020 [32], in cui viene indicato il procedimento da seguire per l'applicazione della cosiddetta "decostruzione selettiva" e il recupero/riuso dei rifiuti in un'ottica di economia circolare.

Il procedimento descritto si applica sia a edifici esistenti, da ristrutturare o demolire, sia a edifici di nuova costruzione e si articola in tre fasi:



Schema 1: processo di decostruzione selettiva [32]

La Fase 1 si compone dei seguenti compiti:

- indagine preliminare richiedente una valutazione delle caratteristiche del costruito, al fine di valutare e descrivere:
 - la tipologia e le caratteristiche della struttura oggetto di intervento;
 - le attività svolte sulla struttura per verificare se e come abbiano influito sulle caratteristiche qualitative dei materiali oggetto di demolizione;
 - le caratteristiche del sito e dell'area circostante;
 - le componenti o parti del costruito che possano essere smontate (infissi, sanitari, rubinetti, ecc.) suddividendole in base al potenziale livello di recuperabilità;
 - gli impianti di recupero (riciclo) e di smaltimento (discarica o recupero energetico) presenti nel territorio, individuando per ognuno di essi le tipologie di CER accettate;
 - la presenza di potenziali rifiuti pericolosi o altre criticità ambientali.

- progetto esecutivo consistente nell'integrare all'indagine preliminare le modalità e le operazioni per il corretto recupero dei rifiuti precedentemente individuati e per la loro corretta separazione. Il progetto deve:
 - individuare le modalità e gli interventi di smontaggio e di demolizione nonché i rifiuti da esse derivanti² con relativa assegnazione del CER;
 - individuare e dimensionare gli spazi riservati ai depositi temporanei dei rifiuti, secondo la classificazione CER ovvero per categorie omogenee; in particolare, deve essere prevista la netta separazione dei rifiuti pericolosi da quelli non pericolosi, secondo le normative applicabili e vigenti;
 - prevedere l'eventuale utilizzo di impianti di trattamento mobili ai fini del riciclo;
 - stimare le quantità che si produrranno;
 - stimare le quantità di rifiuti prodotte attraverso la parte di demolizione che non può essere o non sarà di tipo selettivo;
 - identificare il cronoprogramma dell'intero processo di decostruzione selettiva, individuando le tempistiche sia per lo smontaggio, che per la movimentazione e il trasporto dei vari rifiuti. Inoltre, dovrà essere elaborato il Piano di gestione dei Rifiuti e il Piano di Demolizione (previsto dal D.Lgs. n. 81/2008 [33]);

Le finalità della Fase 1, suddivisa nei compiti individuati, sono i seguenti output:

- database dei materiali
- progetto

Un esempio di documentazione da produrre in questa fase è contenuto nell'Appendice A (Prospetto 1, Prospetto 2, Prospetto 3, Prospetto 4).

La Fase 2 invece consiste nell'attuazione di quanto previsto nel progetto esecutivo. Essa si compone di:

- realizzazione all'interno del cantiere degli spazi da adibire a deposito temporanei dei rifiuti
- smontaggio delle parti destinate direttamente al riuso/riciclo, smaltimento o recupero energetico
- demolizione selettiva avente lo scopo di massimizzare le frazioni omogenee da destinare alle operazioni di recupero

Un esempio di documentazione da produrre durante la demolizione è contenuto nell'Appendice A (Prospetto 5, Prospetto 6, Prospetto 7, Prospetto 8, Prospetto 9, Prospetto 10).

La Fase 3 consiste nell'aggiornamento del database/elenco consuntivo dei materiali del costruito.

6.4 Tipologie di impianto di trattamento

Premessa

Gli impianti di recupero per i rifiuti da C&D sono di due differenti tipologie:

- impianti fissi: sono ubicati in modo fisso nel territorio;
- impianti mobili: sono impianti semoventi, ovvero dotati di cingoli, che possono essere trasportati presso i cantieri di produzione dei rifiuti.

Tali impianti sono autorizzati con:

- procedura ordinaria (ex. art. 208 del D.Lgs n. 152/2006 [1]).
I codici CER autorizzati al recupero nello specifico impianto sono quelli per i quali è stata fatta richiesta validata dall'Ente competente in materia (Regione, Provincia, Città metropolitana) e il processo produttivo ed i relativi prodotti di recupero sono esclusivamente quelli autorizzati dal procedimento specifico per singola domanda.
- procedura semplificata (ex. art. 216 del D.Lgs n. 152/2006 [1]).
I rifiuti recuperabili dagli impianti sono quelli previsti dall'Allegato 1 del D.M. 5 febbraio 1998 [26] e s.m.i., mentre i materiali prodotti devono far riferimento per le caratteristiche a quanto specificato nella Circolare n. 5205/2005 (Min. Ambiente) [11]. Tale procedura garantisce il raggiungimento del cosiddetto "end of waste", ma è molto rigida perché il processo di recupero deve essere effettuato solo ed esclusivamente nelle modalità prescritte dalla norma, sui rifiuti elencati nel Decreto, ed i prodotti ottenuti possono essere impiegati solo nei settori elencati.

Attualmente il settore è in attesa di un decreto che descriva una procedura per arrivare all'"end of waste" di una serie di rifiuti inerti. Tale decreto dovrebbe contenere un elenco dei rifiuti ammessi, le procedure di verifica da effettuare sugli aggregati riciclati sia di tipo fisico-meccaniche sia ambientali ed i limiti e/o i riferimenti alle norme tecniche per sancire il passaggio da rifiuto a prodotto.

Una importante novità, in campo di autorizzazioni, è stata introdotta dal D.Lgs n. 4/2008 [34] il quale impone per gli impianti di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno, l'obbligo della verifica di assoggettabilità alla VIA (Valutazione di impatto ambientale).

Diverse Regioni e Province hanno regolamentato ulteriormente la materia, è necessario pertanto, per avere un quadro normativo completo, verificare nel territorio di propria competenza ciò che è stato determinato in merito.

Nel territorio della Regione Piemonte ad esempio, province diverse rilasciano l'autorizzazione con tempistiche diverse.

Impianti di recupero fissi

Gli impianti di recupero fissi sono generalmente installati in aree di cava o ex cava.

Il tipico conferimento in tale tipologia di impianto è relativo a operazioni di demolizione o di scavo di dimensioni non tali da giustificare economicamente l'autorizzazione, il trasporto e l'esercizio di un impianto mobile.

Generalmente i conferimenti arrivano da distanze non superiori ai 50 km e da parte di imprese insediate sul territorio che abitualmente conferiscono.

Impianti di recupero mobili

Gli impianti mobili possono essere trasportati nel sito di produzione dei rifiuti.

Generalmente vengono installati nell'ambito di attività di riqualificazione o riconversione di aree di dimensioni tali da giustificare le tempistiche e i costi previsti da questa modalità di recupero dei rifiuti.

L'attività di demolizione è generalmente svolta dalla stessa impresa che gestisce l'impianto di recupero. Trattandosi generalmente di grandi demolizioni, tutte le attività di censimento e rimozione preventiva di rifiuti pericolosi (es. amianto) sono tipicamente previste e svolte durante le fasi preliminari alla demolizione stessa. L'impresa stessa, responsabile del materiale prodotto, effettua con la dovuta attenzione l'attività di selezione e allontanamento delle frazioni indesiderate.

L'impianto mobile può effettuare campagne di recupero sul territorio nazionale previa comunicazione da parte del richiedente all'Ente competente in materia, nel cui territorio si trova il sito prescelto. La comunicazione deve avvenire almeno 60 giorni prima dell'installazione dell'impianto, indicando le specifiche relative alla campagna di recupero, allegando eventuale ulteriore documentazione richiesta.

L'Ente può adottare prescrizioni integrative oppure può vietare l'attività con provvedimento motivato, qualora lo svolgimento della stessa nello specifico sito non sia compatibile con la tutela dell'ambiente o della salute pubblica.

6.5 Aggregati per il confezionamento dei calcestruzzi

Origine degli aggregati

Gli aggregati ordinariamente utilizzati per il confezionamento dei calcestruzzi ordinari sono:

- ghiaie e sabbie alluvionali estratte da letti di fiume o da cave, di forma più o meno arrotondata e liscia;
- pietrischi o sabbie provenienti dalla frantumazione di rocce, con spigoli vivi e di forma irregolare.

La loro qualità dipende in buona misura dalla sua natura petrografica e quindi dalla composizione mineralogica e dalle proprietà fisiche e chimiche che ne derivano.

Le NTC 2018 [35] ammettono poi l'utilizzo di aggregati riciclati nei calcestruzzi strutturali in determinate percentuali massime. Le percentuali sono fissate in funzione della composizione dell'aggregato (la quale è anch'essa normata) e della classe di resistenza del calcestruzzo da produrre.

La miscela confezionata con aggregati riciclati deve essere sottoposta a prove preventive indicate dalla norma UNI EN 12620 [13] e per l'individuazione dei requisiti chimico-fisici aggiuntivi degli aggregati riciclati rispetto a quelli naturali si può far riferimento alle norme UNI 8520-1 [30] e UNI 8520-2 [31].

Requisiti degli aggregati

Gli aggregati devono possedere un'adeguata resistenza meccanica in quanto costituiscono lo scheletro del calcestruzzo.

Non devono essere gelivi, cioè non devono disintegrarsi quando, saturi d'acqua, sono portati a temperature tali da comportare la formazione di ghiaccio. Questa proprietà è legata alla loro porosità.

In questo caso è importante la dimensione dei pori e la loro interconnessione, perchè queste due caratteristiche combinate in modo opportuno consentirebbero all'acqua di penetrare all'interno dell'aggregato e di gelare senza consentirne una rapida fuoriuscita causando la rottura dello stesso.

Non devono contenere inoltre:

- solfati, i quali provocano la formazione dell'ettringite;
- forme di silice amorfa alcali-reattiva causa della reazione alcali aggregati;
- cloruri che comportano il rischio di corrosione delle armature. Nel caso di calcestruzzi non armati la presenza di cloruri non è dannosa, ma determina solo un problema di carattere estetico nei manufatti soggetti a cicli di bagnatura e asciugamento che determinano l'insorgere di depositi salini superficiali (efflorescenze). La loro presenza è elevata nelle sabbie di origine marina, le quali possono essere utilizzate previo preliminare trattamento di lavaggio da effettuare in appositi impianti.

Devono essere privi inoltre di impurità quali ad esempio:

- limo, argilla, humus (terreni vegetali) che possono compromettere l'adesione tra aggregato e matrice cementizia, determinando una riduzione della resistenza meccanica del materiale ma non della durabilità del calcestruzzo. Questi inquinanti possono essere eliminati mediante lavaggio;
- materie organiche che possono compromettere il processo di idratazione del cemento e pertanto rallentare o ridurre lo sviluppo della resistenza meccanica. Anche in questo caso la loro presenza non compromette la durabilità del materiale.

Va verificata inoltre la capacità di assorbimento d'acqua.

La UNI 8520-2 [30] definisce anche i limiti che gli aggregati devono rispettare in merito al contenuto di determinate sostanze nocive, tra le quali figurano anche quelle riportate precedentemente.

Marcatura CE

Il procedimento di Marcatura CE è regolato dal Regolamento UE n. 305/2011 [36] che ha recepito e sostituito la precedente Direttiva 89/106/CE [37] relativa ai prodotti da costruzione.

Tale regolamento rientra nel processo di armonizzazione del libero scambio dei prodotti all'interno dei Paesi UE ed SEE, prescrivendo e regolamentando il processo di marcatura dei prodotti da costruzione, indicando le regole comuni per l'indicazione delle loro prestazioni, della loro identificazione e le loro destinazioni d'uso.

In merito a quest'ultimo punto il regolamento lascia ai singoli Paesi la libertà di definire specifiche regole tecniche e vincoli d'uso nei propri territori.

Non è quindi né un marchio di qualità, né un marchio di origine ma è un iter che i produttori/commercianti devono effettuare sui prodotti in caso di commercializzazione degli stessi sul territorio italiano (e europeo).

Anche gli aggregati riciclati perciò devono essere sottoposti a marcatura e le destinazioni d'uso possibili ad oggi, regolamentate dalla normativa vigente, sono riportate in Tabella 11.

Tabella 11: norme tecniche di riferimento per relative destinazioni d'uso

Norma armonizzata	Destinazione d'uso degli aggregati
UNI EN 12620	Aggregati per calcestruzzo
UNI EN 13043	Aggregati per conglomerati bituminosi
UNI EN 13055-1	Aggregati leggeri per calcestruzzi e malte
UNI EN 13055-2	Aggregati leggeri per conglomerati bituminosi
UNI EN 13139	Aggregati per malta
UNI EN 13242	Aggregati per materiali con leganti idraulico per uso in lavori di ingegneria civile e costruzione di strade
UNI EN 13383	Aggregati per opere di protezione idraulica
UNI EN 13450	Aggregati per massicciate per ferrovie

Per la marcatura degli aggregati sono previsti due soli sistemi di attestazione di conformità CE tra i sei normati.

I sistemi di marcatura sono denominati 4, 3, 2, 2+, 1, 1+ e indicano un livello di controllo crescente.

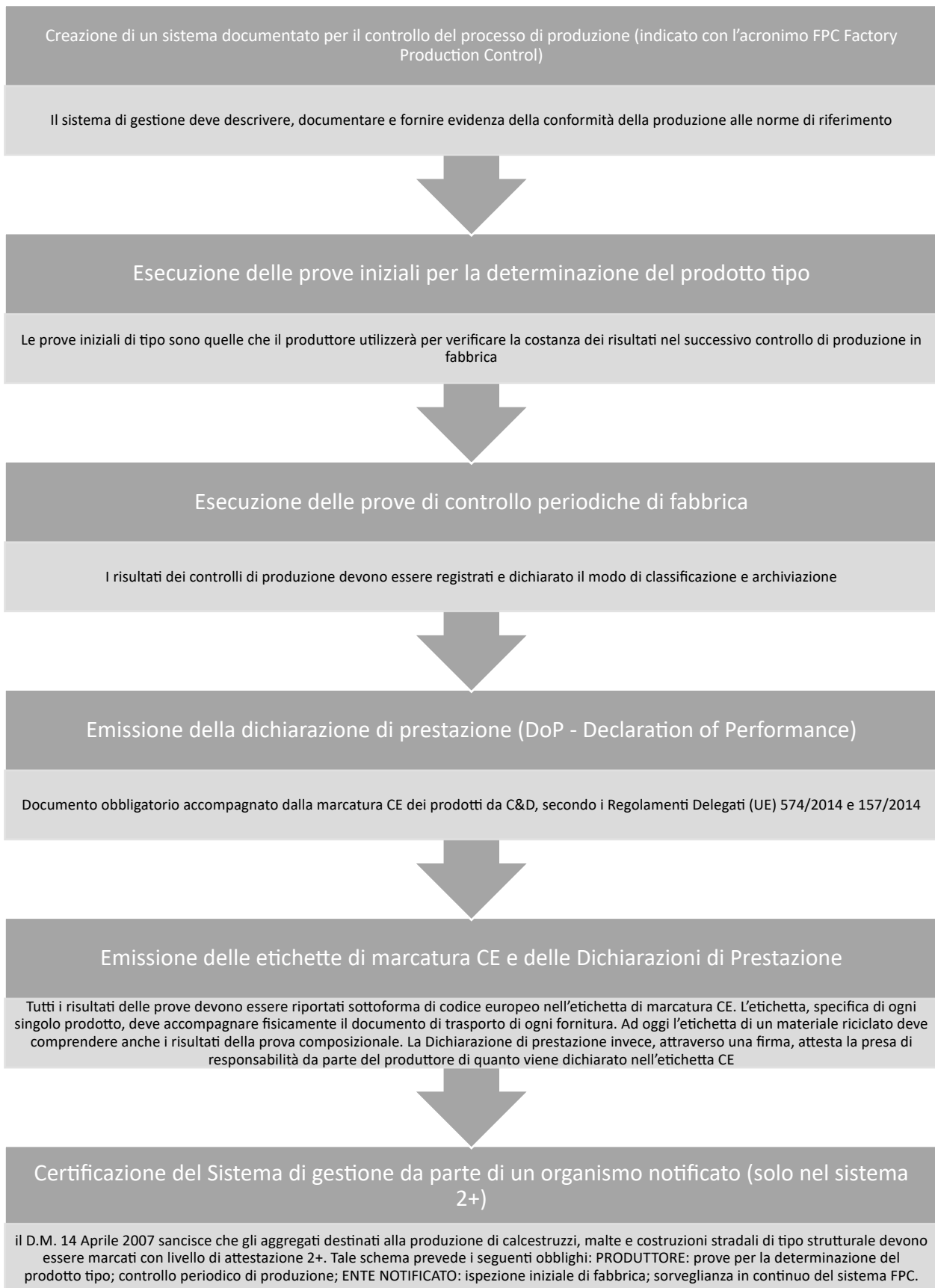
Per gli aggregati riciclati sono previsti due livelli di marcatura:

- livello 4: è richiesto solo una dichiarazione di conformità CE³ alla norma UNI EN 12620 [13] rilasciata dal produttore (con riferimento al livello di attestazione);
- livello 2+: per le opere per cui è richiesto un elevato grado di sicurezza – Per tale livello è richiesta una dichiarazione di conformità CE alla norma UNI EN 12620 [13] rilasciata dal produttore (con riferimento al sistema di attestazione) accompagnata dalla certificazione del Controllo del processo di Fabbrica ("Factory Production Control" o FPC) rilasciata da un organismo notificato. È il caso delle opere in calcestruzzo armato.

La norma relativa a tale utilizzo, la UNI EN 12620 [13], è stata revisionata nel 2008 allo scopo di inserire specifici requisiti per gli aggregati riciclati e, sempre nello stesso anno, è stata revisionata la UNI EN 13242 [7] facente riferimento all'utilizzo degli aggregati con i leganti idraulici.

³ Nelle dichiarazioni di conformità spesso è riportata la sigla **NR** che significa "nessun requisito". Si tratta di una categoria che può essere utilizzata per quelle proprietà che non sono richieste per tutte le destinazioni d'uso.

L'iter per poter apporre la marcatura CE è il seguente [38]:



Dichiarazione di prestazione

La vecchia dichiarazione di conformità per il settore è stata sostituita dalla relativa DoP, rilasciata per ogni specifico prodotto. Il documento contiene la destinazione d'uso del prodotto, le caratteristiche prestazionali e tutti gli elementi utili per la sua rintracciabilità (lotto di produzione, commessa, ecc.) ed è l'atto finale con cui si certifica la costanza della prestazione e dei requisiti di uno specifico prodotto.

Le novità rispetto alla vecchia dichiarazione, indicate secondo il regolamento CPR [37] sono:

- l'inserimento, fra i requisiti essenziali di un prodotto, della sostenibilità delle risorse naturali e di informazioni relative alle sostanze pericolose;
- introduzione della tabella delle prestazioni nella struttura della dichiarazione, formata da 10 punti;
- sull'etichetta della marcatura CE va riportato il n° della DoP relativa al prodotto.

La DoP si chiama così in quanto è la dichiarazione delle prestazioni dello specifico materiale, andando quindi oltre le informazioni incluse nella precedente dichiarazione di conformità la cui validità decorre dall'emissione del Certificato di FPC da parte dell'Organismo accreditato

Etichetta CE

L'etichetta di marcatura CE riprende in parte ciò che è contenuto nella DoP e nella versione semplificata deve riportare almeno le seguenti informazioni:

- marcatura di conformità CE riportante il simbolo "CE";
- numero di identificazione dell'Organismo di certificazione (solo nel caso di sistema 2+ - es. 1370);
- nome/logo e indirizzo del produttore;
- cifre finali dell'anno in cui è stata applicata la marcatura (es. 02 per 2002);
- numero del certificato di conformità dell'FPC (es. 1370CPR). Spesso tale numero è associato al precedente (es. 1370CPR-0241);
- norma a cui il prodotto è conforme (es. UNI EN 12620).

Nella forma estesa l'etichetta può contenere anche la descrizione del prodotto, le sue informazioni e le sue caratteristiche rilevanti.

Documentazione di accompagnamento

Ogni fornitura deve essere accompagnata dalla seguente documentazione:

- documento di trasporto (DDT);
- dichiarazione di prestazione (DoP), comprendente l'etichettatura CE secondo Reg. UE n. 305/2011 [36].

Nomenclatura

Secondo la UNI EN 12620 [13] e la UNI 8520-1 [30] gli aggregati devono essere definiti nel seguente modo:

- aggregato: fine, grosso, naturale 0/8, misto, filler;
- origine: naturale, industriale, riciclato;
- dimensioni: tutti gli aggregati devono essere definiti in base al diametro superiore (D) e inferiore (d) dei setacci di riferimento. I valori superiore e inferiore del diametro devono essere scelti all'interno delle serie riportate nel prospetto 1 della UNI EN 12620 [13]. La denominazione diventa: tipo di aggregato d/D: es. riciclato 8/22,4;
- categoria: definita dalla categoria granulometrica G espressa in funzione della granulometrica dell'aggregato e della percentuale passante agli stacci D e d pertanto avremo le seguenti categorie:
 - G_CXX/YY : indica aggregato grosso. Nel caso ad esempio di aggregato 4/20 (d/D) risulta che XX è la percentuale del passante (in massa) al setaccio 20 mm pari a YY al setaccio 4 mm;
 - G_FXX : indica aggregato fine. Nel caso ad esempio di sabbia 0/4 risulta che XX è la percentuale del passante (in massa) al setaccio 4 mm;
 - $G_{NG}XX$: indica misto granulometrico naturale 0/8. Nel caso ad esempio di misto granulometrico naturale 0/8 risulta che XX è la percentuale del passante (in massa) al setaccio 8 mm;
 - $G_{A}XX$: indica aggregato misto. Nel caso ad esempio di aggregato misto 0/31,5 risulta che XX è la percentuale del passante (in massa) al setaccio 31,5 mm;
- tipologia: indica se l'inerte ha subito o meno una frantumazione (frantumato o non frantumato);
- composizione: viene indicata la natura petrografica sommaria dell'aggregato secondo la UNI EN 932-3 [39] e la classificazione secondo la UNI EN 933-11 [40];
- provenienza: nome della cava o giacimento di estrazione o altra provenienza.

Un esempio di marcatura è il seguente:

“aggregato misto riciclato 0/5,6 G_A 90 frantumato, costituito dalla lavorazione di materiale inorganico precedentemente utilizzato nelle costruzioni. L'aggregato proviene dalla frantumazione di: aggregati rocciosi frantumati, aggregati di ghiaia, calcestruzzo e altre miscele legate con leganti idraulici, mattoni, blocchi di muratura e calcestruzzo, asfalto frantumato recuperato. Provenienza dei materiali da demolizione: raggio di 20 km da Pianezza (TO). Sito produttivo in Pianezza (TO)”

La designazione così come su descritta deve essere riportata dal produttore di aggregati sul documento di accompagnamento del prodotto.

Classificazione in base alla massa volumica

La norma UNI EN 206 [14] classifica gli aggregati per il confezionamento dei calcestruzzi in base alla massa volumica:

- normali: $2000 \text{ kg/m}^3 < \rho < 3000 \text{ kg/m}^3$ (dopo essiccazione in stufa);
- leggeri: $\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$ (dopo essiccazione in stufa) oppure $\rho \leq 1200 \text{ kg/m}^3$ (dopo essiccazione in forno);
- pesanti: $\rho \geq 3000 \text{ kg/m}^3$ (dopo essiccazione in forno).

Classificazione in base alla granulometria

La norma UNI 8520-1 [30] definisce gli aggregati da utilizzare per il confezionamento dei calcestruzzi in relazione alla percentuale di passante a un determinato setaccio:

- filler: con passante al setaccio 0,075 (UNI 2332 [41]) maggiore del 90%;
- aggregati fini: con passante al setaccio 4 (UNI 2332 [41]) maggiore del 95%;
- aggregati grossi: con passante al setaccio 4 (UNI 2332 [41]) minore del 5%.

la norma UNI EN 12620 [13] invece differisce dalla precedente perché definisce gli aggregati in base al diametro minimo (d) e massimo (D) riferiti a un determinato passante. Le classi sono definite indicativamente come:

- aggregato grosso: $d \geq 2$ mm; $D \geq 4$ mm;
- aggregato fine (sabbia): $d = 0$; $D \leq 4$ mm;
- misto granulometrico naturale 0/8: $d = 0$; $D \leq 8$ mm;
- aggregato misto (all in): $d = 0$; $D \leq 45$ mm;
- filler: più del 70% di passante al setaccio 0,063 mm.

È stato usato il termine “indicativamente” perché la norma prescrive oltre al diametro minimo e massimo anche le percentuali ai passanti e le tolleranze che l’aggregato deve rispettare per poter essere così classificato.

Serie di setacci

La UNI EN 12620 [13] indica le coppie di setacci tra i quali è possibile scegliere per individuare la classe granulometrica. La Tabella 12 riporta tali serie:

Tabella 12: serie di setacci

serie di base	serie di base + serie 1	serie di base + serie 2
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6(5)	-
-	-	6,3(6)
-	-	10
-	11,2(11)	-
-	-	12,5(12)
16	16	16
-	-	20
-	22,4(22)	-
31,5(32)	31,5(32)	31,5(32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63

I numeri esprimono l’apertura dei setacci in mm mentre i numeri fra parentesi rappresentano questa dimensione arrotondata, al fine di semplificare la scrittura.

Ad esempio, invece di sabbione riciclato 0/5,6 si può scrivere sabbione riciclato 0/5.

Non si possono utilizzare setacci appartenenti a serie diverse, ovvero è consentito solo scegliere dalla serie base, dalla serie base più la serie 1, oppure dalla serie base più la serie 2, ma non tra serie 1 e serie 2.

Composizione granulometrica

La composizione granulometrica è importante per ottenere le prestazioni richieste al calcestruzzo. Una composizione ottimale prevede l'utilizzo di varie frazioni granulometriche, da quelle più fini a quelle più grosse, al fine di minimizzare i vuoti interstiziali tra gli aggregati e avere così uno scheletro lapideo molto denso con ottime caratteristiche meccaniche e di durabilità (maggior densità implica maggior impermeabilità). Il cemento stesso ha la funzione di inerte finissimo oltre che quella di legante. Nella produzione di calcestruzzi con struttura aperta viene eliminata volontariamente la frazione fine.

Per la determinazione della frazione granulometrica si ricorre ad una operazione meccanica di vagliatura denominata anche setacciatura. Generalmente si determina la granulometria dei singoli aggregati e poi si forma la miscela in base alla curva granulometrica di riferimento, il cui significato sarà illustrato nel seguito.

Per effettuare l'analisi si fa ricorso a vagli o setacci che hanno forma e dimensioni normate. Questi vengono definiti:

- setacci quando sono costituiti da una rete metallica a maglia quadrata;
- crivelli quando hanno una lastra a fori circolari.

Le dimensioni e le tolleranze dei vagli sono definiti dalla norma UNI 2332 [41].

Il campione viene preventivamente essiccato in forno ad una temperatura di 110 °C, poi successivamente viene fatto passare attraverso la serie di setacci sovrapposti a formare una pila chiusa con diametro delle maglie decrescente dall'alto verso il basso, con fondo chiuso da un coperchio per evitare la fuoriuscita del materiale.

Fissato il coperchio superiore si provvede ad agitare la pila meccanicamente, o manualmente, per facilitare il passaggio del materiale attraverso i setacci.

Viene pesata la frazione di materiale trattenuta da ogni setaccio e ne si determina la percentuale dividendola per il peso del campione secco. La percentuale di passante attraverso ogni singolo setaccio è determinata come differenza tra il 100% e il trattenuto in percentuale.

La curva granulometrica del campione è determinata ponendo in un diagramma l'apertura del setaccio in mm (o il suo logaritmo) come ascissa e la percentuale del passante in ordinata.

Per realizzare la curva granulometrica di riferimento, ovvero quella curva che permette di ottenere un calcestruzzo avente la massima densità, sono state proposte diverse formule teoriche che prendono il nome dai loro ideatori come Bolomey, Faury, Vallette, Dreux, ecc.; la più usata in Italia è quella di Fuller e Thompson:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dove:

- P è la percentuale di materiale passante allo setaccio di diametro d (mm);
- D è il diametro massimo dell'aggregato (mm).

Bolomey ha modificato la formula di Fuller aggiungendo un coefficiente "A" funzione della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato (alluvionale o frantumato):

$$P = A + (100 - A) \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

“A” assume i seguenti valori:

Tabella 13: coefficienti di Bolomey

tipo di aggregato	consistenza secondo Abrams	coefficiente A
alluvionale	S1	4-8
alluvionale	S2-S3-S4	8-10
alluvionale	S5	10-12
frantumazione	S1	6-10
frantumazione	S2-S3-S4	12-14
frantumazione	S5	14-16

Più la curva reale si avvicina a quella teorica più il calcestruzzo risulterà compatto.

Diametro massimo dell'aggregato

Il diametro dell'aggregato è funzione dello spessore del copriferro e dell'interferro minimo delle armature metalliche, nel caso dei calcestruzzi armati, e deve essere scelto in modo che il calcestruzzo possa essere gettato e compattato attorno all'armatura senza pericolo di ostruzione da parte della stessa o senza pericolo di segregazione del calcestruzzo.

Le NTC 2018 [35], in accordo con quanto stabilito dalla UNI EN 1992-1-2, conosciuta anche come Eurocodice 2 [42], stabiliscono che il diametro massimo dell'aggregato deve essere tale che:

- $D_{max} < 1/4$ della minima dimensione dell'elemento strutturale;
per non avere un materiale eterogeneo;
- $D_{max} < \text{dell'interferro (in mm)} - 5 \text{ mm}$;
per evitare che l'aggregato grosso ostruisca il flusso del calcestruzzo attraverso l'armatura;
- $D_{max} < 1,3$ dello spessore del copriferro;
per evitare l'ostruzione del passaggio del calcestruzzo tra i casseri e l'armatura.

7. CARATTERISTICHE DEGLI AGGREGATI RICICLATI E DEI CALCESTRUZZI DERIVATI

7.1 Premessa

L'aggregato riciclato grosso essendo prodotto dalla frantumazione e vagliatura di rifiuti derivanti da operazioni da costruzione e demolizione è costituito da una moltitudine di materiali.

Principalmente si possono suddividere i suoi costituenti in macrocategorie facendo riferimento al paragrafo "Classificazione costituenti degli aggregati riciclati grossi" della norma UNI EN 12620 [13], riportati in Tabella 14:

Tabella 14: classificazione costituenti aggregati grossi riciclati secondo UNI EN 12620

Costituenti	Contenuto percentuale in massa	Categoria
R_c	≥ 90	R_{c90}
	≥ 80	R_{c80}
	≥ 70	R_{c70}
	≥ 50	R_{c50}
	< 50	$R_{cDichiarato}$
$R_c + R_u$	Nessun requisito	R_{cNR}
	≥ 95	R_{cu95}
	≥ 90	R_{cu90}
	≥ 70	R_{cu70}
	≥ 50	R_{cu50}
R_b	< 50	$R_{cuDichiarato}$
	Nessun requisito	R_{cuNR}
	≤ 10	R_{b10-}
	≤ 30	R_{b30-}
	≤ 50	R_{b50-}
R_a	> 50	$R_{bDichiarato}$
	Nessun requisito	R_{bNR}
	≤ 1	R_{a1-}
	≤ 5	R_{a5-}
	≤ 10	R_{a10-}
$X + R_g$	≤ 0.5	$XR_{g0.5-}$
	≤ 1	XR_{g1-}
	≤ 2	XR_{g2-}
FL	$\leq 0,2$	$FL_{0.2-}$
	≤ 2	FL_{2-}
	≤ 5	FL_{5-}

In cui:

- R_c : calcestruzzo, prodotti di calcestruzzo, malta; elementi di calcestruzzo per muratura;
- R_u : aggregato non legato, pietra naturale; aggregato legato idraulicamente;
- R_b : elementi di laterizio per muratura (mattoni e piastrelle); elementi di silicato di calcio per muratura; calcestruzzo aerato non galleggiante;
- R_a : materiali bituminosi;
- R_g : vetro;
- X: altro;
- FL: materiale galleggiante (in volume).

La UNI 8520-2 [30] specifica poi che gli aggregati riciclati grossi sono ammessi nei calcestruzzi se appartengono a una delle tipologie seguenti:

TIPOLOGIA A: R_{c90} , R_{cu95} , R_{b10-} , R_{a1-} , FL_{2-} , XR_{g1-}

TIPOLOGIA B: R_{c50} , R_{cu70} , R_{b30-} , R_{a5-} , FL_{2-} , XR_{g2-}

La UNI 11104 [43] e la UNI EN 206 [14] definiscono inoltre le percentuali di aggregati riciclati grossi utilizzabili all'interno dei calcestruzzi.

Si può osservare quindi come la maggior frazione in massa sia costituita da calcestruzzo e suoi prodotti, oltre che da aggregati non legati, legati e pietre naturali.

Riguardo gli aggregati riciclati fini invece, come si vedrà nel seguito, si può affermare che essi sono costituiti quasi interamente da materiale derivante dalla frantumazione della malta aderente, la cui composizione verrà illustrata nel seguito.

L'osservazione sperimentale ha confermato quindi che gli aggregati riciclati grossi utilizzati per la produzione di calcestruzzi sono quindi scomponibili in due fasi: l'aggregato naturale e la malta aderente.

L'aggregato naturale non determina grosse criticità nel riutilizzo dei materiali riciclati nei calcestruzzi.

La malta aderente, essendo una matrice molto porosa, inficia le proprietà meccaniche del calcestruzzo e determina un alto assorbimento d'acqua con la conseguente perdita di lavorabilità dell'impasto fresco.

Per mantenere una buona lavorabilità e una buona resistenza è necessario quindi dosare accuratamente il quantitativo d'acqua e soprattutto analizzare come gli altri fattori interagiscano tra loro influenzando sulle proprietà del calcestruzzo fresco e indurito.

Nel corso dell'ultimo ventennio sono stati effettuati numerosi studi sulle caratteristiche, le proprietà e i metodi di trattamento di questi aggregati. L'argomento è stato trattato in più modi, a partire dall'approccio sperimentale fino a quello statistico.

Yong-Huang et al. [44] hanno studiato le interazioni tra i diversi fattori influenti sulla resistenza e sulla lavorabilità dei RAC utilizzando l'analisi statistica oltre che il loro contributo relativo su tali proprietà.

Il RAC è il calcestruzzo confezionato con una certa percentuale, o interamente, di aggregati riciclati, chiamati anche RCA. Normalmente, poiché il range di proprietà meccaniche è molto ampio e le variabili in gioco sono molte, è necessario pianificare meticolosamente un esperimento per ottenere risultati significativi e attendibili.

Generalmente si effettuano una serie di prove modificando il valore di alcune variabili, mantenendo fisso il valore delle altre, e si analizzando i risultati conseguiti.

Assumendo che un esperimento ingegneristico abbia n variabili (control factor) e 2 valori di tali variabili (control level), con il metodo tradizionale devono essere condotte 2^n prove per avere risultati attendibili, e da questo si evince chiaramente che ciò comporta un ingente costo in termini di tempo e denaro.

Allora per ridurre il numero di prove necessarie mantenendo la capacità di distinguere i singoli effetti di una variabile sui risultati, ovvero le proprietà del RAC, si deve adottare una tecnica di designazione degli esperimenti (DOE) [45].

In questa tecnica vengono effettuati solo le prove con una determinata combinazione di variabili.

La teoria dietro a ciò considera sia il process design sia l'analisi statistica dei dati, utilizzando la combinazione di strumenti matematici e statistici.

In [44] sono stati utilizzati: matrice diagonale, analisi della varianza ANOVA (Analysis of Variance) e il test di significatività con la F statistic [46] [47].

I 5 control factor utilizzati invece sono:

- w/c, rinominato A;
- % di aggregati riciclati, rinominato B;
- % di sabbia di fiume, rinominato C;
- contenuto di mattoni frantumati, rinominato D;
- pulizia degli aggregati, rinominato E.

Per ogni control factor sono state date due possibilità di valori (control level) come riassunto dalla Tabella 15.

Tabella 15: variabili e relativi valori [44]

Main control factors and factor levels			
Designation	Control factor	Level 1	Level 2
A	water/cement ratio	0.5	0.7
B	volume ratio of recycled coarse aggregate	0.420	0.404
C	replacement by river sand	0%	100%
D	content of crushed brick	5%	0%
E	cleanness of aggregate	as-is	water-washed

La matrice ortogonale utilizzata è l' L_{16} del metodo di Taguchi che richiede solo 16 prove per ottimizzare il mix di progetto [46] [47].

I risultati sulle proprietà del calcestruzzo fresco e indurito sono riassunti in Tabella 16:

Tabella 16: abbassamento e resistenza a compressione [44]

Average values of slumps and compressive strengths for 16 sets of mixture						
No.	Test sequence	Designation of mixture	Slump (mm)	Average compressive strength (MPa)		
				7 days	14 days	28 days
1	5	A1B1C1D1E1	175	17.79	20.94	22.91
2	10	A1B1C1D2E2	155	17.54	24.89	25.23
3	7	A1B1C2D1E2	180	18.35	22.04	28.88
4	15	A1B1C2D2E1	180	23.15	25.94	30.17
5	1	A1B2C1D1E2	95	21.96	26.22	29.91
6	11	A1B2C1D2E1	140	17.02	18.92	20.26
7	13	A1B2C2D1E1	105	23.64	29.35	33.60
8	14	A1B2C2D2E2	50	28.35	33.79	36.16
9	12	A2B1C1D1E2	100	13.22	17.17	18.48
10	6	A2B1C1D2E1	200	5.84	7.57	9.74
11	2	A2B1C2D1E1	150	10.53	13.88	17.64
12	16	A2B1C2D2E2	90	21.55	23.99	27.66
13	3	A2B2C1D1E1	160	7.87	9.97	12.92
14	8	A2B2C1D2E2	190	8.76	11.92	14.32
15	4	A2B2C2D1E2	115	11.87	14.63	19.86
1	9	A2B2C2D2E1	160	11.81	16.22	20.42

L'ANOVA conseguita sugli slump ha mostrato che ci sono 6 tra interazioni e fattori significativi:

- A x B
- E
- C x D
- B
- C
- A x D

L'analisi di Pareto del contributo relativo derivante dall'ANOVA per gli slump è riassunta nella Figura 20 e mostra che la somma di questi 6 fattori incide per l'83,97%.

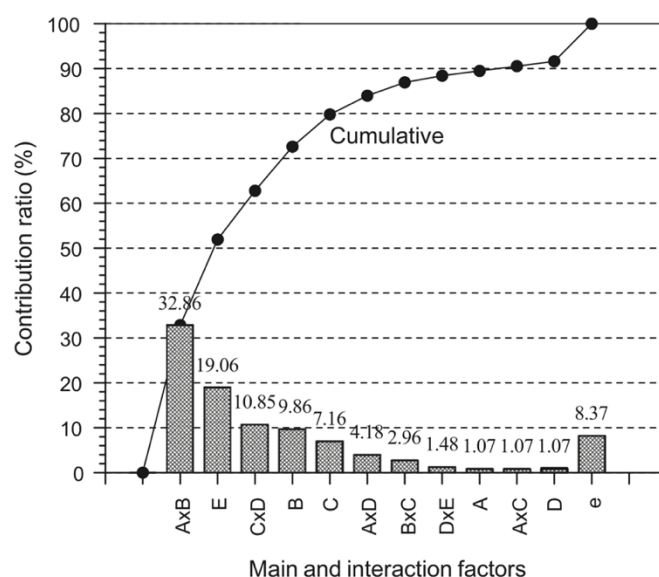


Figura 20: Analisi di Pareto per il contributo relativo dall'ANOVA per gli slump [44]

Tra questi, 3 sono control factor, e sono E, B e C rappresentanti rispettivamente pulizia degli aggregati, volume degli aggregati riciclati e grado di rimpiazzamento con sabbia di fiume.

Come ci si aspetta, un maggior slump implica una migliore lavorabilità, a patto che non ci sia segregazione nel calcestruzzo. Gli altri tre fattori di interazione, A X B, C X D e A X D, indicano l'interazione tra A, B, C e D.

L'analisi di questi tre fattori ha mostrato che la miglior combinazione è A1B1. Analoghe considerazioni sono state fatte per le altre due interazioni.

L'insieme dei risultati ottenuti ha evidenziato che la miglior combinazione dei valori delle cinque variabili per lo slump ottimale dei mix oggetto di studio è A1B1C1D2E1 ovvero w/c pari a 0,5, volume relativo di aggregati riciclati grossi pari a 0,420, 0% sabbia di fiume, 0% di mattoni e aggregati riciclati utilizzati così come forniti.

Lo slump per questa configurazione varia tra 110 e 160 mm ed è adatto per la maggior parte dei lavori.

Nella Figura 21 è rappresentata invece la resistenza relativa a 7 e 14 giorni rispetto a quella a 28 giorni, e le relative medie, pari rispettivamente a 0,689 e 0,852.

È stato osservato che i mix aventi rapporto w/c più basso, pari a 0,5, sviluppano la resistenza più velocemente.

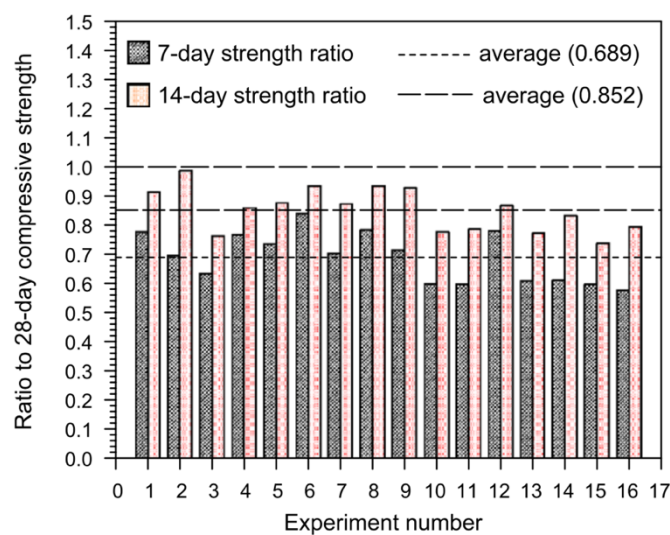


Figura 21: resistenza a compressione relativa a 7 e 14 giorni [44]

È stata effettuata un'ANOVA anche per la resistenza a compressione di Tabella 16 utilizzando come criterio per il controllo di qualità la resistenza a compressione a 28 giorni dei campioni.

Sono emersi 5 fattori significativi:

- A
- C
- E
- C x D
- A x B

Il loro contributo totale è pari al 95,02 % come risulta nella Figura 22:

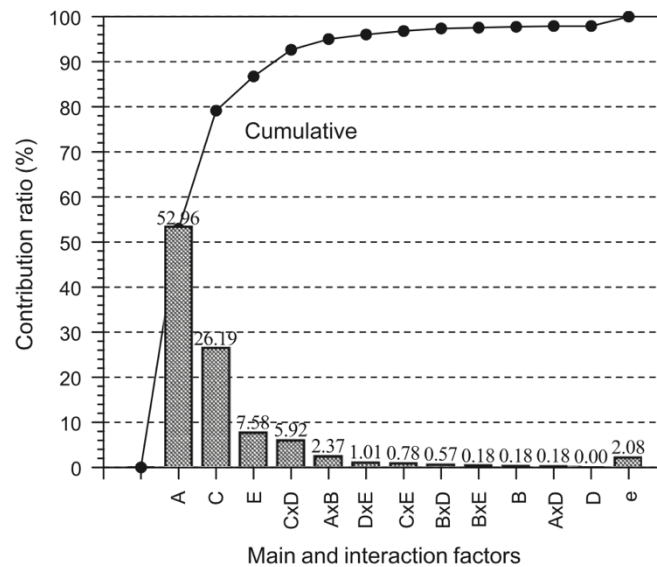


Figura 22: Analisi di Pareto del contributo relativo dall'ANOVA per la resistenza a 28 giorni [44]

Di questi 5, 3 sono control factor e corrispondono ad A, C ed E. Il loro contributo incide per l'86,74 %, perciò risulta che la resistenza a compressione è fortemente influenzata dal rapporto w/c, dal grado di sostituzione con sabbia naturale di fiume e dalla pulizia degli aggregati.

I restanti due fattori di interazione, C X D e A X B hanno richiesto considerazioni aggiuntive.

In definitiva però è emerso che la miglior combinazione dei valori delle cinque variabili è risultata essere A1B2C2D2E2, designante il mix avente la miglior resistenza a compressione, pari a 36,16 MPa, come da Tabella 16.

Questo mix ha però uno slump di 50 mm, il peggiore.

Ciò dimostra che un determinato mix può rispettare determinati requisiti ma fallire in altri.

Da questo studio è emerso quindi che, poiché le proprietà meccaniche dei mix confezionati con aggregati riciclati dipendono da molti fattori, e non è possibile rispettare un solo requisito ignorando gli altri: slump e resistenza a compressione sono entrambi essenziali.

Per scegliere il mix ottimale è perciò necessario considerare altri fattori come costi, presenza di additivi ecc.

In questo studio quindi, la combinazione migliore per avere sia un adeguato slump che un'adeguata resistenza a compressione è A1B1C2D2E1.

Questa combinazione corrisponde al mix 4 avente slump di 180 mm e resistenza a compressione a 28 giorni di 30,17 MPa.

Si può concludere che il mix rispettante i requisiti di slump e resistenza è così formato:

- w/c pari a 0,5;
- volume relativo di aggregati riciclati grossi pari al 42% circa;
- 100% sabbia di fiume;
- 0% mattoni frantumati;
- aggregati riciclati non lavati.

Non è una sorpresa che gli aggregati riciclati non lavati incrementano lo slump e peggiorano la resistenza: questo è dovuto al fatto che su di essi è presente un sottile layer di fango che agisce da lubrificante. Per le applicazioni pratiche si consiglia tuttavia di lavarli e aggiungere all'impasto additivi specifici per raggiungere i requisiti prefissati.

In generale è emerso quindi che i fattori più influenzanti sono il rapporto w/c e il volume di RCA utilizzato. Il loro contributo relativo è del 32,86%.

Si passerà ora a presentare le principali caratteristiche degli RCA e dei RAC che ne derivano basandosi sull'analisi effettuata da González-Taboada et al. [48] su un grande database di pubblicazioni (152, comprese tra il 1983 e il 2015) relative a tali materie prime secondarie e implementando tale analisi con alcune pubblicazioni trovate da letteratura.

7.2 Proprietà fisico-chimiche

Composizione

Come precedentemente affermato, gli RCA sono composti principalmente da calcestruzzo e suoi prodotti, oltre che da aggregati non legati, legati e pietre naturali.

La Figura 23 individua le percentuali relative dei costituenti secondo la UNI EN 933-1 [49]: il 90% dell'RCA è composto da malta, aggregati e aggregati con malta [48].

Molte norme e linee guida di tutto il mondo, riguardanti l'utilizzo degli aggregati nei calcestruzzi, si basano sulla composizione dell'aggregato.

In caso di RCA per RAC è imposto un minimo del 90% di rifiuto derivante da calcestruzzo (norme tedesche, brasiliane e belga) e un massimo del 10% di rifiuti derivante da opere murarie. In Inghilterra, Olanda, Norvegia e Danimarca questi limiti passano rispettivamente a 95% e 5% [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56]. La Spagna invece [57] stabilisce un massimo contenuto di laterizi del 5%, 1% per i materiali leggeri, 1% di asfalto e la somma di altri materiali come plastica, vetro e metallo inferiore all'1%. In generale con un ordinario processo di recupero si riescono a rispettare questi limiti.

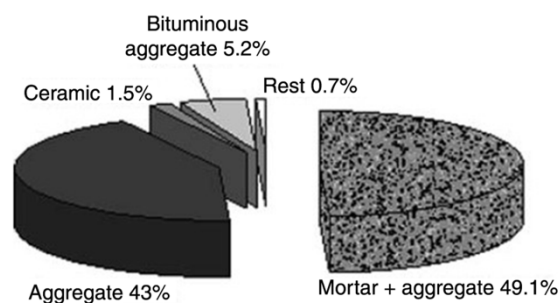


Figura 23: composizione RCA [48]

Malta aderente

La presenza della malta aderente rende la densità dell'aggregato bassa, per via della sua porosità, mentre rende alti il suo WA e il suo coefficiente di Los Angeles.

La quantità e qualità della malta attaccata è uno dei fattori chiave che determina le proprietà meccaniche dei RAC [58].

Quantità e qualità sono funzioni del calcestruzzo di origine, del processo di produzione e della distribuzione granulometrica dell'aggregato.

L'influenza del calcestruzzo di origine ad oggi non è ancora ben chiara.

Alcuni autori spiegano che durante il processo di frantumazione di un calcestruzzo di bassa classe di resistenza molta della malta si separa dall'aggregato, perché l'interfaccia tra i due è molto debole, e viene successivamente eliminata nel processo di vagliatura. Da ciò ne risulterà un aggregato con poca malta.

Altri autori affermano invece che la qualità della malta attaccata è molto bassa negli RCA derivati da calcestruzzi di bassa classe di resistenza, questo perché in essi il rapporto w/c è alto, e ciò produce una malta molto porosa e con prestazioni meccaniche scadenti.

Riguardo il processo di produzione, molti autori hanno proposto diversi trattamenti per ridurre la quantità di malta attaccata. Alcuni autori propongono:

- frantumazione meccanica (incrementando gli stage di frantumazione [59]);
- trattamenti termici (con microonde o riscaldamento convenzionale) [60];
- chimici (cicli di immersione in differenti solventi acidi come acido cloridrico, acido solforico e acido fosforico) [61].

I metodi di rimozione della malta aderente verranno meglio ripresi e illustrati nel seguito.

Sono stati anche effettuati degli studi sull'uso di diversi polimeri, utilizzati per la protezione di alcune strutture, nel trattamento degli RCA [62], ma nessuno di questi trattamenti è mai stato industrializzato.

È chiaro che il processo di frantumazione riduce la pezzatura del materiale ed essendo la malta aderente la fase più debole sarà quella più afflitta da questo processo. Quindi più malta attaccata c'è, più ci sarà frazione fine.

La presenza di questa componente inoltre implica che, a differenza del calcestruzzo normale, che è un prodotto costituito da tre fasi (a scala microscopica) comprendenti malta, aggregati e una ITZ, nel caso dei RAC, ci siano cinque fasi perché ci sono due ITZ, quella tra aggregato vergine e malta aderente e tra malta aderente e matrice cementizia (Figura 24).

La presenza della malta aderente rende la zona un punto debole del conglomerato, affliggendolo dal punto di vista della lavorabilità (slump), della durabilità (assorbimento d'acqua e permeabilità), della deformazione (modulo elastico, ritiro e resistenza a fatica) e delle proprietà meccaniche (resistenza a compressione) [63] [64].

Il contenuto di malta attaccata secondo letteratura è piuttosto vario:

- Hansen and Narud [64] riportano un contenuto del 30, 39 e 60% rispettivamente per le frazioni 16-30 mm, 8-16 mm e 4-8 mm e affermano che la qualità del calcestruzzo da cui derivano gli RCA influenza fortemente tale contenuto;
- Li [65] è in accordo con Hansen and Narud [64] ma afferma che la percentuale di malta aderente (20-30%) dipende anche dal processo di trattamento;
- Ravindrarajah e Tam [66] hanno trovato un contenuto del 50% circa;
- Sánchez and Alaejos [67] hanno trovato contenuti tra il 23 e il 44% per la frazione 8-16 mm e tra il 33 e il 55% per la frazione 4-8 mm.

Questa eterogeneità di risultati è dovuta probabilmente alla difficoltà nel misurarne il quantitativo, nella differenza del calcestruzzo di origine degli RCA e nel processo di trattamento e demolizione.

In generale quindi si può affermare che il quantitativo di malta attaccata generalmente varia da un 20-30% per la frazione sopra ai 16 mm per arrivare a un 50-60% per la frazione sotto gli 8 mm, dimostrando così una proporzionalità inversa con la dimensione dell'aggregato.

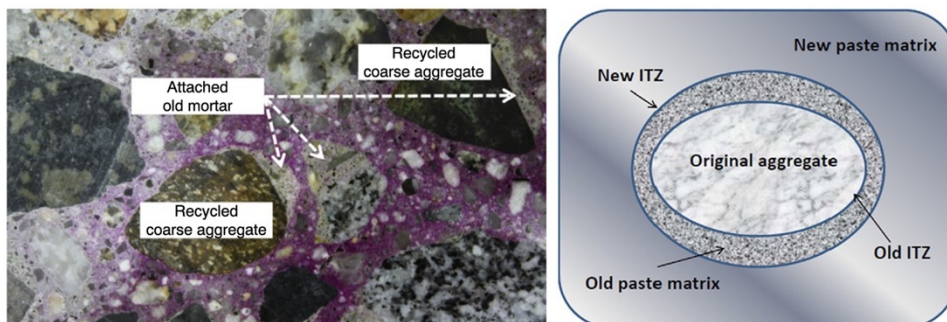


Figura 24: interfaccia degli aggregati [48]

Densità

La densità degli RCA è inferiore ai corrispettivi NCA, questo perché è presente la malta aderente che, essendo molto porosa, influisce sul valore di densità medio complessivo determinato dall'aggregato vergine e da quest'ultima.

Essendo correlata con la quantità di malta attaccata, la densità è quindi anch'essa influenzata dal calcestruzzo di origine, dal processo di trattamento e dalla frazione granulometrica.

Nel campo degli aggregati per calcestruzzi si fa riferimento solitamente alla densità nello stato SSD [48].

La malta aderente è un materiale poroso con una densità di $1,0 - 1,6 \text{ t/m}^3$, minore di quella degli aggregati naturali [68]. Inoltre, la sua porosità dipende anche dal rapporto w/c del calcestruzzo di origine: per rapporti bassi, ovvero calcestruzzi ad alta resistenza, essa è meno porosa e quindi con densità più alta. Il tipo e la quantità di aggregato vergine incidono anche loro sulla densità, e alcuni autori affermano che queste due cose hanno un'influenza maggiore anche del rapporto w/c del calcestruzzo di origine [69].

Come affermato in precedenza la fase più fragile è rappresentata dalla malta aderente, perciò è quella più affetta dal processo di frantumazione (sarà più presente nella frazione fine).

La frantumazione in più stadi riduce il numero di aggregati con fratture, microdefezioni o vuoti, oltre che ridurne il diametro medio. Gli aggregati con queste caratteristiche scadenti vengono poi eliminati nel processo di vagliatura o usati come RCA fine. A ogni stadio quindi l'aggregato grosso accresce la sua qualità e aumenta la sua densità. In alcune nazioni si sono provati cicli di frantumazione chiusi per migliorare le proprietà degli RCA grossi e recuperare il maggior quantitativo di fini.

Nella Figura 25 è rappresentata la densità nello stato SSD correlata alla dimensione massima dell'aggregato.

Se la dimensione cresce si osserva un aumento di densità perché il quantitativo di malta decresce al crescere della dimensione. Tuttavia, a parità di diametro vi è molta varianza. Questo è dovuto alla differente tipologia del calcestruzzo di origine oltre che al numero di stadi di frantumazione come precedentemente affermato.

La densità degli aggregati in condizioni SSD varia da 2150 kg/m^3 a 2680 kg/m^3 .

Il valore di densità dell'RCA grosso varia da 2280 kg/m^3 a 2680 kg/m^3 , con un valore medio di 2397 kg/m^3 per la frazione inferiore ai 16 mm e 2458 kg/m^3 per la frazione superiore, valori più alti di quelli dell'RCA fine.

La densità media totale del grano SSD risulta quindi di 2437 kg/m^3 .

Per l'aggregato fine (massima dimensione inferiore ai 4 mm) si registrano valori generalmente inferiori a 2350 kg/m^3 , con un valore medio di 2312 kg/m^3 .

Tutti gli autori concordano sul fatto che se il WA cresce, la densità decresce.

Questo trend può essere osservato nella Figura 26 che rappresenta la relazione tra la densità nello stato SSD e il WA.

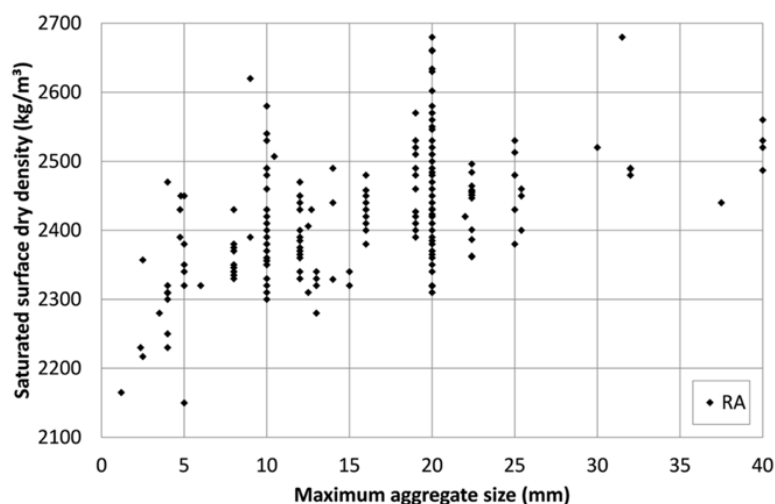


Figura 25: dimensione massima aggregato vs densità nello stato SSD [48]

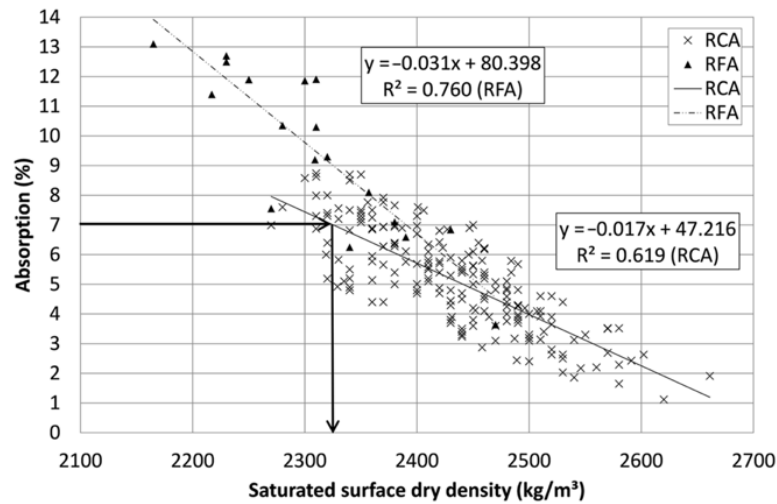


Figura 26: densità SSD e WA [48]

Le norme della Germania, di Hong-Kong, dell'Olanda, del Portogallo, della Norvegia, della Danimarca e le linee guida RILEM stabiliscono una densità minima dell'RCA compresa tra 2000 kg/m^3 a 2200 kg/m^3 .

Le raccomandazioni RILEM aggiungono inoltre che la percentuale di materiale con densità inferiore a 2200 kg/m^3 deve essere inferiore al 10% [67] [50] [52] [55] [56].

Porosità

La porosità negli RCA è condizionata principalmente dalla malta aderente, essendo l'aggregato naturale vergine poco poroso. La malta aderente è una matrice cementizia perciò presenta una struttura porosa con tre tipologie di pori:

- pori interstiziali, localizzati tra gli strati costituenti il gel $C - S - H$, di cui se ne darà definizione in seguito; dimensioni comprese tra qualche frazione di micron e qualche micron;
- pori capillari, con dimensioni variabili a seconda se il calcestruzzo è ben idratato e prodotto con bassi rapporti w/c , oppure se il calcestruzzo è ottenuto con alti rapporti w/c e/o presenta un basso grado di idratazione; dimensioni da 10 nm a $5\ \mu\text{m}$;
- pori o vuoti dovuti all'inglobamento di aria (macropori), che possono verificarsi in seguito ad un cattivo costipamento oppure possono essere aggiunti volontariamente attraverso l'utilizzo di additivi aeranti che offrono resistenza ai fenomeni di gelo-disgelo; dimensioni di qualche millimetro.

La permeabilità di un fluido attraverso un mezzo poroso diventa possibile solo se i pori sono interconnessi (porosità continua). Nel caso del calcestruzzo ordinario o del RAC, la porosità discontinua, e quindi l'impermeabilità, è assicurata solo al di sotto di una certa soglia della porosità capillare: questa corrisponde, per ogni determinato valore di w/c , ad un certo grado di idratazione raggiungibile dopo un determinato tempo di stagionatura proporzionale al rapporto w/c .

Anche la durabilità è fortemente influenzata dalla porosità capillare oltre che dagli altri tipi di porosità.

La durabilità dipende in generale dalla porosità, tuttavia la relazione tra le due grandezze è funzione del tipo di porosità. Generalmente si può affermare che la porosità continua nuoce alla durabilità, mentre quella discontinua, purché distribuita in una matrice densa e poco porosa, è ininfluente o addirittura porta benefit alla durabilità.

Un altro tipo di porosità continua capace di favorire l'accesso di agenti ambientali aggressivi (aria, umidità, cloruri, ecc.) è costituita dalla porosità capillare. Per un calcestruzzo privo di macrovuoti dovuti ad imperfetta compattazione, la durabilità del calcestruzzo nei confronti di un ambiente aggressivo può essere migliorata riducendo il volume della porosità capillare per ostacolare la penetrazione dell'acqua, e quindi impedire l'ingresso degli agenti aggressivi all'interno del calcestruzzo veicolati dall'acqua.

Come si vedrà nel seguito è stato osservato che nel caso dei RAC, l'RCA stesso agisce da ponte per il collegamento dei vari pori, aumentandone la permeabilità ai gas e all'acqua.

Generalmente in letteratura è uso comune prendere in considerazione la porosità nei RAC, mentre per gli RCA si usa considerare il WA.

La porosità, nel caso dei RAC, è anche influenzata dal tempo di maturazione dell'impasto, infatti in generale si osserva un trend di decrescita di questo parametro nel tempo. Questo accade perché nei RAC, come nel calcestruzzo ordinario, si sviluppano una serie di reazioni di idratazione che portano allo sviluppo di alcuni prodotti che vanno a saturare e migliorare la struttura dei pori.

Shi-Cong Kou et al. [70] hanno studiato la variazione di porosità nel tempo di 3 tipi di mix:

- CC ovvero control concrete composto solo da NCA;
- RCA-C composto interamente da RCA costituiti prevalentemente da calcestruzzo;
- RA-C composto interamente da RCA di varia natura. Entrambe le tipologie di aggregati hanno le stesse dimensioni.

Hanno osservato che nei primi 28 giorni di maturazione la porosità è simile per tutti e 3 i mix come dimostra la Figura 27. Infatti, le curve sono sovrapponibili eccetto nella zona dei $0,1 \div 0,01\ \mu\text{m}$ dove si osserva che il CC ha un volume cumulativo intruso leggermente superiore rispetto agli altri due mix, dimostrando la presenza maggiore di pori con dimensioni in questo range.

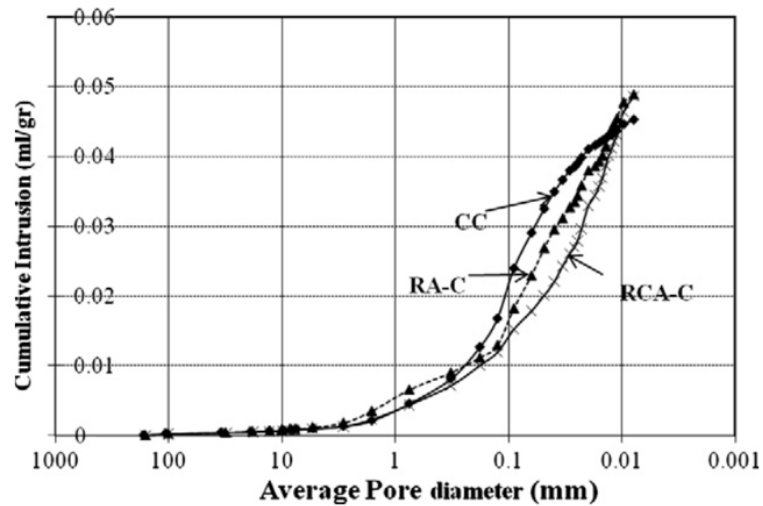


Figura 27: distribuzione dei pori a 28 giorni [70]

Dopo 5 anni, invece, si osservano significative differenze nel volume intruso totale (Figura 28).

In ordine crescente di porosità si ha: RCA-C, CC e RA-C.

In questo caso le differenze si riscontrano per dimensioni dei pori di circa $0.01 \mu m$ mentre per quelli di dimensioni pari o superiori a $0.1 \mu m$ non si registrano differenze nel volume cumulativo intruso. Tale variazione nella dimensione dei pori perciò si potrebbero giustificare con un cambiamento di struttura di tali pori.

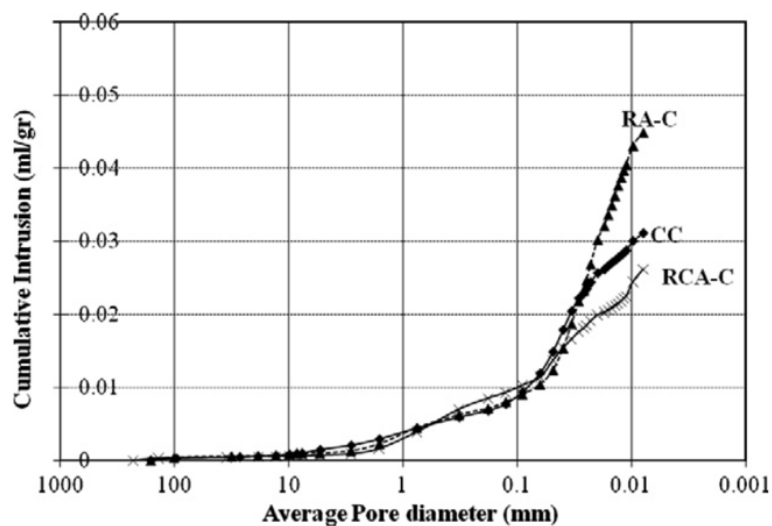


Figura 28: distribuzione dei pori a 5 anni [70]

Nella Figura 29, nella Figura 30 e nella Figura 31 sono mostrate le variazioni di porosità per ogni mix. Vi è una riduzione generale della porosità per ognuno di loro, infatti per ogni mix si osserva un abbassamento generale della curva che descrive il volume cumulativo intruso.

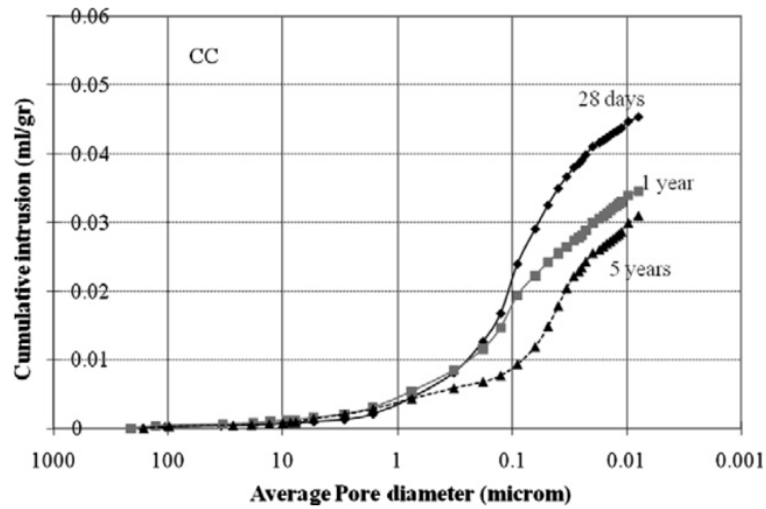


Figura 29: distribuzione pori CC [70]

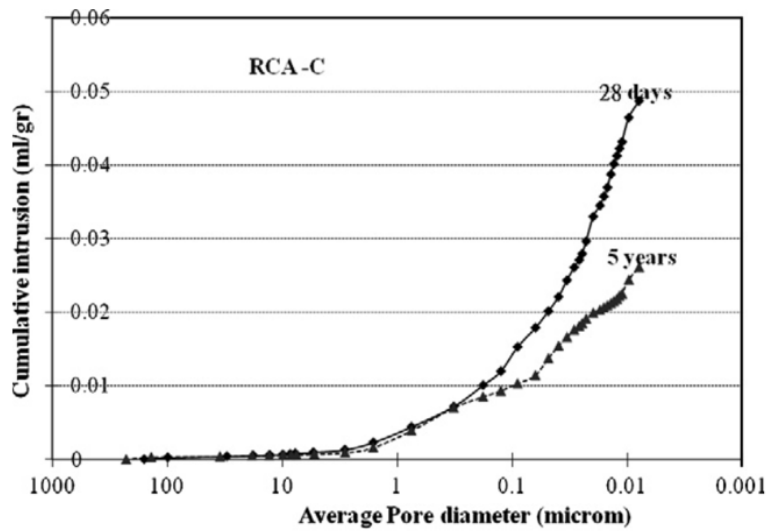


Figura 30: distribuzione pori RCA-C [70]

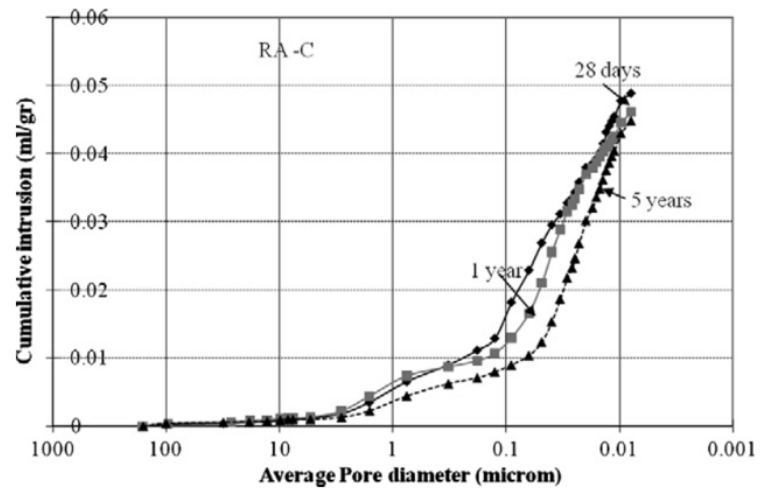


Figura 31: distribuzione pori RA-C [70]

Nella Tabella 17 sono riportate le porosità a 28 giorni, 1 anno e 5 anni, insieme alla riduzione percentuale sul periodo di tale parametro e la dimensioni medie dei pori nei periodi sopra citati.

Si osserva che la riduzione di porosità maggiore l'ha avuta l'RCA-C, pari al 44,89%, mentre la minore l'ha avuta l'RA-C, pari al 7,37%. Inoltre, si ha una riduzione generale del diametro dei pori tranne che per il mix RA-C.

Tabella 17: porosità dei calcestruzzi [70]

Notation	Porosity (%)			% Decrease from 28 days to 5 years	Average pore diameter (μm)		
	28 days	1 year	5 years		28 days	1 year	5 years
CC	10.21	8.21	7.26	28.94	0.047	0.043	0.031
RA-C	10.79	10.44	9.99	7.37	0.024	0.025	0.028
RCA-C	10.91	ND	6.01	44.89	0.029	ND	0.023

Nella Figura 32 è rappresentata la porosità media dei diversi mix.

L'RA-C mostra la presenza di porosità molto piccola, mentre l'RCA-C, registra la maggior riduzione di porosità totale come anticipato precedentemente.

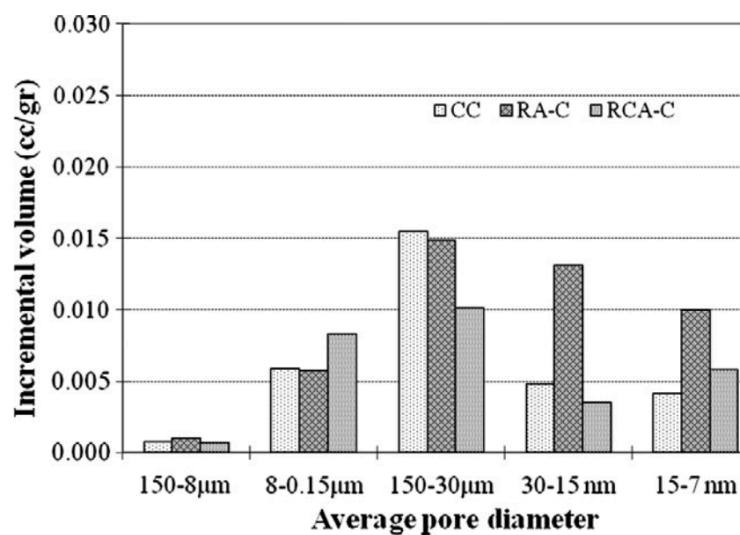


Figura 32: distribuzione porosità a 5 anni [70]

Dall'analisi di questo primo studio si può vedere come la tipologia di rifiuto in ingresso condiziona fortemente la porosità del RAC.

Infatti, l'utilizzo dell'RCA-C, contenente un maggior quantitativo di calcestruzzo, ha portato ad avere un RAC con una porosità inferiore al CC, mentre di contro, quando si è utilizzato l'RA-C, che è un materiale più eterogeneo, si è ottenuto un RAC più poroso del CC.

S. Manzi et al. [71] hanno riscontrato ciò che è stato osservato da Shi-Cong Kou et al. [70] per ciò che riguarda la dimensione dei pori, ovvero, in generale, si osserva che la porosità con dimensioni superiori a $1 \mu\text{m}$ è molto bassa mentre per quella inferiore a questa dimensione si hanno significative differenze.

In questo caso è stata messa in evidenza l'influenza della frazione granulometrica sostituita sulla porosità.

Gli RCA utilizzati infatti hanno tutti la stessa origine ma frazione granulometrica differente.

Per capire il comportamento molto diverso tra i vari mix si riportano le curve granulometriche degli aggregati utilizzati nella Figura 33.

Gli NCA utilizzati sono:

- Sabbia 0-6 mm (S)
- Ghiaia fine 6-16 mm (FG)
- Ghiaia 16-25 mm (G)

Dalla combinazione di questi NCA sono state preparate due granulometrie utilizzando la legge di Fuller, aventi diametro massimo degli aggregati pari a 16 mm e 25 mm:

- N16 (S 60% vol, FG 40% vol)
- N25 (S 48% vol, FG 25% vol, G 27%)

Gli aggregati riciclati invece sono stati divisi in due classi in base alla dimensione di riferimento di 25 mm.

Quelli superiori a 25 mm sono stati soggetti a una seconda frantumazione per ottenere una frazione chiamata R16, aventi una curva granulometrica simile all'N16.

La parte con dimensione minore di 25 mm invece è stata setacciata per ottenere solo la frazione 16-25 mm chiamata R25 e avente fuso granulometrico simile alla G.

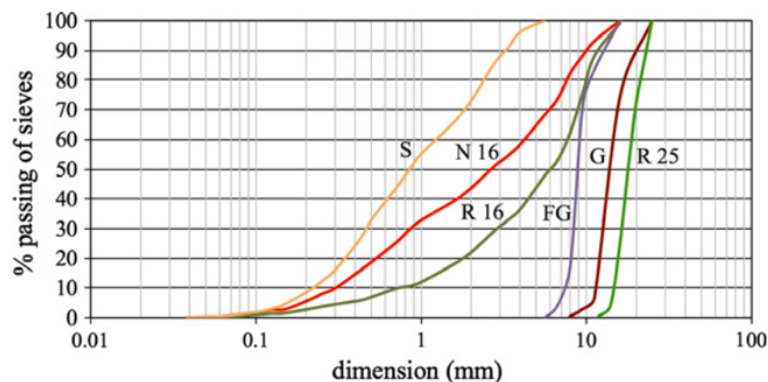


Figura 33: curve granulometriche [71]

Il rapporto w/c, la quantità di cemento e il D_{max} sono stati mantenuti costanti per tutti i mix.

Il calcestruzzo di riferimento, chiamato CC, è stato preparato con il 100% di NCA aventi distribuzione granulometrica N25, non rappresentata nel grafico.

I mix indicati con RC sono quelli contenenti RCA in varie percentuali (27–63,5%) e varie granulometrie:

- il mix RC1 è stato preparato sostituendo G con R25, al fine di investigare l'effetto degli RCA grossi;
- il mix RC2 è stato ottenuto dall'RC1 sostituendo metà del volume della frazione naturale 0-16 mm (24% S e 100% FG) con R16.

Per investigare gli effetti degli RCA fini invece, in modo analogo, sono stati preparati due mix tenendo costante la ghiaia naturale:

- il mix RC3 è stato preparato con lo stesso volume di R16 di RC2, ovvero 36,5% S e 27% G. Il volume totale di RCA corrisponde a 36,5% ed è pari alla sostituzione del 50% di fine;

- il mix RC4 è stato ottenuto partendo da RC3 e sostituendo metà del volume di S e tutto FG con riciclati.

In Tabella 18 sono riassunte le proporzioni dei mix:

Tabella 18: percentuali dei costituenti nei mix [71]

Mix	Natural aggregates (NA)				Recycled aggregates (RA)		
	S (vol%)	FG (vol%)	G (vol%)	Total (vol%)	R 16 (vol%)	R 25 (vol%)	Total (vol%)
CC	48.0	25.0	27.0	100.0	0.0	0.0	0.0
RC1	48.0	25.0	0.0	73.0	0.0	27.0	27.0
RC2	36.5	0.0	0.0	36.5	36.5	27.0	63.5
RC3	36.5	0.0	27.0	63.5	36.5	0.0	36.5
RC4	24.0	12.5	27.0	63.5	36.5	0.0	36.5

La Figura 34 riporta la distribuzione dei pori nei mix a 28 giorni, determinata attraverso l'utilizzo della porosimetria a mercurio.

RC1 ha la minore porosità aperta totale, così come il minor volume intruso totale e il minimo raggio medio dei pori ($0,035 \mu m$) confermando così le ottime performance meccaniche riscontrate nello studio.

Incrementando il contenuto di riciclati fino al 36,5% la porosità cresce leggermente pur restando sempre inferiore a quella del calcestruzzo di riferimento.

RC3, contenente il 36,5% di riciclati ha la più alta porosità e il più alto volume intruso, oltre che il maggior raggio medio dei pori ($0,073 \mu m$). Questo dimostra l'importanza di quale frazione naturale sostituire. Quando tutta FG e una parte di S sono rimpiazzati (RC3) la matrice cementizia è più porosa di quando si rimpiazza metà volume di FG e metà di S (RC4).

RC2, contenente il 63,5% di riciclati, mostra una porosità maggiore del CC ma minore di RC3.

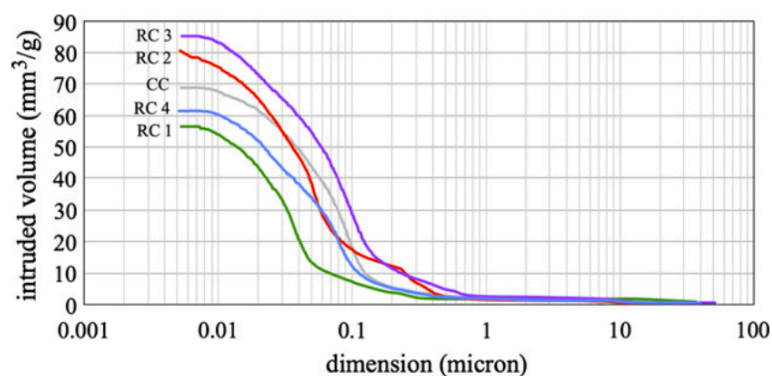


Figura 34: distribuzione dei pori [71]

La Tabella 19 mostra la suddivisione dei valori di porosità trovati raggruppati secondo la classificazione IUPAC dei pori.

Tabella 19: classificazione della porosità secondo nomenclatura IUPAC [71]

Designation	Porosity range (nm)	CC (mm ³ Hg/g)	RC1 (mm ³ Hg/g)	RC2 (mm ³ Hg/g)	RC3 (mm ³ Hg/g)	RC4 (mm ³ Hg/g)
Micropores	<1.25	N.d.	N.d.	N.d.	N.d.	N.d.
Mesopores	1.25–25	10.6	17.6	20.7	16.3	14.5
Macropores	25–5000	57.1	37.0	58.7	66.6	45.7
Directly accessible large pores	5000–50,000	1.2	1.8	1.3	2.4	1.3

In questo caso quindi è evidente come le frazioni fini, e in particolare gli RFA, influenzano negativamente la porosità con dimensioni pari o inferiori $0,01 \mu m$. Infatti, i mix RC2 e RC3 contenenti molti NCA fini e RFA hanno alta porosità con queste dimensioni, mentre RC1 e RC4 contenenti molti NCA e una modesta quantità di RCA hanno tale porosità più bassa.

Quindi si può affermare che le frazioni fini influenzano la porosità, e la influenzano maggiormente se sono RFA. Il quantitativo totale di RCA condiziona anch'esso la porosità.

L. Berredjem et al. [72] hanno effettuato misurazioni sulla porosità accessibile all'acqua e hanno osservato che la variazione di tale parametro è consistente con la variazione di porosità tra i diversi mix osservata da Shi-Cong Kou et al. [70] e S. Manzi et al. [71].

Anche in questo caso per capire le cause della variazione di porosità accessibile nei vari mix è utile riportare le granulometrie utilizzate e le relative proporzioni.

Gli aggregati utilizzati sono sia NCA che RCA:

- Gli NCA sono prodotti da frantumazione di calcare e sono stati utilizzati in 3 differenti frazioni: 0-3,15 mm, 3-8 mm, 8-16 mm
- Gli RCA sono prodotti da frantumazione e vagliatura di macerie di vecchie strutture in calcestruzzo, i quali sono stati prodotti anch'essi in 3 frazioni uguali alle precedenti.

Le granulometrie degli aggregati sono riassunte nella Figura 35.

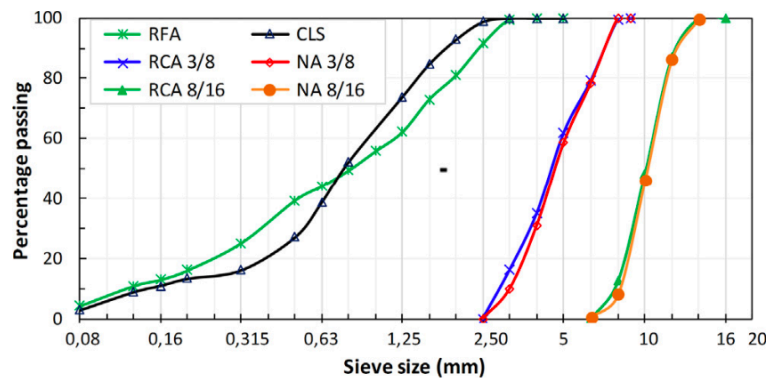


Figura 35: curve granulometriche [72]

Tutte le miscele di calcestruzzo sono state preparate con una quantità costante di cemento e i quantitativi sono stati calcolati utilizzando il metodo di Dreux-Festa [73], imponendo una classe di consistenza S2 e una classe di resistenza alla compressione del calcestruzzo C25/30 a 28 giorni relativa a una classe di esposizione XA2, secondo la norma europea UNI EN 206 [14].

Sono state preparate 5 diverse miscele per studiare l'effetto dell'incorporazione di diverse combinazioni di aggregati (naturali/riciclati) sulle prestazioni meccaniche e di durabilità del calcestruzzo. I quantitativi delle miscele sono rappresentati nella Tabella 20. Le notazioni utilizzate sono le seguenti:

- B1 costituito interamente da NCA;
- B2 costituito da RFA e NCA grossi;
- B3 costituito da NCA fini e RCA grossi;
- B4 costituito solo da RCA;
- B5 costituito da aggregati fini naturali e 75% NCA grossi + 25% RCA grossi.

Gli RCA sono stati utilizzati in condizioni SSD e gli NCA in condizioni asciutte.

Tabella 20: mix proportion [72]

		Proportions (kg/m ³)				
		B1	B2	B3	B4	B5
Cement		400	400	400	400	400
CLS		578		578		578
RFA			571		571	
NCA 3/8 mm		185	168			139
NCA 8/16 mm		928	928			696
RCA 3/8 mm				176	160	44
RCA 8/16 mm				874	874	219
Mixing water (in liters)				187	194	187
Effective water		187	187	187	194	187
Added water		0	51	39	71	21
Total added water		187	238	226	265	208
Water/Cement ratio (W/C)		0.47	0.59	0.56	0.66	0.52
Slump (cm)		6.50	7.50	7.00	7.50	6.50
Fresh density (kg/m ³)						
real		2321	2296	2277	2207	2300
calculated		2278	2305	2254	2270	2284

Nella Figura 36 è riportata la porosità accessibile per i diversi mix investigati e in questo caso il calcestruzzo di riferimento è rappresentato dal mix B1. I risultati confermano un trend simile all'assorbimento d'acqua presentato nei paragrafi successivi.

I mix contenenti RCA hanno valori più alti di porosità accessibile, e in particolare, i valori più alti si registrano in quelli contenenti RFA (B2 e B4). Per B2 e B4 la porosità accessibile è del 42% e 62% più alta che in B1. La porosità accessibile è direttamente legata alla porosità dell'aggregato e al rapporto w/c, infatti B2 e B4 hanno il più alto contenuto d'acqua.

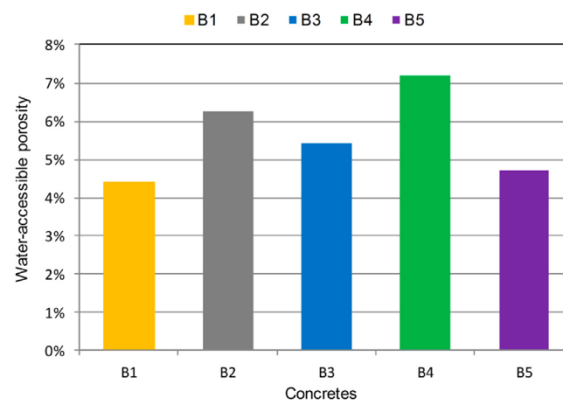


Figura 36: porosità accessibile [72]

Si può quindi affermare che la porosità di un RAC è funzione sia della tipologia del rifiuto da cui si ottiene l'RCA e sia dalle frazioni granulometriche utilizzate per la sua preparazione, nonché del quantitativo totale di RCA utilizzati.

Assorbimento d'acqua

L'analisi della letteratura ha evidenziato che gli RCA hanno un maggiore assorbimento d'acqua dovuto alla presenza della malta aderente [48].

L'assorbimento d'acqua varia tra lo 0 e il 4% per gli NCA mentre per gli RCA varia tra l'1,65% e il 13,1% con un valore medio di 5,32%.

Come anticipato, la malta aderente è la fase più debole, perciò viene distaccata dall'aggregato vergine durante il processo di frantumazione andando a costituire gran parte della frazione fine. Le frazioni riciclate fini hanno quindi un maggior quantitativo di malta rispetto a quelle grosse [74]. Da ciò si deduce che l'assorbimento d'acqua cresce al decrescere della frazione granulometrica.

Nella Figura 37 è mostrata l'osservazione appena fatta: per gli aggregati riciclati grossi l'assorbimento d'acqua va da 1,12% a 8,82%, con una media di 5,06%, mentre per quelli fini varia da 6,84% a 13,1% con una media di 9,89%. Si osserva anche che a parità di diametro vi è una grande varianza dei valori, segnale del fatto che questa proprietà è molto influenzata anche dal calcestruzzo di origine e dal processo di trattamento.

La quantità di impurità, specialmente materiali ceramici, influenza significativamente l'assorbimento d'acqua [75].

Anche in questo caso l'effetto del calcestruzzo di origine non è ancora chiaro: alcuni autori affermano che calcestruzzi di alta classe di resistenza portano a un aggregato con basso assorbimento d'acqua [64] [76], mentre altri autori affermano che calcestruzzi di alta classe di resistenza portano a un alto assorbimento d'acqua [77] [78]. Ciò dipende dall'effetto principale: se è più influenzante la quantità o la qualità, intesa come densità, della malta aderente.

Riguardo il processo di produzione si conferma ciò che viene detto in precedenza, ovvero che più stage di frantumazione si effettuano, più si avrà un prodotto con basso assorbimento d'acqua, poiché la malta aderente viene ridotta in pezzi e viene eliminata nel successivo processo di vagliatura.

Attualmente il WA è determinato secondo la EN 1097-6 [79] immergendo l'aggregato in acqua per 24 ore dopo essiccamento in stufa. Molti autori concordano però sul fatto che nei primi 10 minuti si ha un assorbimento dell'80-90% [60] [80], valore che può essere molto utile nel design dei mix per mantenere una corretta lavorabilità.

Belin et al. [81] hanno concluso che il WA a 24 ore è la somma dell'assorbimento capillare della malta e quello iniziale dell'aggregato. Hanno proposto anche un tentativo di classificazione dell'aggregato in base a questo valore e alla sua cinetica di assorbimento.

Djerbi [82] ha investigato l'assorbimento per tempi superiori alle 24 ore. Egli ha concluso che il metodo europeo standard non è adatto per misurare l'assorbimento d'acqua. Infatti, per tempi superiori alle 24 ore si ha un incremento dell'assorbimento del 60% a 85 ore e del 70% a 110 ore rispettivamente per le frazioni 12,5-20 mm e 5-12,5 mm. Ha proposto anche un metodo di pesatura idrostatico per determinare il tempo massimo del test e la misurazione del WA.

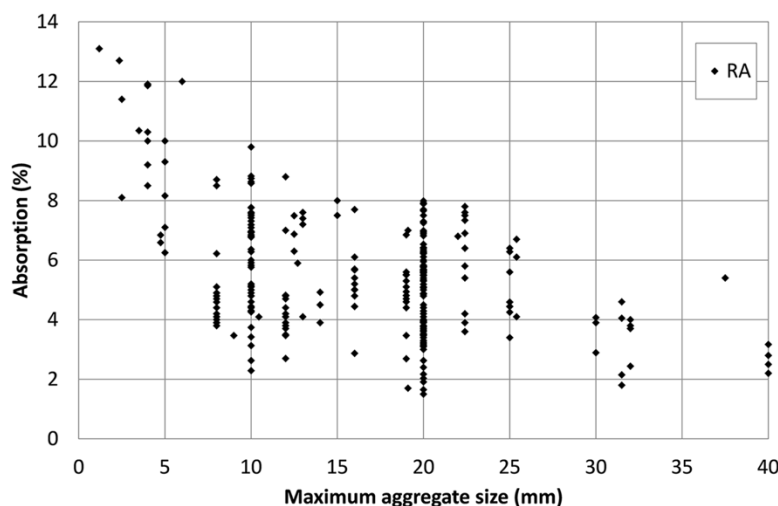


Figura 37: assorbimento d'acqua vs diametro massimo aggregato riciclato [48]

Ci sono molte norme internazionali che fissano valori limite.

Le raccomandazioni RILEM fissano un valore massimo del 10% per gli aggregati di Tipo II, ovvero quelli composti principalmente da calcestruzzo (quantità di ceramici inferiori al 10%) [55].

Questi valori sono in accordo con quelli fissati da Hong Kong e dalla Norvegia [50] [55]. In Germania il massimo WA dopo 10 minuti è fissato al 10% [67].

Le norme belga sono molto simile alle raccomandazioni RILEM in quanto fissano il massimo WA al 9% per i riciclati di tipo GBSB-II, equivalenti ai suddetti di Tipo II.

L'Australia ammette solo RCA con WA inferiore al 6%.

Il Giappone fissa limiti variabili in funzione dell'applicazione [83] [84] [85]: quando si deve preparare un RAC di alta categoria (Tipo H) il WA deve essere inferiore al 3%.

Le norme brasiliane e portoghesi fissano il limite massimo al 7% [53] [86] mentre quelle spagnole lo fissano al 7% [67] se è usato il 20% di RCA grossi e gli NCA hanno WA inferiore al 4,5%, e al 5%, WA del mix, se più del 20% di RCA grossi è usato.

Per quanto concerne i RAC il loro assorbimento è anch'esso determinato in parte all'RCA di cui sono costituiti.

L. Berredjem et al. [72] hanno studiato l'assorbimento d'acqua capillare in un periodo di immersione di 1440 minuti (Figura 38).

In generale tutti i mix mostrano lo stesso trend.

- B1, costituito interamente da NCA e B5, costituito da NCA fini e grossi divisi al 75% naturali e 25% riciclati, mostrano i valori di assorbimento più bassi, confermati anche dalla miglior resistenza a compressione.
- B4 conferma i più alti valori di assorbimento essendo costituito interamente da RCA. In particolare, l'RFA è costituito da malta aderente, molto porosa e dotata di interconnessioni tra i vari pori come osservato anche da altri autori [87] [88] e affermato in precedenza.
- B2 e B3 mostrano un comportamento intermedio tra quello dei mix B1/B5 e B4. In particolare, B2 essendo costituito da RFA ha un assorbimento d'acqua maggiore del mix B3.

Si può anche dedurre che il valore finale di assorbimento è funzione del w/c [89]: l'alto valore di questo rapporto per i RAC è dovuto alla necessità di mantenere la stessa classe di lavorabilità del mix di controllo B1; l'acqua non utilizzata nell'idratazione del cemento perciò produce questa larga rete di porosità che determina l'elevato assorbimento d'acqua [90].

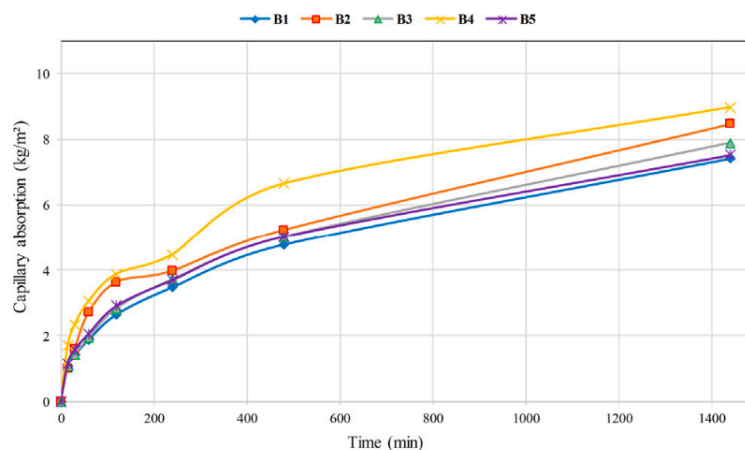


Figura 38: assorbimento d'acqua capillare [72]

Distribuzione granulometrica e forma

La granulometria è direttamente correlata al processo di frantumazione [91] ed è normata nella maggior parte delle nazioni del mondo [67].

Se si effettua un'analisi della distribuzione granulometrica degli RCA [48] si nota che grossi e fini seguono due modelli comportamentali diversi ma la distribuzione granulometrica di queste due frazioni rispetto a quelle delle corrispettive frazioni naturali resta simile.

Le frazioni fini hanno modulo di finezza che subisce piccole variazioni a parità di diametro massimo, a sua volta dipendente principalmente dal processo di frantumazione e dalla qualità del calcestruzzo originario [92].

Sempre riguardo ai fini si osserva che gli RCA presentano una maggior quantità di questi ultimi rispetto ai convenzionali. Il modulo di finezza⁴ varia tra 5,70 e 7,30 per il range 10 - 25 mm, con una media di 6,55.

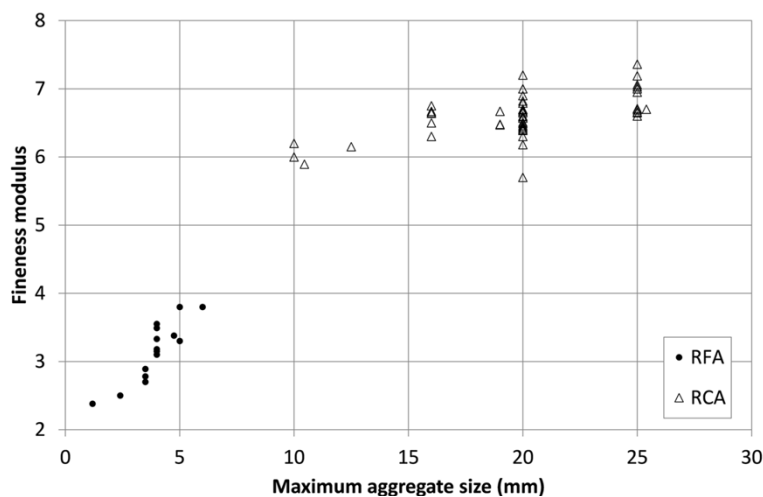


Grafico 1: modulo di finezza vs massima dimensione aggregato [48]

Per la presenza della malta attaccata, la tessitura superficiale dell'RCA grosso si presenta più porosa e ruvida [93] [91] [94] di quella del corrispettivo NCA.

Inoltre, va tenuto conto che gli RCA producono fini durante la loro manipolazione e questi fini rendono il legame tra la nuova matrice cementizia e l'aggregato più debole, oltre a incrementare il quantitativo di acqua necessario per ottenere una determinata lavorabilità [95].

Le norme spagnole stabiliscono un massimo di fini dell'1% [57], mentre quelle belga, inglesi, le raccomandazioni RILEM e le norme di Hong Kong stabiliscono limiti tra il 2% e il 5% [67] [51] [52] [55] [56].

La forma dell'aggregato dipende invece dalla macchina usata nella frantumazione.

I mulini a impatto ad esempio producono aggregati cubici [96].

In generale non si riscontrano grosse differenze negli indici di forma dei riciclati e dei naturali: 0,14 – 0,47 per gli RCA grossi e 0,19 – 0,58 per i corrispettivi NCA [97] [91] [98] [99] [100] [101] [63] [102] [103].

⁴ Il modulo di finezza è definito come somma delle percentuali in massa cumulative di trattenuto sui setacci con apertura di 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2 e 4 mm espresso come percentuale, ovvero rapportato a 100. Esso esprime la finezza complessiva dell'aggregato: più il modulo di finezza è elevato più è fine l'aggregato.

Resistenza all'abrasione

I metodi per la misurazione della resistenza all'abrasione sono svariati [104] [105], ma il metodo più comune è la prova Los Angeles⁵, il cui valore è quello usato come riferimento nelle norme UNI.

In generale gli RCA hanno valori più alti rispetto agli NCA perché la perdita di peso è dovuta a due motivi: perdita di malta attaccata e perdita legata agli aggregati naturali originari contenuti in essi [106].

Molti autori infatti hanno osservato che la resistenza a frantumazione, impatto e abrasione degli RCA è minore dei relativi aggregati naturali di cui sono composti, questo perché durante la prova si ha la separazione della fase porosa, ossia della malta attaccata [107].

Houria Mefteh et al. [108] hanno riscontrato quanto indicato precedentemente (Tabella 21): al crescere del quantitativo di RCA cresce il valore di Los Angeles, stando a indicare che le perdite di peso sono più alte.

Tabella 21: proprietà meccaniche [108]

Mechanical properties for resistance to degradation (percent loss) of coarse aggregate mixes, determined for 6.3/10 mm size fraction.

Notation	RCA (%)	Los Angeles testing (%)	Aggregate compact test (%)	Micro-Deval testing (%)
RCA0	0	24	15	24
RCA20	20	25	17	28
RCA40	40	27	19	31
RCA60	60	30	21	34
RCA80	80	32	22	35
RCA100	100	35	23	39

Riguardo il calcestruzzo di origine, anche in questo caso si ha che il valore di resistenza dipende dall'effetto principale: se è la quantità o la qualità della malta.

La resistenza all'abrasione non è influenzata solo dal rapporto w/c, infatti a parità di classe di resistenza, un calcestruzzo resiste meno alle azioni meccaniche al diminuire della dimensione dell'aggregato. Ciò è dovuto al fatto che l'aggregato fine ha una superficie specifica maggiore che contribuisce ad avere un maggior quantitativo di malta aderente.

Infine, RCA prodotti da calcestruzzo con basso w/c possono avere un valore di abrasione maggiore di quelli prodotti da un calcestruzzo ad alto w/c, questo perché tale rapporto è meno importante della perdita di peso che si ha sull'aggregato vergine contenuto nell'RCA.

Anche in questo caso, l'incremento degli stadi di frantumazione aiuta gli aggregati ad avere una migliore resistenza all'abrasione, poiché le particelle di malta aderente vengono ulteriormente sminuite e vengono così eliminate durante il processo di vagliatura.

La Figura 39 mostra che il valore del coefficiente di LA è influenzato dal diametro massimo dell'aggregato e in particolare esso cresce al decrescere della dimensione massima, significando minor resistenza all'abrasione. Questo è dovuto come detto in precedenza al quantitativo di malta attaccata presente.

Si può osservare come ci sia molta varianza per diverse dimensioni dell'aggregato. Questo è dovuto alla qualità del calcestruzzo originario e al numero di stadi di frantumazione.

I valori da letteratura variano tra il 25% e il 40% con un valore medio del 32%.

In generale le norme non stabiliscono un limite minimo per questo valore.

⁵ La prova consiste nel porre in un tamburo rotante un campione di aggregato e una carica di sfere in acciaio. Il tamburo viene fatto ruotare per un tempo prefissato e al termine di questo periodo si setaccia il campione su un setaccio da 1,6 mm. Il trattenuto viene utilizzato per la determinazione dell'indice di Los Angeles: valori più alti indicano minor resistenza alla frammentazione.

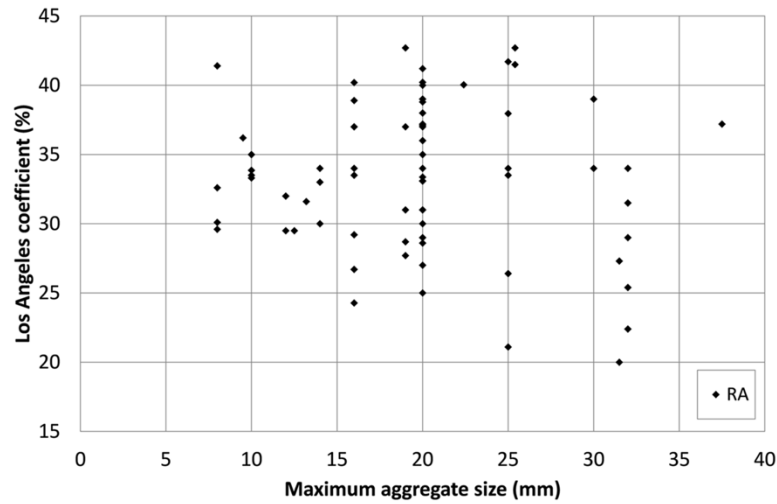


Figura 39: dimensione massima aggregato vs coefficiente LA [48]

La Figura 40 mostra la relazione tra il coefficiente LA e il WA. Si osservi che il coefficiente di correlazione è pari a 0,626, indicante quindi una buona correlazione tra i due parametri.

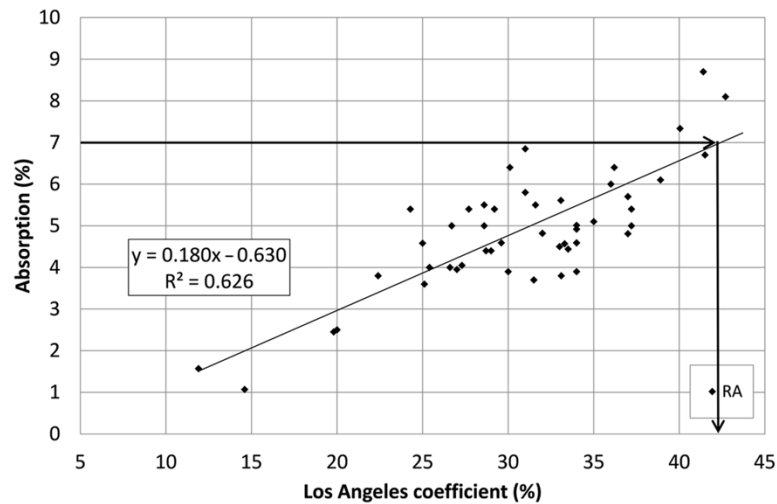


Figura 40: coefficiente LA vs WA [48]

Permeabilità all'Elio

L. Berredjem et al. [72] hanno condotto un test sulla permeabilità all'elio da utilizzare come indicatore delle prestazioni di durabilità dei RAC.

Il test sulla permeabilità all'elio è stato svolto secondo il metodo di Cembureau [107] utilizzando il dispositivo il cui schema è riportato nella Figura 41.

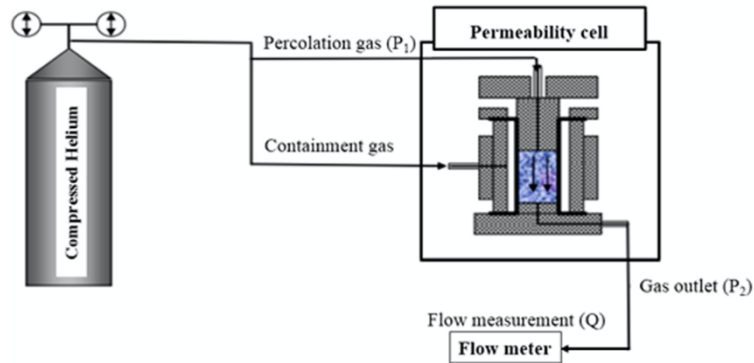


Figura 41: permeabilità all'elio [72]

Il dispositivo consiste in una bombola di elio a 20 MPa collegata a una cella di permeabilità con il gas che fluisce a una pressione di 2 bar (P_1) e lo stesso gas che confina il campione a una pressione di 5 bar.

Per il calcolo della permeabilità apparente è stata utilizzata la legge di Hagen-Poiseuille [107], applicabile a un flusso laminare di un fluido comprimibile, in un mezzo poroso, in condizioni stazionarie.

La variazione del coefficiente K_{app} , rappresentata nella Figura 42 è consistente con la variazione della porosità accessibile rappresentata nella Figura 36, come evidenziato anche da Xuan et al. [109].

In generale i calcestruzzi contenenti RCA hanno una permeabilità maggiore rispetto a quello di riferimento contenente solo NCA. Questo può essere spiegato dal fatto che la loro ITZ contiene porosità e che l'aggregato stesso agisce da ponte tra i pori della matrice essendo lui stesso molto poroso.

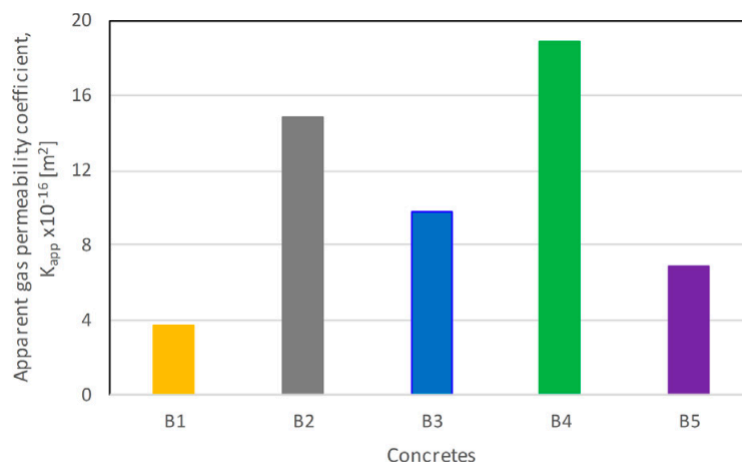


Figura 42: coefficiente di permeabilità [72]

Infatti, i calcestruzzi che incorporano RCA hanno mostrato coefficienti di permeabilità ai gas più elevati rispetto al calcestruzzo di riferimento B1.

L'aumento massimo misurato ha raggiunto il 411% per la miscela B4 e il 300% per la miscela B2. Va evidenziato che queste miscele sono quelle contenenti RFA.

Cessione al Nitrato d'Ammonio

Un altro indicatore delle prestazioni di durabilità dei RAC individuato in letteratura è la perdita di peso e resistenza dovuta all'attacco da nitrato d'ammonio [72].

L'attacco da nitrato di ammonio sui prodotti a base di cemento causa la liscivazione del $Ca(OH)_2$ [110] seguita dalla decalcificazione dei prodotti di idratazione del calcestruzzo. Questo causa una perdita di peso e resistenza come si osserva nella Figura 43 e nella Figura 44 in cui sono indicate le perdite di massa dopo immersione in due diverse soluzioni di nitrato di ammonio (a) 1,5 mol/L e (b) 6 mol/L, e la perdita percentuale di resistenza a trazione indiretta per i diversi mix.

Come si evince chiaramente al crescere del periodo di immersione la massa diminuisce, come osservato anche da U. Schneider et al. [111], e, in particolare, nelle prime 48 ore questa tendenza è tanto più marcata quanto la soluzione è concentrata.

Più precisamente si può affermare che le perdite risultano funzioni della qualità del calcestruzzo. Infatti, per il mix B4, prodotto dalla completa sostituzione degli NCA con gli RCA, si hanno perdite maggiori rispetto agli altri mix a causa dell'alta porosità accessibile.

La conseguenza della decalcificazione è una reazione di neutralizzazione dei campioni che contribuisce a ridurre il pH della parte liscivata dei campioni.

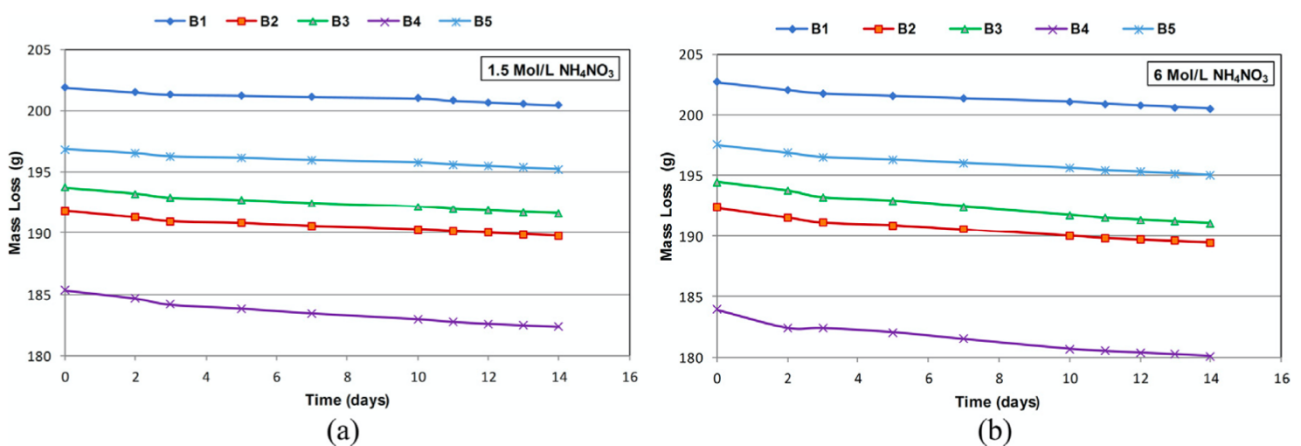


Figura 43: perdita di massa dei campioni in a) soluzione 1.5 Mol/L NH_4NO_3 b) soluzione 6 Mol/L NH_4NO_3 [72]

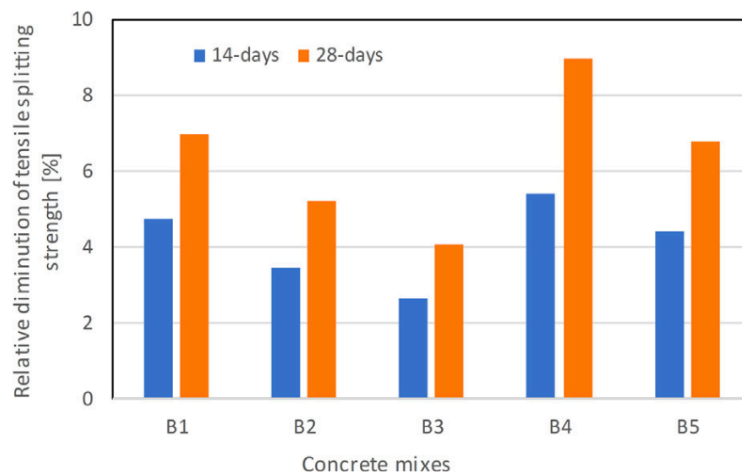


Figura 44: diminuzione percentuale di resistenza a trazione indiretta dopo immersione in soluzione 6 Mol/L NH_4NO_3 [72]

La Figura 45 mostra una parte del campione attaccata dalla soluzione e spruzzata con fenolftaleina 1,5 mol/L dopo immersione per 14 giorni. La parte rosa è la zona a pH superiore a 9, ovvero inalterata.

Si può notare come la profondità di degradazione sia maggiore nel campione B4 che nel B1. Inoltre, U. Schneider et al. [110] hanno sottolineato che la profondità di degradazione è correlata con la resistenza a compressione iniziale: alte resistenze portano a una matrice più densa e più difficilmente attaccabile chimicamente.

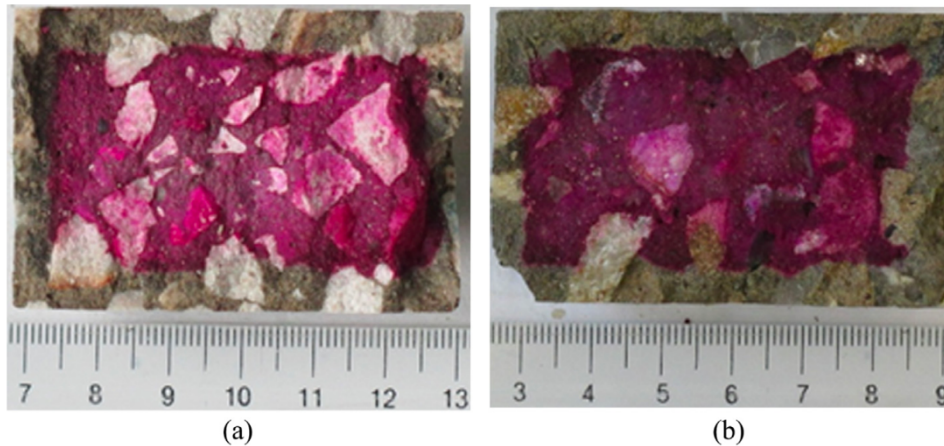


Figura 45: campione attaccato dalla soluzione e spruzzato con soluzione di fenolftaleina: a) B1 mix b) B4 mix [72]

In Tabella 22 si può anche osservare che la profondità cresce con il tempo di immersione.

Tabella 22: profondità di degradazione in soluzione 6 Mol/L NH_4NO_3 [72]

Concrete mixes	Degradation depth (mm)	
	Immersion (days)	
	14	28
B1	5.42	10.15
B2	5.83	10.69
B3	5.91	10.33
B4	6.28	11.25
B5	5.46	9.94

7.3 Proprietà meccaniche

Slump

Lo slump è l'abbassamento del calcestruzzo fresco sotto il proprio peso. La misurazione di tale proprietà è normata in Europa e in Italia dalla UNI EN 12350-2 [112] e la prova consiste nel riempire un cono cavo con un impasto fresco e misurarne l'abbassamento quando si solleva il cono.

In base a tale abbassamento è possibile determinare la lavorabilità del calcestruzzo secondo Abrams.

Lo slump è senz'altro uno dei requisiti che deve soddisfare il calcestruzzo per poter essere utilizzato. Infatti, se non si raggiunge un certo valore di tale parametro, il mix non può essere utilizzato per la realizzazione della struttura per cui ne era previsto l'utilizzo poiché non riuscirebbe a riempire tutti i casseri.

Dall'analisi della letteratura emerge che lo slump dei RAC è fortemente condizionato dalle condizioni di umidità in cui vengono impiegati gli RCA, ovvero se sono:

- SSD: condizioni ottenute saturando l'aggregato e rimuovendo l'acqua superficiale (il tempo di immersione è generalmente di 24 ore);
- preventivamente inumiditi: aggregato immerso nell'acqua per un certo tempo (qualche minuto) e successivamente lasciato drenare per un altro periodo di tempo (anche in questo caso qualche minuto);
- AD: aggregato asciugato all'aria;
- OD: aggregato asciugato in forno (generalmente posto a 105°C per 24 ore e poi viene lasciato raffreddare prima della miscelazione).

Un RCA asciutto infatti tenderà ad assorbire più acqua rispetto a un analogo RCA impiegato nelle altre condizioni, provocando di conseguenza una riduzione del rapporto w/c del mix e dell'acqua libera presente, con una conseguente riduzione di lavorabilità.

C.S. Poon et al. [113] hanno misurato lo slump iniziale e ad intervalli di 15 minuti, fino a un massimo di 165 minuti dalla miscelazione, di 4 diverse miscele di calcestruzzo ottenute impiegando gli RCA nei tre diversi stati di umidità, per un totale di 12 preparati.

I mix sono indicati con lo stato in cui è utilizzato l'aggregato (OD, AD, SSD) seguito da un numero da 1 a 4 indicante il quantitativo percentuale di riciclati (0%, 20%, 50%, 100%).

Tutte le mixture hanno lo stesso contenuto d'acqua iniziale di partenza, lo stesso rapporto w/c e lo stesso rapporto di fini rispetto al totale. Nello stato AD e OD è stata aggiunta acqua per saturare gli aggregati, in modo proporzionale al quantitativo di riciclati usati, perciò si possono osservare alcune differenze nel contenuto d'acqua indicato in Tabella 23.

Le proporzioni sono riassunte anch'esse in Tabella 23:

Tabella 23: mix proportion [113]

Actual mass of water and materials used in different mixes									
Mix	Combination of coarse aggregate	Moisture state of coarse aggregate	Proportions (kg/m ³)						
			Water	Cement	Sand	Crushed granite		Recycled aggregate	
						10 mm	20 mm	10 mm	20 mm
AD1	100% crushed granite	AD	214	353	667	362	724		
OD1		OD	221	353	667	360	720		
SSD1		SSD	209	353	666	364	729		
AD2	80% crushed granite + 20%	AD	217	353	660	287	574	70	139
OD2	recycled concrete	OD	230	353	661	284	569	67	135
SSD2		SSD	206	353	661	288	576	72	144
AD3	50% crushed granite + 50%	AD	229	353	647	176	351	170	343
OD3	recycled concrete	OD	247	353	647	175	349	164	332
SSD3		SSD	207	353	649	177	354	177	354
AD4	100% recycled concrete	AD	241	353	625			330	663
OD4		OD	271	353	625			317	642
SSD4		SSD	209	353	625			342	684

Per la miscela con solo aggregati naturali, denominato mix 1, è stato misurato uno slump iniziale compreso tra 100 e 110 mm (Figura 46 a)).

La differenza nel contenuto d'acqua non condiziona significativamente lo slump iniziale, sebbene il mix OD1 mostri uno slump leggermente maggiore rispetto agli altri due, dovuto alla maggior quantità iniziale di acqua libera.

Lo slump va a 0 dopo 135 minuti per il mix OD1 e dopo 165 minuti per i mix AD1 e SD1.

Siccome l'assorbimento d'acqua degli NCA è solo dell'1% anche l'acqua aggiunta per l'adeguamento è poca. Per esempio, nel mix SSD1 l'acqua è pari a 209 kg/m^3 mentre nel mix OD1 è pari a 221 kg/m^3 , piccole differenze che provocano un conseguente piccolo cambiamento di slump.

Le Figure 46 b e c mostrano il comportamento dei mix 2 e 3.

Quando gli aggregati sono utilizzati in stato OD, lo slump iniziale raggiunge i 120 mm per il mix OD2 e 130 mm per il mix OD3, sebbene quello degli stessi mix con aggregati nello stato AD e SSD si mantenga a circa 100 mm. L'incremento di slump iniziale con un incremento del contenuto di riciclati è dovuto, come anticipato, alla maggior quantità di acqua aggiunta per compensare l'alta capacità di assorbimento d'acqua, la quale porta a un incremento di acqua libera iniziale e un conseguente slump iniziale maggiore.

Per il mix 4 l'effetto del contenuto d'acqua iniziale diventa significativo: nel mix OD4 l'acqua è pari a 271 kg/m^3 , maggiore di quella presente nel mix SSD4. Anche nel mix AD4 l'acqua è stata aumentata per saturare gli aggregati.

Lo slump iniziale per l'OD4 è pari a 145 mm e nell'AD4 è pari a 125 mm, simile a quello dell'OD3.

Contrariamente quello SSD mantiene uno slump di 100 mm.

È chiaro quindi che l'utilizzo di aggregati riciclati in percentuali anche molto diverse non porta eccessivi cambiamenti di slump se sono impiegati in condizioni SSD.

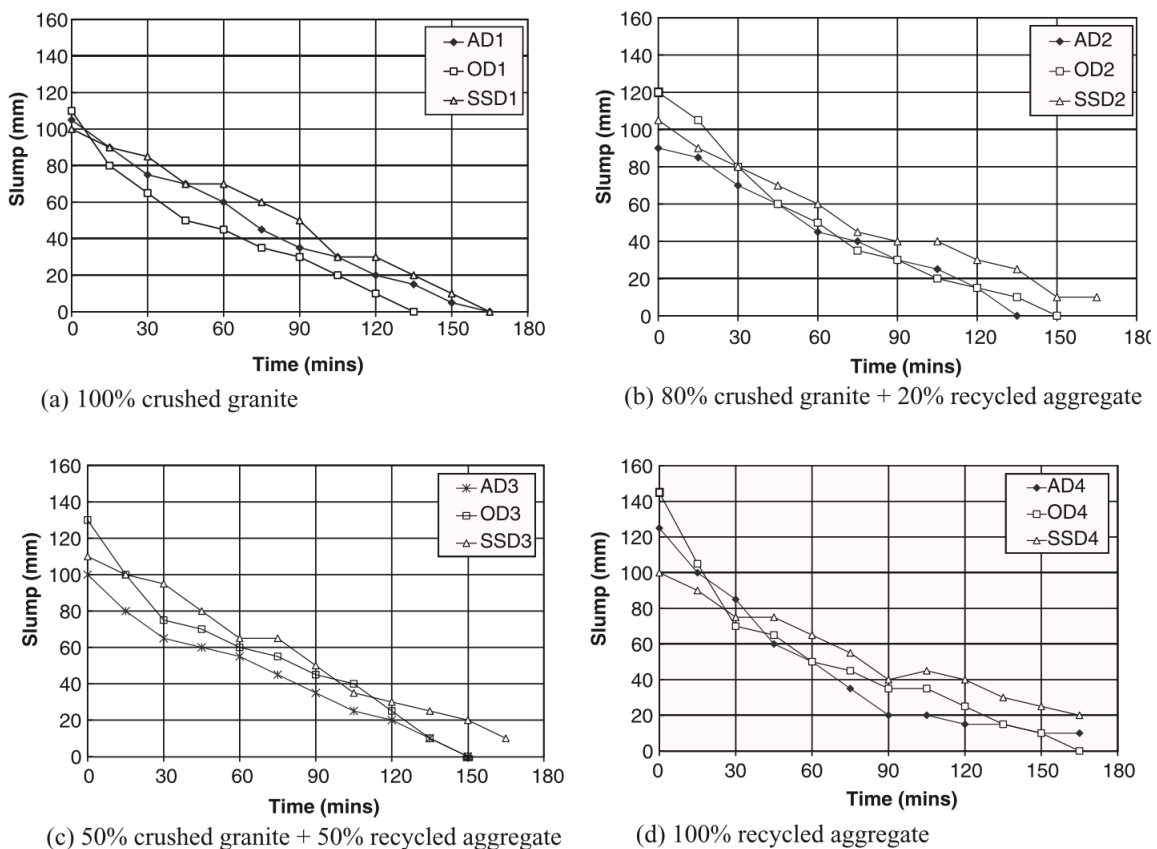


Figura 46: abbassamento [113]

Gli outliers dei mix AD2 e AD3 che possono essere osservati nella Figura 47 sono dovuti, come anticipato, all'alta quantità di acqua libera iniziale. Nonostante la presenza di questi ultimi, si osserva comunque una buona correlazione tra il contenuto di acqua libera e lo slump.

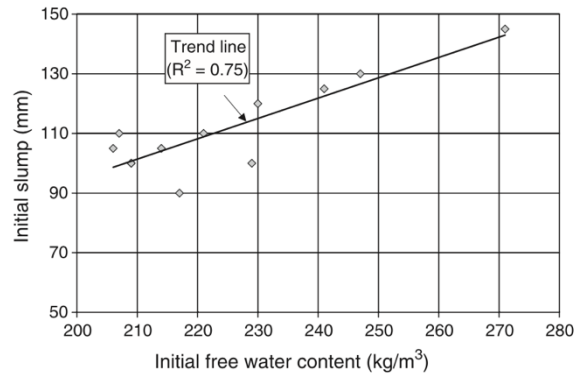


Figura 47: correlazione acqua vs abbassamento [113]

È stato osservato quindi che l'uso di aggregati naturali nello stato AD e SSD porta lo slump a 0 trascorsi 165 minuti dal mixing, mentre nello stato OD si ha una maggiore perdita di slump nei primi 60 minuti. Questo è dovuto all'aggregato che essendo molto asciutto riduce molto velocemente l'acqua nell'impasto, infatti a 135 minuti si ha già slump nullo. L'uso di aggregati riciclati nello stato SSD e nei range indicati precedentemente causa una minor perdita di slump la quale non raggiunge lo 0 all'interno del periodo di 165 minuti. Di contro, quelli nello stato OD raggiungono lo 0 dopo 150 minuti (mix 2 e 3) e dopo 165 minuti (mix 4).

Houria Mefteh et al. [108] hanno effettuato le stesse misurazioni ma su un periodo ridotto a 60 minuti.

I risultati sono coerenti con quelli illustrati precedentemente.

Gli aggregati utilizzati sono:

- NCA provenienti dalla frantumazione di calcare algerino, prodotti e utilizzati nelle due frazioni granulometriche 5-10 mm e 10-20 mm.
- RCA provenienti dalla demolizione e dal trattamento di rifiuti provenienti da strutture insalubri in calcestruzzo prefabbricato, anch'esse utilizzate in due frazioni granulometriche: 5-10 mm e 10-20 mm.
- Aggregato fine rappresentato da sabbia di fiume

Le granulometrie degli aggregati utilizzati sono riassunte nella Figura 48.

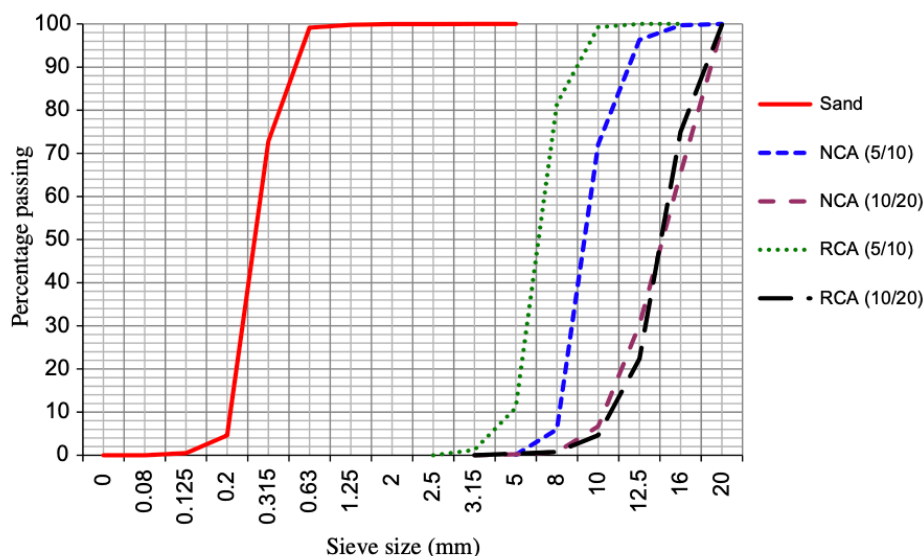


Figura 48: granulometrie aggregati [108]

I provini sono stati preparati con il metodo Dreux-Festa [73] con una resistenza di progetto di 25 MPa, rapporto w/c e contenuto di cemento costanti. Sono state preparate tre serie, una per ogni stato iniziale di umidità⁶: OD, preventivamente inumiditi e SSD, ognuna delle quali ha 6 provini con differenti quantità di riciclati.

La sostituzione degli NCA ha riguardato sia la frazione più fine che più grossa.

Le variazioni di slump sono indicate nella Figura 49, nella Figura 50 e nella Figura 51.

Per le miscele preparate con soli NCA, il valore di slump iniziale è di 90 mm e scende a 10 mm a 60 minuti dal mixing.

Le miscele preparate con il 100% di RCA nello stato OD hanno fatto misurare valori di slump iniziale di 15 mm e valori di slump di 10 mm dopo 60 min (Figura 49). Questi slump sono molto più bassi rispetto al valore target fissato nella formulazione usata per la realizzazione dei provini. Ciò è dovuto al maggior assorbimento di acqua determinato dall'RCA. La perdita di lavorabilità è importante nei primi 30 minuti per queste miscele. Da ciò si può dedurre che durante questo periodo si ha il massimo assorbimento d'acqua.

Dai valori misurati si può dedurre che lo slump decresce al crescere della percentuale di RCA e all'aumentare del tempo trascorso dalla miscelazione.

Fonseca et al. [100] hanno esaminato l'evoluzione dell'assorbimento d'acqua e hanno trovato che durante i primi 5 minuti si verifica la maggior parte dell'assorbimento d'acqua.

Di conseguenza, si è ritenuto che il 90% di assorbimento massimo si verifichi in questo periodo come si può osservare anche dalla Tabella 24.

Tabella 24: capacità d'assorbimento acqua [108]

Water-absorption capacity of recycled aggregates.		
Water absorption time	Water absorption (%)	
	Size fractions	
	5/10 mm	10/20 mm
15 min	6.1	3.2
30 min	6.43	3.44
45 min	6.92	3.92
60 min	7.33	4.67

Dopo 30 minuti, la perdita di lavorabilità in termini di perdita di slump ha una diminuzione dovuta a un probabile ritorno di acqua nella malta dopo che era stata assorbita negli RCA nei precedenti 30 minuti. Quest'ultima infatti ha perso parte della sua acqua in evaporazione e reazioni di idratazione, e perciò presenta un contenuto d'acqua inferiore a quello dell'aggregato. Il gradiente così generato provoca la fuoriuscita dell'acqua dall'aggregato.

Questo fenomeno è stato osservato utilizzando anche aggregati leggeri (porosi) nel calcestruzzo e si vede chiaramente anche nella Figura 46 del precedente studio analizzato.

⁶ Gli aggregati naturali sono stati impiegati in condizioni asciutte

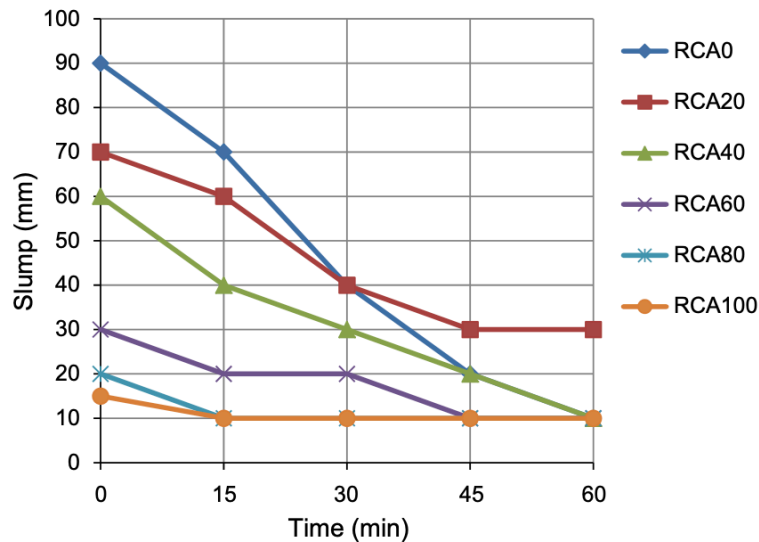


Figura 49: condizioni OD [108]

Nella Figura 49 e nella Figura 50 sono rappresentate le variazioni di slump delle miscele di calcestruzzo preparate con RCA in condizioni umide e SSD.

Quando gli RCA sono stati preventivamente inumiditi, lo slump iniziale varia da 90 mm per contenuto di RCA del 20%, a 150 mm per contenuto di RCA del 100%. Questi slump diminuiscono all'aumentare del tempo, ma rimangono a valori superiori a quelli delle miscele di calcestruzzo preparate solo con NCA. Rispetto a questi ultimi, gli RCA vengono miscelati con una quantità di acqua più elevata dovuta al processo di saturazione: tali quantità sono corrispondenti rispettivamente al 5,3% e al 2,9% della massa RCA per le frazioni dimensionali 5-10 mm e 10-20 mm.

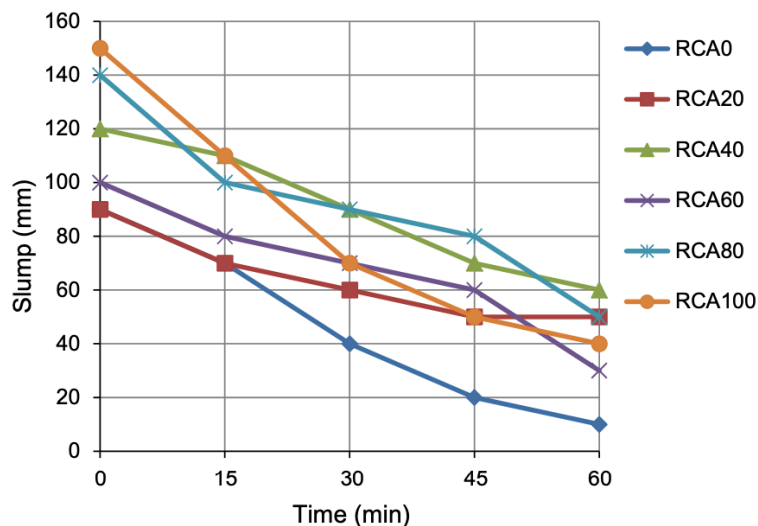


Figura 50: condizioni inumiditi [108]

Le curve dell'RCA utilizzati in condizioni SSD, sono simili a quelle ottenute con l'RCA preventivamente inumidito (Figura 50). Tuttavia, queste curve non sono coerenti con il contenuto di RCA.

Ad esempio, durante il periodo di 60 minuti, la miscela RCA20 ha prodotto uno slump maggiore rispetto alla miscela RCA60 (Figura 51). Questo sembra essere collegato alla quantità di vecchia malta presente negli RCA che è molto casuale. Inoltre, la rugosità degli RCA, che è stata intensificata durante la produzione di aggregati (durante la frantumazione), sembra diminuire la fluidità del calcestruzzo fresco anche se comunque migliora l'adesione tra aggregato e malta fresca.

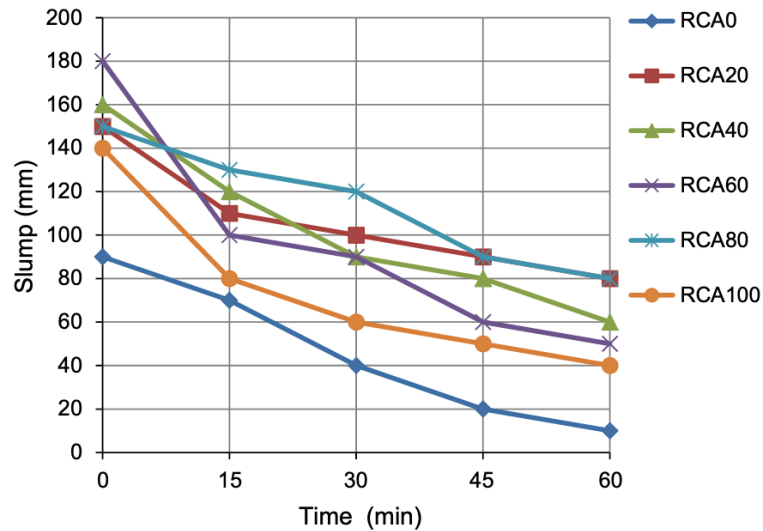


Figura 51: condizioni SSD [108]

L. Berredjem [72] invece ha conseguito risultati leggermente diversi dovuti a un aproccio anch'esso diverso. Infatti, a differenza dei precedenti studi, è stato variato il contenuto d'acqua per essere consistenti con la classe S2 (5-9 cm). Le proprietà del calcestruzzo fresco e gli slump iniziali misurati sono riportati nella Tabella 25.

Tabella 25: mix proportion [72]

Mix proportions of concretes.

		Proportions (kg/m ³)				
		B1	B2	B3	B4	B5
Cement		400	400	400	400	400
CLS		578		578		578
RFA			571		571	
NCA 3/8 mm		185	168			139
NCA 8/16 mm		928	928			696
RCA 3/8 mm				176	160	44
RCA 8/16 mm				874	874	219
Mixing water (in liters)	Effective water	187	187	187	194	187
	Added water	0	51	39	71	21
	Total added water	187	238	226	265	208
Water/Cement ratio (W/C)		0.47	0.59	0.56	0.66	0.52
Slump (cm)		6.50	7.50	7.00	7.50	6.50
Fresh density (kg/m ³)	real	2321	2296	2277	2207	2300
	calculated	2278	2305	2254	2270	2284

Lo slump osservato perciò è maggiore nei mix con gli RCA. Ciò si verifica perché il quantitativo di acqua totale è molto maggiore nei mix con RCA.

In generale si può quindi affermare che l'utilizzo degli RCA porta ad avere una minore lavorabilità dell'impasto. Tale lavorabilità è peggiore nel caso di RCA asciutti (OD e AD) perché l'acqua di impasto viene assorbita da quest'ultimi abbassando il rapporto w/c della miscela. Nel caso SSD o saturo, essendo l'aggregato saturo d'acqua si ha una minore perdita di lavorabilità perché l'acqua assorbita dalla miscela è poca.

La perdita di lavorabilità è maggiore nei primi 30 minuti perché si ha la maggior parte dell'assorbimento d'acqua in questo periodo. Successivamente la perdita di lavorabilità è minore poiché parte dell'acqua assorbita nell'RCA rifluisce nella malta del calcestruzzo.

Resistenza a compressione

La resistenza a compressione è uno dei parametri fondamentali di un RAC.

In letteratura si trovano diversi studi che analizzano la resistenza a compressione dei RAC a diversi tempi di maturazione, generalmente compresi tra 3 e 28 giorni nella maggior parte dei casi.

Alcuni autori come Shi-Cong Kou et al. [70] hanno inoltre studiato la resistenza a lungo termine, ovvero a 1 e 5 anni.

Altri ancora, come L. Berredjem et al. [72] hanno studiato gli effetti che ha l'immersione in diversi tipi di acque sulla resistenza a compressione a lungo termine (1 anno).

C.S. Poon et al. [113] hanno osservato che la resistenza a compressione per i provini con aggregati riciclati è fortemente dipendente dal contenuto iniziale d'acqua, anche se tuttavia tutti i provini hanno raggiunto il target dei 35 MPa di progetto a 28 giorni (Tabella 26).

Per i mix AD1 e SSD1 si registrano resistenze comparabili a ogni misura effettuata, mentre per l'OD1 si registrano resistenze inferiori. L'uso di NCA in stati OD sembra avere effetto negativo.

Nella Figura 52 si evidenzia che, mentre la resistenza dei mix AD si mantiene abbastanza costante al crescere del grado di sostituzione, quella dei mix con RCA nello stato OD cresce e quella dei mix con RCA nello stato SSD decresce.

È cosa ben nota che la resistenza del calcestruzzo dipende dalla resistenza della matrice cementizia, dagli aggregati e dalla resistenza dell'interfaccia tra questi due.

Per i mix OD1 e SSD1 tale resistenza è principalmente legata allo sviluppo della resistenza all'interfaccia.

Wong et al. [114] hanno osservato che gli NCA in stato SSD hanno un legame più forte rispetto a quelli asciutti. Ciò può spiegare la bassa resistenza dell'OD1, afflitta ulteriormente dall'alto rapporto w/c.

La situazione quando si usano gli RCA invece è differente: il contenuto d'acqua iniziale ha un effetto opposto sullo sviluppo della resistenza rispetto a ciò che si verifica quando si utilizzano NCA. Di conseguenza lo stato SSD non è preferito.

Quando gli aggregati sono impiegati in condizioni SSD si può verificare il fenomeno di "bleeding" [113]: durante la compattazione parte dell'acqua contenuta negli aggregati può uscire e causare un aumento locale del rapporto w/c intorno ad essi, creando così una possibile superficie di rottura.

Nel caso contrario, in condizioni OD, l'acqua può muoversi dalla matrice cementizia agli aggregati, creando così un legame molto forte tra le due componenti nel primo periodo di maturazione.

Tabella 26: resistenza a compressione [113]

Mix	Compressive strength of concrete		
	Compressive strength (MPa)		
	3 days	7 days	28 days
AD1	25.0	34.9	48.3
OD1	18.2	27.9	40.2
SSD1	25.2	33.1	46.0
AD2	23.3	34.8	44.9
OD2	19.4	29.2	43.2
SSD2	20.4	30.3	43.0
AD3	22.9	32.2	44.7
OD3	21.0	29.2	39.7
SSD3	17.7	27.0	38.1
AD4	24.4	33.9	46.8
OD4	21.7	32.1	43.3
SSD4	17.5	28.5	39.1

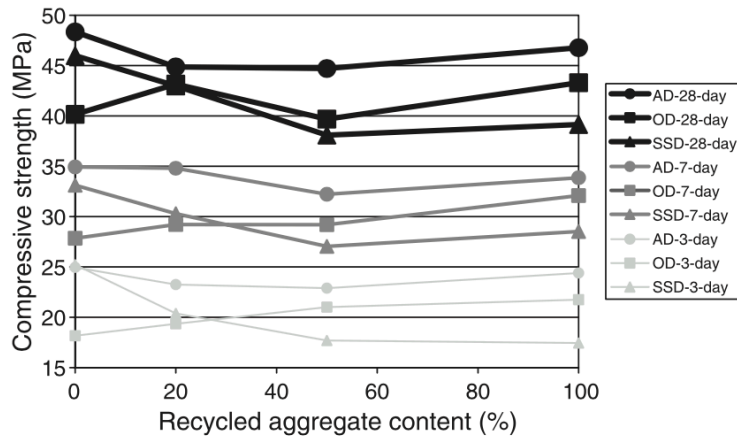


Figura 52: effetto del grado di sostituzione sulla resistenza a compressione [113]

Houria Meftah et al. [108] hanno ottenuto risultati analoghi ai precedenti, evidenziando però anche l'influenza del grado di rimpiazzamento.

Tutti i mix raggiungono il target prefissato dei 25 MPa a 28 giorni ma per valori di sostituzione tra il 20 e il 40% di RCA impiegati in condizioni OD si osservano impatti trascurabili sulla resistenza a compressione a 7 e 28 giorni. Anzi in questo caso si osserva un leggero aumento di resistenza rispetto al NAC. Per gradi di sostituzione superiori al 40% la resistenza decresce.

Riguardo agli altri due stati si può dire che in queste condizioni si verifica il suddetto fenomeno di "bleeding" [113], specialmente per percentuali di impiego superiori al 60%.

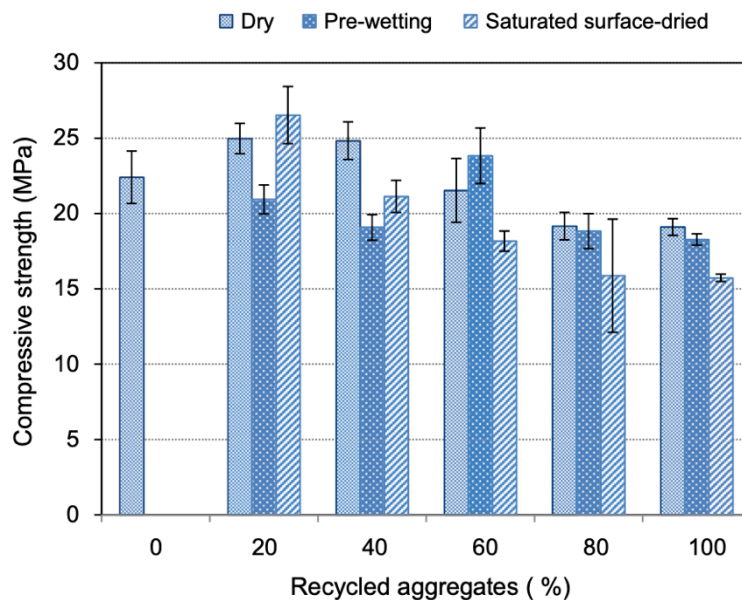


Figura 53: resistenza a compressione a 7 giorni [108]

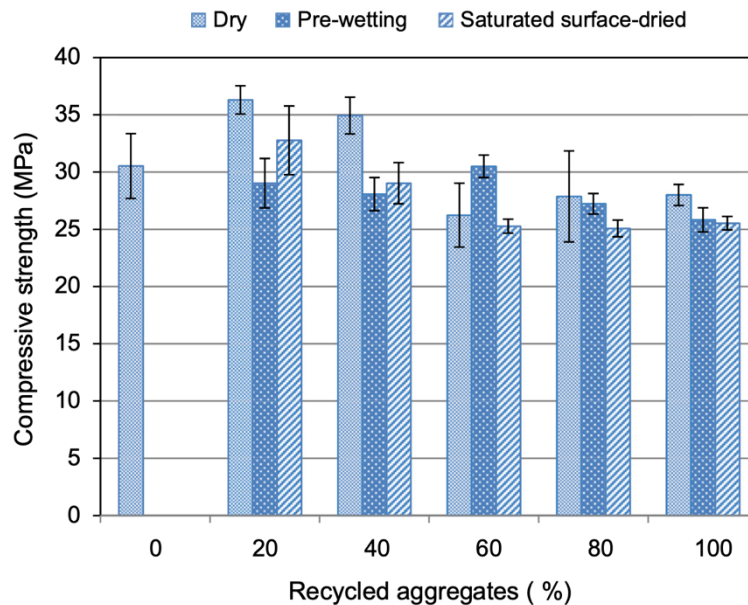


Figura 54: resistenza a compressione a 28 giorni [108]

S. Manzi et al. [71] hanno trovato risultati analoghi a Houria Meftah et al. [108]. In questo caso gli aggregati, sia naturali che riciclati, sono stati impiegati in condizioni umide.

La Figura 55 mostra le resistenze a compressione su campioni cilindrici misurate a 7 e 28 giorni di maturazione, indicate con f_{cm} . La resistenza a compressione è crescente con il tempo di maturazione, e ha un incremento maggiore nei RAC rispetto al mix di controllo CC (rispettivamente 15% e 11% di guadagno). Ciò può essere dovuto all'idratazione di parti di cemento della malta attaccata, o all'assorbimento d'acqua dovuto all'utilizzo degli RCA che causa una diminuzione di w/c. Dopo 28 giorni, i RAC mostrano valori maggiori di resistenza a compressione rispetto al CC.

In particolare, RC1 ha la più alta resistenza, 52 MPa, maggiore del 27% rispetto a quella del CC.

L'alta qualità degli RCA utilizzati in questo studio ha un effetto positivo sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo. Effetto che diventa maggiore quando sono utilizzati solo gli RCA grossi.

Infatti, in RC1 e RC2, dove è stato usato solo R25, rappresentante un RCA con dimensioni 16-25 mm, si sono misurate resistenze più alte, mentre in RC3 e RC4, dove è stato usato solo R16, ovvero un RCA con dimensione 0-16 mm, si sono misurate resistenze più basse.

Risultati previsti in quanto la sostituzione dei fini causa la riduzione delle proprietà meccaniche.

Anche in questo caso, gradi di rimpiazzamento inferiori al 50% non hanno influito significativamente sulle performance, ma anzi, hanno portato dei benefit dovuti all'elevata qualità degli RCA usati.

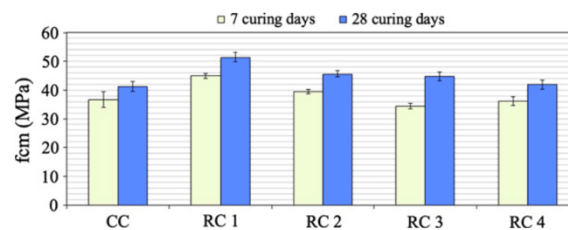


Figura 55: resistenze a compressione a 7 e 28 giorni [71]

Shi-Cong Kou et al. [70] hanno studiato la resistenza a compressione fino a 5 anni di maturazione e in Tabella 27 sono indicati i valori registrati.

Si può vedere che in questo caso la resistenza a compressione dei RAC è sempre inferiore a quella del CC, dovuta anche al fatto che tali mix contengono il 100% di RCA.

A 28 giorni, la resistenza a compressione di RCA-C e RA-C, è del 21,7% e del 18,8% inferiore rispettivamente rispetto al mix di controllo CC. Tuttavia, tale differenza è diminuita dopo 5 anni al 6,3% e all'8,9% rispettivamente.

Di conseguenza si evince che la miscela di calcestruzzo RCA-C ha il più alto guadagno di resistenza, oltre il 60% e, sebbene il calcestruzzo di controllo (CC) abbia la massima resistenza a compressione a 28 giorni, ha mostrato il più basso aumento di resistenza dopo 5 anni.

Tabella 27: resistenza a compressione [70]

Compressive strength of concrete mixtures.					
Notation	Recycled aggregate (%)	Compressive strength (MPa)			Gain from 28 days to 5 years (%)
		28 days	1 year	5 years	
CC	0	43.8	53.7	58.9	34
RCA-C	100	34.3	48.8	55.4	62
RA-C	100	35.6	49.2	54.1	52

L. Berredjem et al. [72] hanno osservato che tutti i campioni hanno raggiunto il target di resistenza della classe C25/30 e confermano un trend crescente di incremento di resistenza.

Ogni provino preparato dai mix B2 e B4, per ogni bagno di immersione, ha una resistenza più bassa degli altri. Questo è dovuto alla presenza di RFA che necessitano di acqua aggiuntiva nel mix, per via del loro alto WA, e alla scarsa qualità meccanica di questi ultimi. È noto che l'alto rapporto w/c produce valori di resistenza inferiori. Questi risultati sono coerenti con quelli ottenuti da Sérifou et al. [115], che avevano concluso che l'uso di RCA grossi e fini nel calcestruzzo riducono la resistenza a compressione.

I provini derivati dai mix B1 e i B5 invece hanno alte proprietà meccaniche. Inoltre, i campioni rimossi dall'acqua salata dopo 12 mesi non presentano segni di degradazione.

È stato inoltre osservato che per i provini conservati in acqua normale la cinetica è simile (Figura 53).

Dopo 3 mesi, iniziano a osservarsi le prime differenze tra i B1-B5 e gli altri.

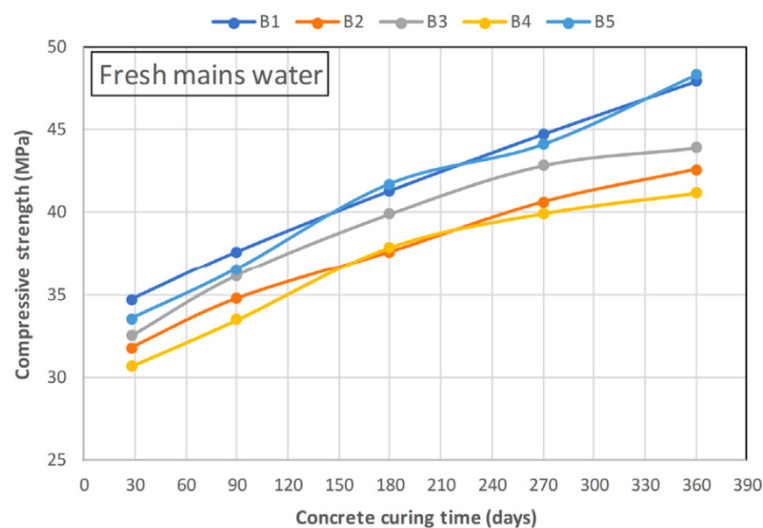


Grafico 2: resistenza a compressione - acqua naturale [72]

Ciò si verifica anche nei campioni conservati nelle altre tipologie di acqua (Figura 56 e Figura 57).

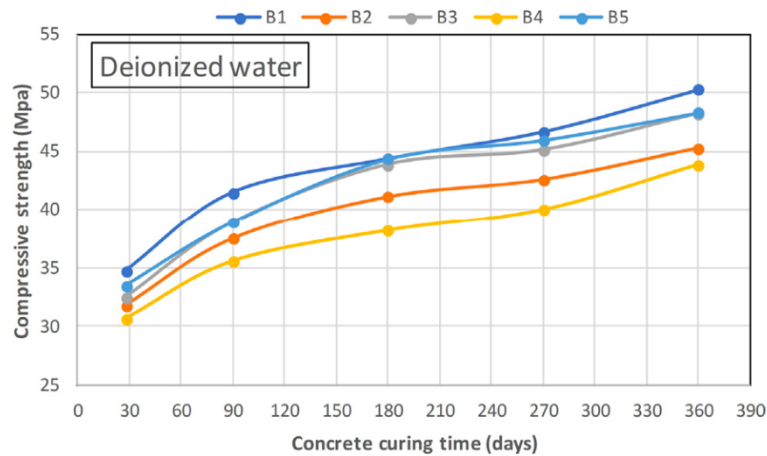


Figura 56: resistenza a compressione - acqua deionizzata [72]

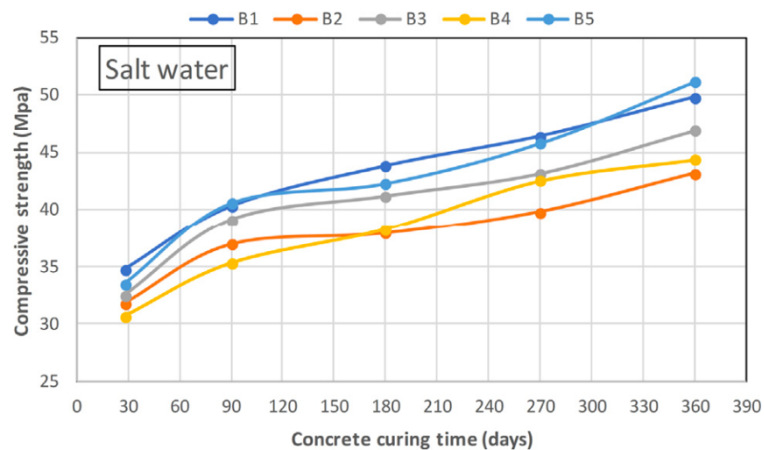


Figura 57: resistenza a compressione - acqua salata [72]

Questo può essere spiegato con la qualità della ITZ [116]: i RAC hanno una ITZ con microstruttura differente dai NAC. L'alta porosità e l'alto assorbimento d'acqua dei primi rendono la ITZ molto debole.

Nei mix B1 e B5, in cui gli aggregati hanno origine dai calcari, si ha una zona di interfaccia molto resistente e con bassa permeabilità dovuta alle reazioni che si sviluppano tra aggregati e matrice cementizia. Questa è una delle ragioni per cui si ha un'alta resistenza nei primi 3 mesi, mentre dopo l'incremento è meno marcato poiché le reazioni si sviluppano più lentamente.

Per i RAC invece il punto debole è l'ITZ tra l'aggregato e la vecchia malta aderente, in quanto è quella in cui è più concentrata la porosità [117].

La Figura 58 rappresenta l'analisi EDX della vecchia malta (a), della vecchia ITZ (b) e dell'aggregato naturale grosso di origine calcarea (c). Come si osserva le fratture iniziano dalla ITZ.

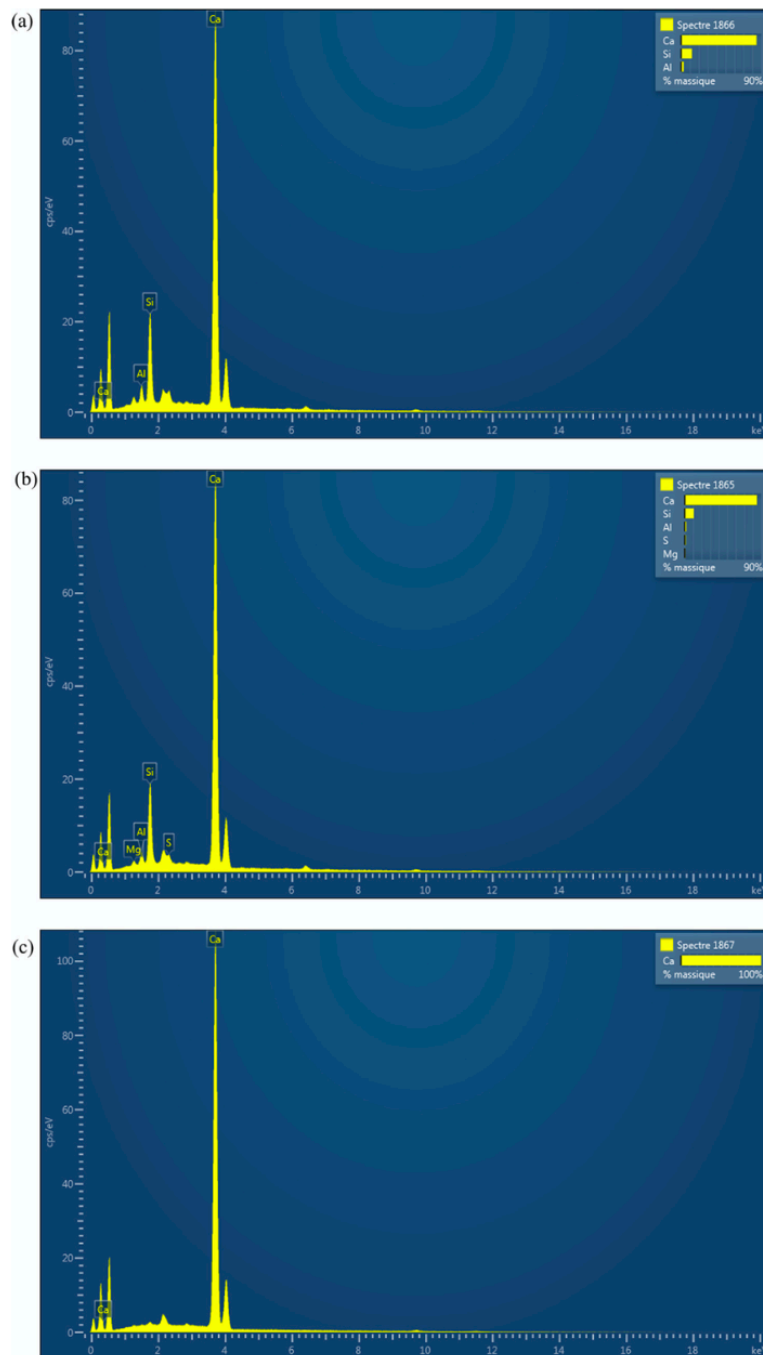


Figura 58: analisi EDX del mix B3 a 90 giorni. a) vecchia matrice b) vecchia ITZ c) calcari [72]

La Figura 59 rappresenta la micrografia SEM e la microanalisi del mix B3 a 90 giorni in cui si notano le fratture a $25 \mu m$ dall'interfaccia con l'aggregato naturale. In questi casi la ITZ rappresenta il ponte tra la vecchia malta e l'aggregato grosso.

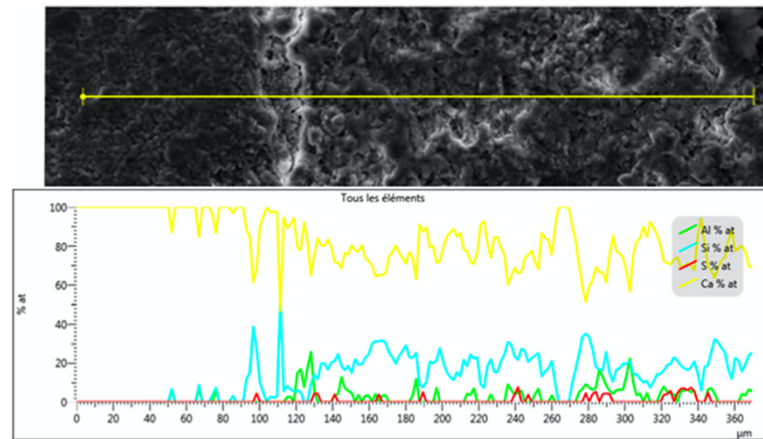


Figura 59: micrografia SEM e microanalisi B3 a 90 giorni [72]

L'analisi della letteratura porta ad affermare che anche la resistenza a compressione è funzione della tipologia di cemento e dalla condizione di umidità in cui sono impiegati gli RCA: per condizioni asciutte si ottengono le migliori performance a lungo termine in termini di resistenza a compressione. Riguardo il grado di rimpiazzamento, si osserva che un range ottimale è compreso tra il 20 e il 40%. Tale sostituzione può portare ad effetti benefici se gli RCA utilizzati sono di elevata qualità. Gli effetti possono essere positivi se la sostituzione riguarda la frazione più grossolana.

Resistenza a trazione

La resistenza a trazione dei RAC e dei calcestruzzi in generale non è un parametro essenziale da investigare, questo perché di solito il calcestruzzo non armato viene utilizzato per assorbire sforzi di compressione e, nel caso esistesse la possibilità della presenza di sforzi di trazione, viene inserita l'armatura d'acciaio per assorbire tali sforzi. In letteratura tuttavia si trovano diversi studi che analizzano questa resistenza insieme a quella a compressione.

Houria Mefteh et al. [108] hanno investigato le resistenze a trazione delle miscele di calcestruzzo all'età di 7 e 28 giorni. I valori sono mostrati nella Figura 60 e nella Figura 61. Questi valori mostrano un andamento simile a quello della resistenza alla compressione rappresentate nella Figura 53 e nella Figura 54.

Analogamente ai risultati ottenuti nella resistenza a compressione, gli RCA utilizzati nello stato OD forniscono generalmente la migliore resistenza. Va notato che la resistenza alla trazione per tutte le miscele di calcestruzzo a 28 giorni è ben al di sopra del valore di resistenza a trazione dedotto secondo la norma europea NF EN 206-1 [118] e relativo a una resistenza a compressione di 25 MPa.

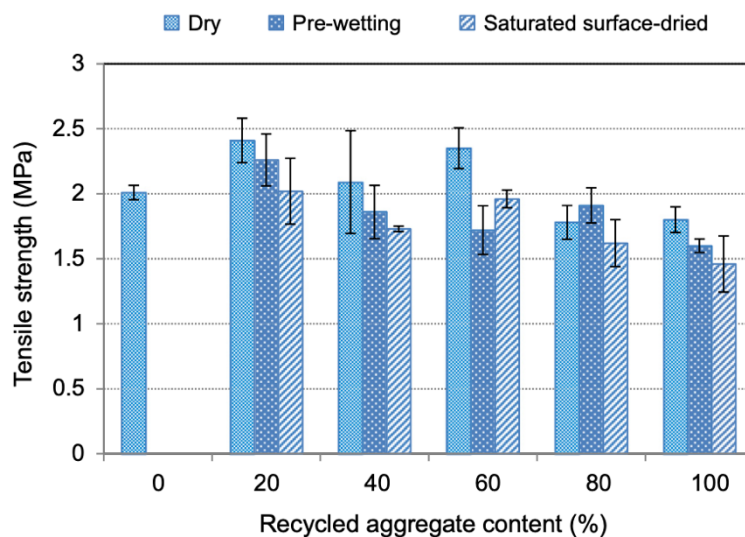


Figura 60: resistenza a trazione a 7 giorni [108]

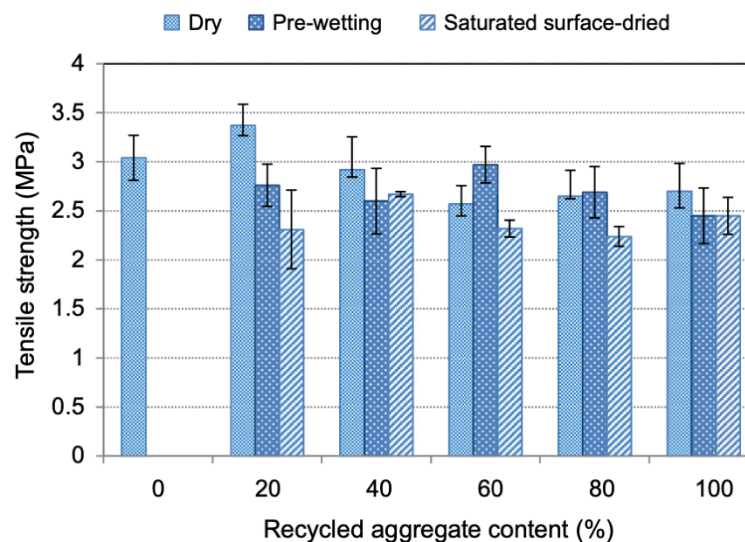


Figura 61: resistenza a trazione a 28 giorni [108]

Resistenza a trazione indiretta

Le resistenze alla trazione indiretta trovate da Shi-Cong Kou et al. [70] sono riportate nella Tabella 28.

A 28 giorni la resistenza dei due tipi di RAC, RCA-C e RA-C, è minore del 10,0% e 7,0% rispetto a quella del CC.

A 5 anni invece vi è stato un miglioramento significativo nella resistenza dei RAC, le quali risultano anche superiori a quella del CC.

La Tabella 28 indica che la resistenza alla trazione del CC è aumentata del 37% tra 28 giorni e 5 anni, mentre l'RCA-C ha un aumento del 65%, confermandosi il più alto aumento, e l'RA-C ha un aumento del 56%.

Gli alti guadagni dei RAC, in termini di resistenza, potrebbero essere dovuti al fatto che la presenza dell'RCA ha migliorato la microstruttura della ITZ aumentando la resistenza del legame tra la nuova pasta di cemento e i vecchi aggregati. Un miglioramento della resistenza di tale legame spiegherebbe un aumento maggiore della resistenza a trazione piuttosto che della resistenza a compressione [119]. La capacità di auto-cementazione⁷ dell'aggregato riciclato può anche aver contribuito all'aumento della resistenza [120].

Tabella 28: resistenza a trazione [70]

Splitting tensile strength of concrete mixtures.					
Notation	Recycled aggregate (%)	Splitting tensile strength (MPa)			Gain from 28 days to 5 years (%)
		28 days	1 year	5 years	
CC	0	2.43	2.94	3.32	37
RCA-C	100	2.21	3.12	3.64	65
RA-C	100	2.26	3.07	3.52	56

L. Berredjem et al. [72] hanno osservato invece che le resistenze di tutti i mix seguono il relativo trend della resistenza a compressione e che in tutti i casi si raggiungono resistenze a trazione superiori rispetto a quella caratteristica a 28 giorni come da normativa NF EN 206-1 [118] non superando però i valori di resistenza a trazione degli ordinari NAC, a differenza del caso precedente [108] [121]. Questo perché tale resistenza è legata alla qualità della matrice e al legame tra quest'ultima e l'aggregato, come affermato da Weerheijm [122]. Un alto rapporto w/c provoca una bassa resistenza della matrice e una ITZ debole. Come riportato da letteratura quando gli RCA sono usati preventivamente saturati, parte dell'acqua può migrare da loro alla nuova malta affliggendo la sua microstruttura e aggiungendo ulteriore porosità, e ciò può verificarsi sia per tendenza naturale, come affermato da Djerbi [123], o quando si compatta il calcestruzzo sulla tavola vibrante [113].

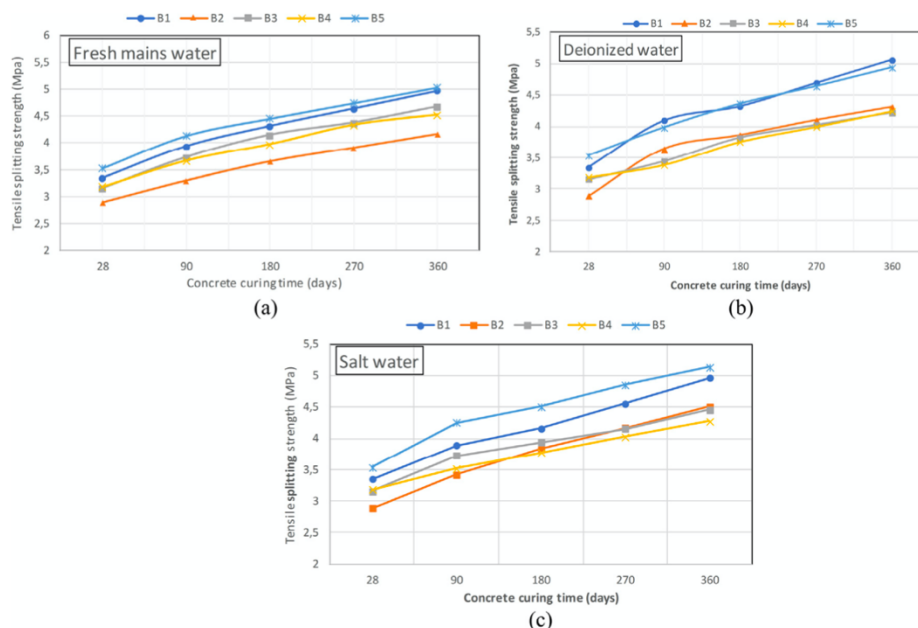


Figura 62: resistenza a trazione dopo maturazione in a) acqua potabile b) acqua deionizzata c) acqua salata [72]

⁷ È la capacità dell'RCA di svolgere in parte una funzione di legante essendo costituito da malta aderente, la quale a sua volta è costituita da cemento non idratato che può essere idratato durante la fase di miscelazione dell'impasto del RAC

Ritiro e deformazione sotto carichi di lunga durata

S. Manzi et al. [71] hanno analizzato il ritiro dei mix preparati.

È stato osservato che il CC ha la minore deformazione mentre l'RC2, mix con il maggior quantitativo di RCA, la maggiore (Figura 63 a)). Gli altri mix, aventi quantità di RCA intermedie tra i due, mostrano un comportamento concorde con la quantità di riciclati. Dal punto di vista qualitativo, tutti i mix mostrano una deformazione molto pronunciata nei primi tre mesi, per poi diminuire con il tempo e diventare pressochè nulla dopo 10 mesi. Normalmente le proprietà elastiche dell'aggregato determinano la resistenza offerta. Quest'influenza è confermata dalla correlazione tra la deformazione volumica e il modulo di elasticità, dipendente dalla compressibilità dell'aggregato usato [124]. Generalmente i RAC hanno alti ritiri poiché gli RCA hanno un modulo elastico minore degli NCA e quindi offrono una resistenza minore alla contrazione della matrice cementizia. Per capire meglio il fenomeno, non è sufficiente ragionare in termini di quantitativo di RCA, poiché il ritiro è anche funzione delle tensioni capillari che si generano nella matrice cementizia [125]. La porosità anche in questo caso gioca un ruolo fondamentale. La deformazione volumica è fortemente dipendente dalla quantità di mesopori ($1.25 - 25 \mu m$ range del raggio dei pori). I mix, ordinati in base al valore di questa quantità in ordine decrescente sono: $RC2 > RC1 > RC3 > RC4 > CC$. In generale la deformazione volumica cresce con il contenuto di mesopori.

Insieme al ritiro è stata misurata anche la deformazione sotto carichi di lunga durata.

Analizzando le curve della Figura 63 b), rappresentanti tale fenomeno, si può notare che la pendenza della curva è ancora apprezzabile dopo 1 anno, in tutti i mix, segno che il fenomeno è ancora attivo e non è correlato alla presenza di RCA.

RC3 e RC4 mostrano la più alta deformazione specifica dovuta alla presenza dell'R16 e del suo alto assorbimento d'acqua. RC2 invece, contenente anche la frazione R25, mostra valori di deformazione specifica più bassi dei precedenti ma più alti del CC.

Il rimpiazzo di G con l'R25 porta a effetti positivi sulla deformazione dei RAC. Questo effetto è evidente in RC1 che mostra il valore più basso di tutti i mix oggetto di studio. Questo risultato in parte è inaspettato in quanto, come riportato in altri studi, la presenza della malta attaccata combinata con la nuova matrice cementizia porta a incrementi nella deformazione specifica [104] [126].

Tuttavia, la grandezza del fenomeno è anche correlata alla natura del calcestruzzo, alla natura degli aggregati (inteso come forma, distribuzione granulometrica e modulo elastico) e alla qualità della ITZ, dove sono localizzate le microfrazture [125] [127]. Il basso valore di deformazione specifica di RC1 è in accordo con l'alta resistenza a compressione misurata e il basso assorbimento d'acqua. Il mix infatti è molto denso e sembra che le fratture nella ITZ siano minime.

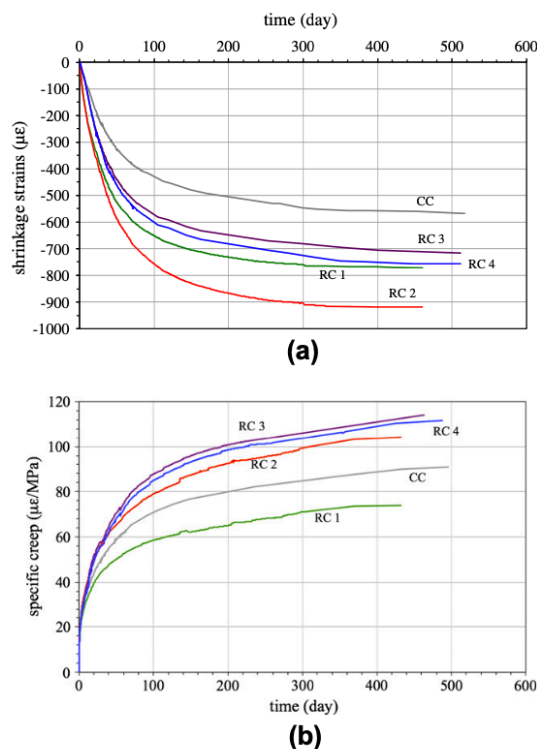


Figura 63: ritiro e deformazione sotto carichi di lunga durata [71]

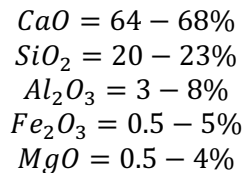
7.4 Metodi di miglioramento della qualità degli aggregati

Meccanismi di idratazione del cemento

Al fine di comprendere meglio i metodi di trattamento descritti nel seguito è utile richiamare brevemente alcuni concetti riguardanti l'idratazione del cemento Portland, materiale utilizzato anche per le prove descritte nel Paragrafo 8.4.

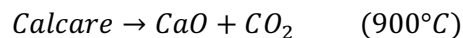
Il cemento Portland è un legante idraulico costituito da una miscela di clinker e gesso (circa il 5% in peso).

Il clinker si ottiene tramite riscaldamento a 1450°C di miscele composte per $\frac{3}{4}$ da calcari e $\frac{1}{4}$ da argille, più eventualmente materiali ricchi di silice, allumina e ossido ferrico. La composizione, in termini percentuali di peso, è riassumibile quindi in:

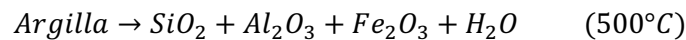


E la restante parte è composta da ossidi di metalli alcalini, Mn e Ti.

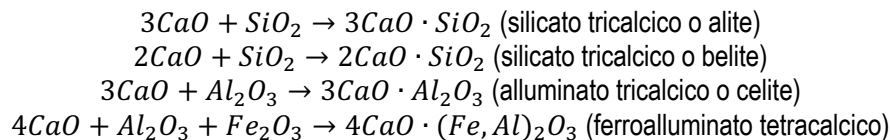
Le rocce calcaree forniscono ossidi di calcio attraverso la reazione:



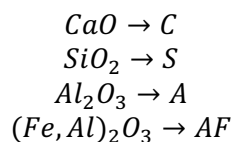
Le argille forniscono allumina, ossido di ferro (III), ossido di magnesio e alcali (sali di sodio e potassio) attraverso la reazione:



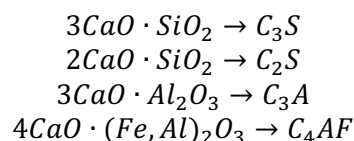
La reazione tra questi prodotti porta alla formazione dei costituenti mineralogici del cemento:



Nella chimica del cemento generalmente si indica:



Indicando con il pedice il coefficiente stechiometrico dei prodotti nelle precedenti reazioni, i costituenti mineralogici possono essere indicati come:



Il C_3S e il C_2S costituiscono circa il 75-85% in peso e conferiscono le caratteristiche di resistenza meccanica nella fase idratata, mentre il C_3A e il C_4AF sono essenziali per la formazione della fase liquida ad alta temperatura.

La presenza di MgO e CaO isolati, prodotti durante la cottura ad alta temperatura, è indesiderata, perché porta alla formazione di cristalli grandi che idratandosi formano $Mg(OH)_2$ e $Ca(OH)_2$ (CH), i quali, aumentando di volume quando il cemento è già indurito, portano alla formazione di crepe e microfessure.

I composti non si idratano alla stessa velocità come si vede nella Figura 64:

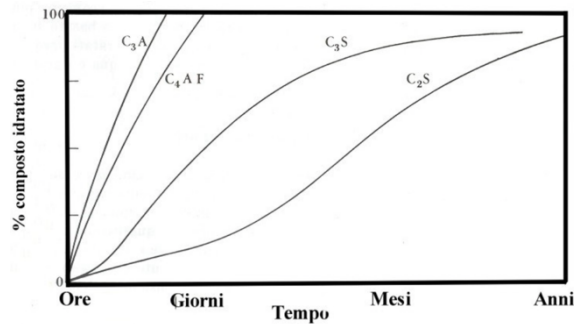
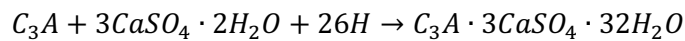


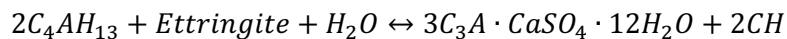
Figura 64: velocità di idratazione dei composti

Il C_3A e il C_4AF reagiscono molto velocemente perciò viene aggiunto il gesso per regolarne la presa.

In H_2O gli ioni Ca^{2+} e SO_4^{2-} reagiscono con $(AlO_4)^-$ per formare un trisolfato, l'ettringite ($3CaOAl_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), la cui funzione è ricoprire i grani di cemento (Grafico 3) e rallentare la velocità di idratazione:



Nel tempo espandendosi l'ettringite si distacca dal granulo di C_3A lasciando disponibili al contatto con l'acqua zone progressivamente crescenti di cemento non ancora idratato andando a formare un monosolfato ($3CaOAl_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$):



L'idratazione di C_3S e C_2S da origine a silicati di calcio idrati colloidal e fibrosi di composizione non ben definita (Figura 65), il $C-S-H$, responsabile delle proprietà adesive del cemento, e a cristalli esagonali di CH (Portlandite), responsabili dell'ambiente alcalino:

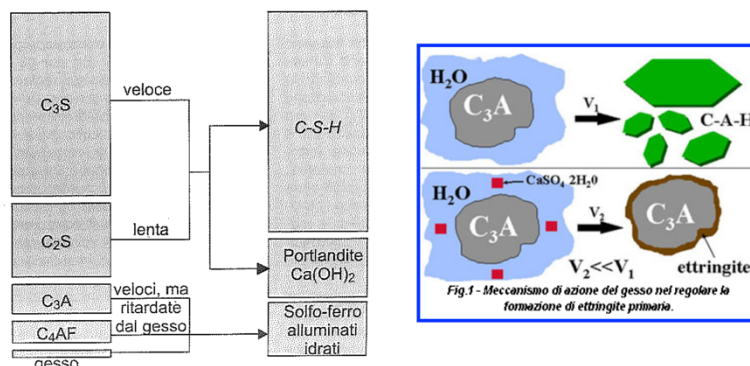
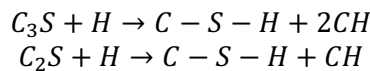


Grafico 3: schema reazioni

Tabella 29: Calori di idratazione, resistenze meccaniche e sviluppo resistenza nel tempo

Composizione approssimata	3CaO-SiO ₂	2CaO-SiO ₂	3CaO-Al ₂ O ₃	4CaO-Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃
Formula abbreviata	C ₃ S	βC ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Nome comune	Alite	Belite	Celite	Fase ferrica
Principali impurezze	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	SiO ₂ , MgO, alcali	SiO, Al ₂ O ₃
Forma cristallina	Monoclina	Monoclina	Cubica, ortorombica	Ortorombica
Percentuale:				
- intervallo	35-65	10-40	0-15	5-15
- media	50	25	8	8
Velocità di reazione con l'acqua	Media	Bassa	Elevata	Media
Contributo alla resist. meccanica:				
- fasi iniziali	Buono	Scarso	Buono	Buono
- finale	Buono	Eccellente	Medio	Medio
Calore idratazione:				
- val. tipico (kJ/kg)	500	250	1000	400

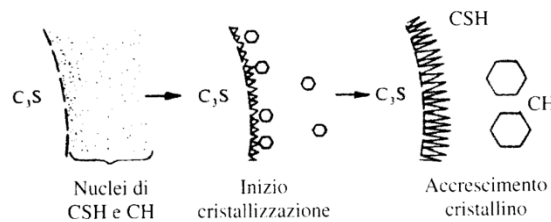


Figura 65: schematizzazione granulo C3S

La produzione progressiva di C – S – H e CH porta ad un aumento di volume della fase solida che va ad occupare progressivamente la zona occupata dall'acqua, provocando quindi una riduzione di porosità come illustrato in Figura 66:

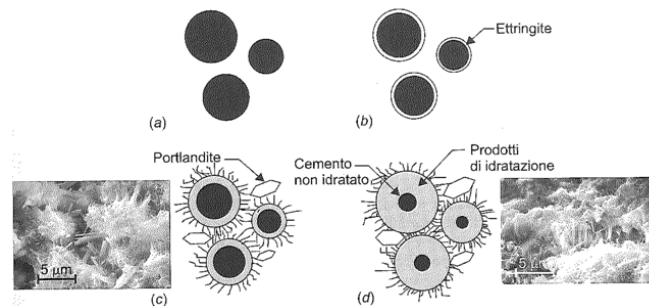


Figura 66: schema idratazione cemento

Va sottolineato che sono i silicati i maggiori responsabili dello sviluppo della resistenza meccanica come si può notare anche dalla Figura 67.

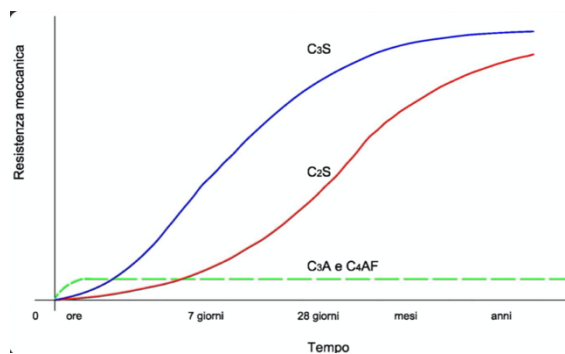


Figura 67: sviluppo resistenza meccanica nel tempo

Metodi di miglioramento delle prestazioni degli aggregati riciclati

Come è stato osservato, le proprietà degli RCA sono generalmente più variabili, e talvolta peggiori, dei relativi NCA. Per questo nel corso degli ultimi anni sono state sviluppate diverse tecniche che permettono il miglioramento e la consolidazione delle loro proprietà.

I metodi illustrati nel seguito sono stati riassunti da Wang et al. [128] e riportano che Shi et al. [129] hanno concluso che esistono due metodi principali per migliorare le sue proprietà, vale a dire:

- rimuovere la malta aderente;
- migliorare la malta aderente.

L'approccio di rimozione della malta aderente comprende i principali trattamenti di:

- frantumazione meccanica [130];
È il metodo più comune e a basso costo per rimuovere efficacemente la malta aderente e migliorare quindi le proprietà dell'RCA. La Figura 68 mostra un'immagine tipica del trattamento meccanico [131] [132]. Tale trattamento induce inevitabilmente un certo numero di micro-crepe nell'RCA, le quali influiscono talvolta negativamente sulle proprietà dell'RCA stesso e del RAC preparato con quest'ultimo [133].

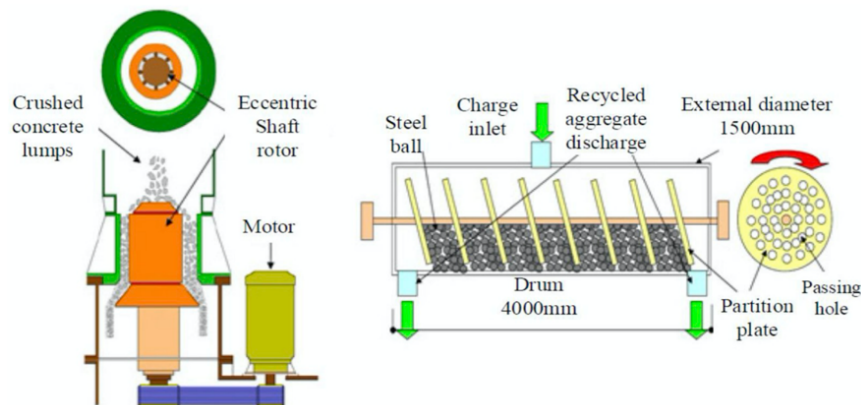


Figura 68: trattamento meccanico [131] [132]

- pulizia a ultrasuoni;
la pulizia a ultrasuoni non distacca completamente le parti di malta aderente attaccate saldamente e richiede un consumo elevato di energia [129]
- riscaldamento tradizionale [134]
- riscaldamento a microonde [60]
- immersione in soluzione acida [135]
I rifiuti liquidi generati dall'utilizzo di HCl e H_2SO_4 sono dannosi per l'ambiente [129] [60] [136]

I principali trattamenti per il miglioramento della malta aderente invece comprendono l'utilizzo di:

- materiali pozzolanici [105]
Tra i materiali pozzolanici più utilizzati ricordiamo le ceneri volanti (FA), i fumi di silice (SF), le scorie di altoforno e la nanosilice [137] [138] [139]. I nanocalcari invece non sono ottimi per la riduzione delle fratture della ITZ per via della loro bassa dispersione.
La Figura 69 presenta la microstruttura dell'RCA prima e dopo il trattamento con materiali pozzolanici, dimostrando che questo trattamento rende la malta aderente più densa e con proprietà dell'ITZ migliori [129] [140].

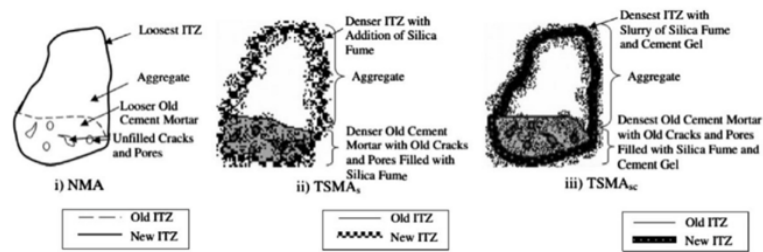


Figura 69: microstruttura dell'RCA prima e dopo il trattamento pozzolanico [129] [140]

- polimeri [141]
Alcuni polimeri a base silconica tuttavia possono reagire con l'RCA formando un film idrofobico sulla superficie, indebolendo così il legame tra RCA e matrice cementizia e producendo liquidi dannosi per l'ambiente durante il trattamento [142]
- calcio tramite biodeposizione [143] o tramite carbonatazione con CO_2 [144]
- soluzioni di silicato di sodio [145]

I trattamenti elencati ricoprono la superficie dell'RCA con un film diminuendone la porosità e l'assorbimento d'acqua. Vi sono inoltre metodi di mix alternativi che possono migliorare le ITZ e ridurre la porosità formando, oltre che un rivestimento pozzolanico nel caso si utilizzassero materiali pozzolanici, anche un rivestimento cementizio a basso rapporto w/c sulla superficie dell'RCA. Queste metodologie sono [105] [146] [147] [148] [149] [150] [151] [152] [153] [154]:

- il metodo di mix in due stadi (TSMa);
- il metodo di miscelazione doppia (DM);
- il metodo di miscelazione tripla (TM)
- l'approccio di mix della malta (MMA);
- l'approccio di mix nella sabbia (SEMA);
- il metodo di miscelazione tripla ottimizzato (OTM).

La Tabella 30 e la Tabella 31 riassumono le caratteristiche, i vantaggi e gli svantaggi dei vari metodi di miglioramento per RCA.

Tabella 30: Metodi per il miglioramento degli RCA e loro effetti [128]

Modification mechanism	Treatment techniques	Characteristics
Removing adhered old mortar	Mechanical treatment	<ul style="list-style-type: none"> ● Need special devise ● Increasing energy consumption
	Microwave treatment	<ul style="list-style-type: none"> ● Increase CO_2 emission ● Time-consuming ● Inconvenient on a large scale
	Heating treatment	<ul style="list-style-type: none"> ● Increase energy consumption ● Time-consuming ● Inconvenient on a large scale
	Pre-soaking in acid solution	<ul style="list-style-type: none"> ● High cost ● Introduce detrimental ions ● Need to dispose of waste acids
Enhancing adhered old mortar	Polymer treatment	<ul style="list-style-type: none"> ● Cost-intensive ● Time-consuming ● Need to dispose of waste solution ● Inconvenient on a large scale
	Pozzolanic materials Calcium bio-deposition	<ul style="list-style-type: none"> ● Time-consuming ● Time-consuming ● Need special devise ● Inconvenient for reinforced concrete
	Sodium silicate solution	<ul style="list-style-type: none"> ● Cost-intensive ● Increase alkali-silica reaction risk

Tabella 31: ulteriori metodi di miglioramento degli RCA [128]

Enhancement methods		Principle	Advantages	Disadvantages
Removal of attached mortar in RCA	Heat treatment	Remove the attached mortar by generating thermal stress difference	<ul style="list-style-type: none"> Reduce the width and length of cracks in the old ITZ and the pore size of attached mortar Enhance the bonding between RCA and the new cement paste 	<ul style="list-style-type: none"> The pore size of RCA increases after 350 °C Emissions of CO₂
	Ultrasonic cleaning	Remove weak attached mortar on the RCA surface and weak attached mortar with water	<ul style="list-style-type: none"> Enhance the bonding between RCA and the new cement paste Increase compressive strength of RAC 	<ul style="list-style-type: none"> Energy consumption and water waste Hard to remove strong attached mortar
	Pre-soaking in acid	Remove the attached mortar on the RCA surface and attached mortar	<ul style="list-style-type: none"> Reduce the width and length of cracks in the old ITZ and the pore size of attached mortar Enhance the compactness of new ITZ Waste solution of CH₃COOH can store CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> High concentrations (0.8 mol) of acid increase the porosity of RCA Waste solution of HCl and H₂SO₄ causes environmental problems
Surface coating on RCA	Pozzolanic materials	Pozzolan reaction with Ca(OH) ₂ to form new hydration products	<ul style="list-style-type: none"> Reduce the porosity of RCA and make ITZs dense and strong Improve the durability and mechanical properties of RAC Conducive to waste disposal 	<ul style="list-style-type: none"> Nanoparticles cannot reduce the width of old ITZ
	Polymer emulsion	The polymer emulsion coats the surface of RCA and fills the pores	<ul style="list-style-type: none"> Fill the pores in the RCA and dense the microstructure PVA can enhance the bonding between the new cement paste and CRCA 	<ul style="list-style-type: none"> Silicon-based polymers weak the bonding between CRCA and the new cement paste Waste solution causes environmental problems
Different mixing methods CaCO ₃ precipitation	Different mixing methods	Pre-mix RCA with a coating on its surface	<ul style="list-style-type: none"> Fill the pores in the RCA and dense the microstructure of RAC Make ITZs dense and strong Improve the mechanical properties and durability of RAC 	<ul style="list-style-type: none"> Limited properties improvement
	Calcium carbonate biodeposition	Bacteria precipitate CaCO ₃ in the pores of RAC, causing chemical reactions	<ul style="list-style-type: none"> CaCO₃ is used to fill pores of RCA Enhance the bonding between RCA and new cement paste Improve the quality and strength of RAC 	<ul style="list-style-type: none"> The quality of CaCO₃ is uncertain Increase the number of small pores
Different mixing methods	Carbonation	CO ₂ reacts with hydration products to form CaCO ₃	<ul style="list-style-type: none"> CaCO₃ is used to fill pores of RCA Make ITZs dense and strong Improve mechanical properties and durability of RAC Protect environment 	<ul style="list-style-type: none"> Ca(OH)₂ reaction is incomplete Increase the number of small pores

I metodi sopra menzionati sono stati studiati oltre che sugli RCA anche sui RAC che ne derivano. Perciò per evitare confusione si specifica che successivamente verranno chiamate:

- vecchia ITZ la zona di transizione tra l'aggregato vergine e la malta aderente;
- nuova ITZ la zona di transizione tra la malta aderente e la nuova matrice cementizia.

Tale distinzione è rappresentata nella precedente Figura 24.

Rimozione malta aderente

Trattamento termico

Lo stress dovuto alla differente conducibilità termica dell'aggregato naturale vergine e della malta aderente può provare il distacco di quest'ultima se l'aggregato viene portato ad elevate temperature [155]. Questo processo migliora il legame tra l'RCA e la nuova matrice cementizia, riducendo l'ampiezza e la lunghezza delle crepe nella vecchia ITZ, tra aggregato vergine e malta aderente residua, oltre che riduce la dimensione dei pori nelle parti di malta aderente residua [156].

Le emissioni di anidride carbonica derivanti dal consumo di energia di tale processo sono elevate e comprese generalmente tra $1,5 \text{ kg}_{CO_2}/t$ e $4,5 \text{ kg}_{CO_2}/t$ [157].

Al-Bayati et al. [158] hanno trattato termicamente un'RCA (4,75-19 mm) a 250, 350 e 500°C in un forno elettrico convenzionale per 1 ora.

La Figura 70 e la Figura 71 mostrano i risultati ottenuti: tra 0°C e 35 °C, la profondità e la lunghezza delle micro-crepe nella vecchia ITZ e la dimensione dei pori diminuiscono drasticamente con l'aumento della temperatura.

Dopo i 350°C questa tendenza rimane valida per le microfrazioni mentre invece le dimensioni dei pori aumentano drasticamente.

Sono state suggerite come temperature di trattamento ottimali 250°C, per ottenere una riduzione delle dimensioni delle microfrazioni, e 350°C, per ottenere un miglioramento della malta aderente [157].

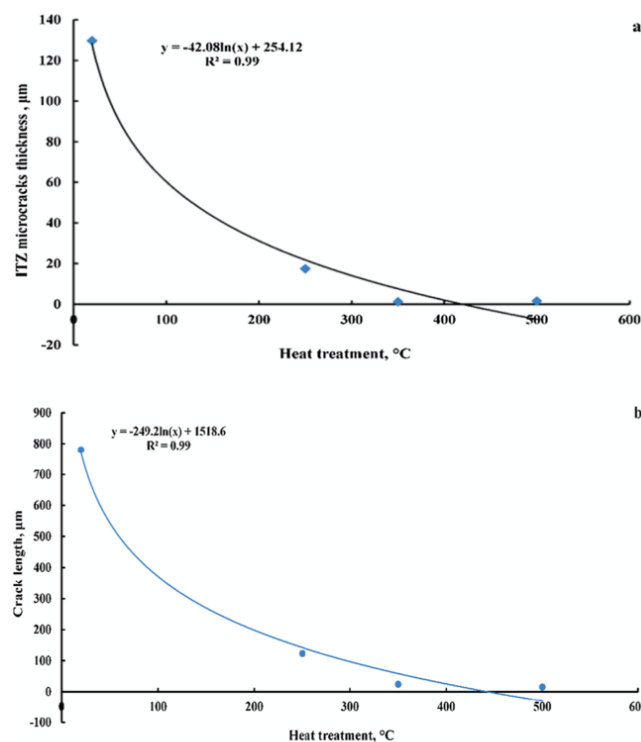


Figura 70: comportamento delle fratture della ITZ con il trattamento termico: a) larghezza b) lunghezza [158]

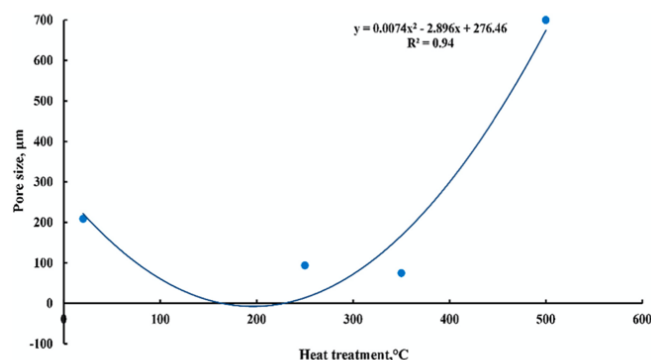


Figura 71: dimensioni pori dell'RCA con il trattamento termico [158]

Pulizia ultrasonica

La pulizia ultrasonica dell'RCA rimuove la malta aderente attaccata più debolmente migliorando quindi il legame tra RCA e la pasta cementizia.

Questo metodo tuttavia causa un elevato consumo di energia e spreco di acqua [159].

Katz [137] immerse l'RCA (4,75-19 mm) in un bagno ad ultrasuoni e lavò la superficie dell'aggregato con acqua per 10 minuti, ripetendo questa operazione fino all'ottenimento di acqua pulita.

I risultati ottenuti hanno mostrato che la malta aderente è stata ridotta e la resistenza a compressione del RAC è aumentata del 3% a 7 giorni e del 7% a 28 giorni.

Questi incrementi sono bassi perché il metodo non è in grado di rimuovere la malta aderente attaccata più saldamente [129].

Immersione in acidi

La malta aderente viene rimossa immergendo l'RCA in una soluzione acida.

Le reazioni tra l'acido e i prodotti di idratazione presenti nella malta aderente possono portare alla riduzione dello spessore e della lunghezza delle microfrazture presenti nella vecchia ITZ, oltre che ridurre la dimensione dei pori [160].

Gli acidi maggiormente usati sono: HCl e H_2SO_4 , che sono acidi forti, e $CH_3 - COOH$, che è un acido debole.

La soluzione di scarto di questi due acidi forti può produrre danni ambientali in caso di sversamento nell'ambiente. Nel caso dell'acido debole, il Ca^{2+} nella soluzione di scarto può immagazzinare CO_2 atmosferica [161].

Tam et al. [61] hanno trattato gli RCA (10 mm e 20 mm) immergendoli in una soluzione di HCl 0,1 molare per 24 ore a $20^\circ C$, lavandoli successivamente per rimuovere l'acido.

Altri due campioni di RCA uguali ai precedenti sono stati immersi in altre due soluzioni acide di H_2SO_4 e H_3PO_4 con una concentrazione 0,1 molare seguendo il metodo sopra descritto.

La micrografia SEM ha mostrato che l'ITZ dopo il trattamento (Figura 73, Figura 74, Figura 75) è più densa di quella prima del trattamento (Figura 72) poiché è stata rimossa la malta aderente.

Il risultato è coerente con la conclusione di Kazemian et al. [162] i quali hanno immerso l'RCA (4,75-19 mm) in una soluzione di HCl 0,1 molare e hanno riscontrato gli stessi effetti.

È stato osservato inoltre che porosità superficiale dell'RCA non aumenta a causa della bassa concentrazione di HCl .

Kim et al. [163] hanno immerso l'RCA (5–20 mm) in una soluzione di HCl per 48 ore con un rapporto aggregato-soluzione di 1:4,5. La riduzione della porosità dell'RCA ha migliorato la resistenza alla compressione e la durata del RAC rendendolo adatto per utilizzi strutturali.

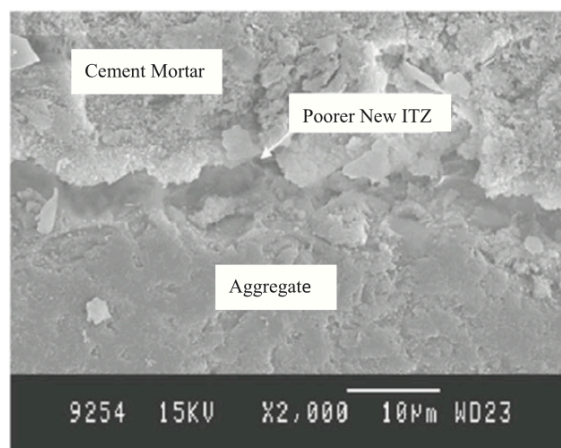


Figura 72: ITZ pre-trattamento [61]

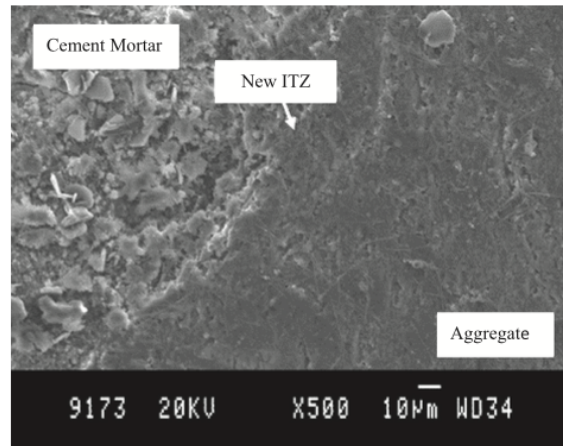


Figura 73: post-trattamento con HCl [61]

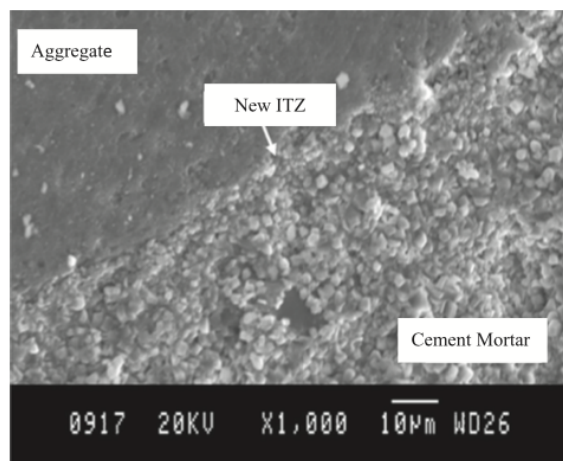


Figura 74: post-trattamento con H_2SO_4 [61]

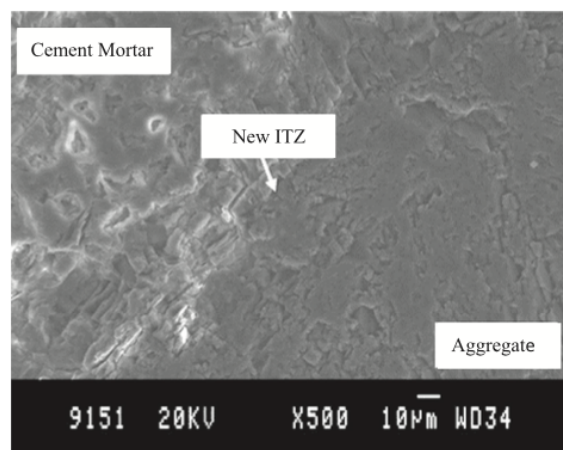


Figura 75: trattamento con H_3PO_4 [61]

Ismail et al. [160] hanno confrontato l'effetto delle diverse concentrazioni delle soluzioni di HCl sulla superficie dell'RCA (10–14 mm). Sulla base del metodo proposto da Tam et al. [61], hanno preparato tre soluzioni con concentrazioni 0,1, 0,5 e 0,8 molare. Hanno immerso lo stesso tipo di RCA nelle tre soluzioni per 1 giorno e hanno osservato che le tre soluzioni riducevano il quantitativo di malta aderente, ma la soluzione di HCl 0,8 molare erodeva la superficie dell'RCA a causa della sua alta concentrazione, aumentandone la porosità; pertanto essi raccomandano di utilizzare al massimo una soluzione 0,5 molare nel trattamento degli RCA.

Trattando l'RCA con la soluzione di HCl 0,5 molare e utilizzandolo con un grado di sostituzione del 60% nel RAC, i miglioramenti della ITZ hanno portato ad una maggiore durabilità del calcestruzzo.

Tale miglioramento rende l'RCA adatto per la produzione di calcestruzzo strutturale senza protezione contro la corrosione delle armature metalliche [164].

Al-bayati et al. [158] hanno studiato l'effetto dell'acidità della soluzione sulla microstruttura dell'RCA (4,75-19 mm) utilizzando il metodo dell'immersione in acidi. La soluzione acida 0,1 molare, composta da HCl (37%) e CH_3COOH (99,7%) ha indicato che entrambi gli acidi possono ridurre l'ampiezza e la lunghezza delle microfrazioni dell'ITZ, oltre che le dimensioni dei pori sulla superficie della malta (Tabella 32). In particolare, CH_3COOH ha ridotto meglio l'ampiezza e la lunghezza delle microfrazioni, mentre HCl ha ridotto meglio la dimensione dei pori della malta.

Tabella 32: dimensioni microfrazioni ITZ e dimensione pori con o senza trattamento [158]

CRCA treatment/ property	Microcrack width (μm)	Microcrack length (μm)	Pore size (μm)
CRCA untreated	129.70	780	208.9
CRCA soaking in HCl	5.29	209.1	139.9
CRCA soaking in CH_3COOH	1.93	28.8	156.1

Miglioramento della malta aderente

Miglioramento con materiali pozzolanici

Lo slurry pozzolanico può formare un rivestimento sulla superficie dell'RCA migliorandone le proprietà.

Materiali pozzolanici, come FA, scorie di altiforni, SF e metakaolino possono reagire con $Ca(OH)_2$ per generare $C - S - H$, riducendo efficacemente la porosità e rendendo densa l'ITZ [105] [165].

I materiali pozzolanici sono sottoprodotti industriali e il loro utilizzo riduce il problema dello smaltimento dei rifiuti.

Katz [137] ha studiato l'effetto del rivestimento di SF sulla microstruttura dei RAC immergendo l'RCA (4,75-19 mm) in una soluzione di SF pesante al 10%.

Il risultato ha confermato ciò che è stato preventivamente detto, mostrando che la SF ha reagito con $Ca(OH)_2$ promuovendo l'idratazione del cemento e il riempimento dei pori, riducendo la malta aderente attaccata debolmente alla superficie e migliorando il legame tra RCA e nuova pasta cementizia.

Questa scoperta concorda con la conclusione di Tam et al. [140] i quali hanno utilizzato il metodo di miscelazione a due stadi (TSMA) per rivestire la superficie dell'RCA (20 mm) con SF (2% in peso sul cemento), riducendo in tal modo le microfrazioni del RAC e densificando le ITZ.

Li et al. [138] hanno scoperto che la miscelazione di scorie di FA, SF e scorie di altiforni sull'RCA (5-31,5 mm) possono rendere densa la struttura della ITZ.

Le nanoparticelle non solo fungono da filler per realizzare una microstruttura densa, ma promuovono ulteriormente l'idratazione del cemento. NS e NL sono le nanoparticelle più comunemente usate.

La dimensione di NS è nel range 1– 50 nm, adatta per il riempimento dei pori dell'RCA e per promuovere la reazione pozzolanica, e la dimensione di NL è nel range 15– 80 nm, adatta principalmente per il riempimento dei pori [166].

Li et al. [139] hanno coperto la superficie dell'RCA (5–26,5 mm con un grado di sostituzione del 30%) con liquami di NS nell'ordine dell'1-2% in peso sul cemento (8-15 nm) e liquami di NL nell'ordine dell'1-2% in peso sul cemento (15–40 nm) con il metodo TSMA. I RAC ottenuti sono stati denominati rispettivamente NS-RAC e NL-RAC.

Un RAC senza trattamento con queste nanoparticelle è stato usato come mix di controllo.

Le ITZ dei tre RAC sono mostrate in Figura 76. La Figura 76 (a) mostra evidenti crepe nelle ITZ. La Figura 76 (b) mostra che nella ITZ rimangono poche crepe e la Figura 76 (c) mostra ancora crepe nella ITZ, indicando che NS è più efficace della NL. La NS colloidale può entrare nell'ITZ più facilmente della NL in polvere, provocando così una reazione che produce più $C - S - H$, riempiendo crepe, pori e migliorando la microstruttura e le prestazioni meccaniche del RAC.

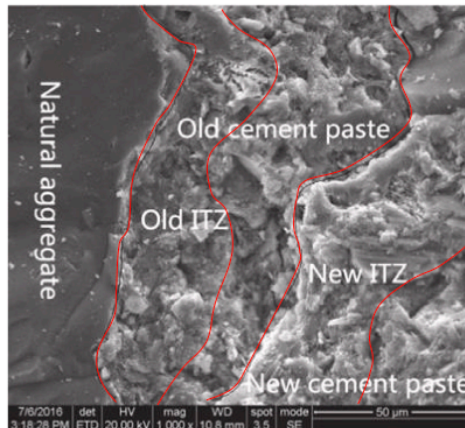
L'aggiunta di un superplasticizzatore può aumentare la dispersione di NL [139].

Inoltre, le nanoparticelle possono ridurre lo spessore dell'ITZ così trattata.

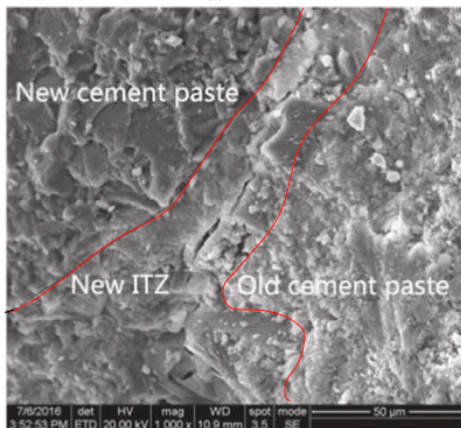
Zhang et al. [167] hanno imbevuto l'RCA (5–35 mm) in una soluzione contenente il 5% NS e il 3% NL per 45 minuti e hanno confrontato lo spessore delle ITZ del RAC a 3 giorni e 28 giorni. Hanno scoperto che lo spessore della vecchia ITZ (40 μm) non cambia, mentre lo spessore della nuova ITZ si è ridotto da 60 μm a 50 μm .

Questo perché le nanoparticelle utilizzate non riescono a penetrare nella vecchia ITZ.

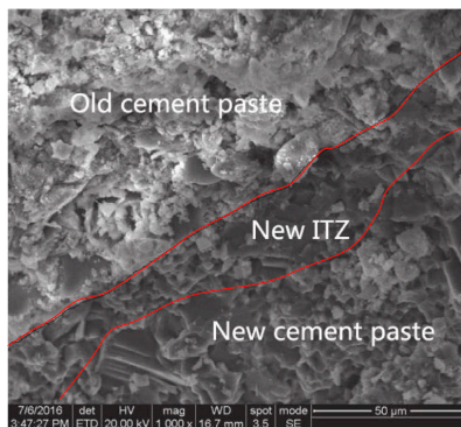
Shaikh et al. [168] hanno usato due metodi per aggiungere la NS (25 nm) nel RAC (grado sostituzione del 100%): pre-immergendo l'RCA nella soluzione NS al 2% e aggiungendo direttamente la soluzione di NS al 2% all'impasto fresco del RAC. Il risultato ha mostrato che la porosità del RAC confezionato pre-immergendo l'RCA nella soluzione di NS è inferiore del 30% circa rispetto a quella ottenuta miscelando la soluzione all'impasto. Il motivo è che immergendo l'RCA prima della miscelazione si ha lo sviluppo di una reazione pozzolanica di NS con formazione di prodotti di idratazione in anticipo.



(a) RAC



(b) NL-RAC



(c) NS-RAC

Figura 76: microstruttura dei RAC trattati [139]

Differenti metodi di mix

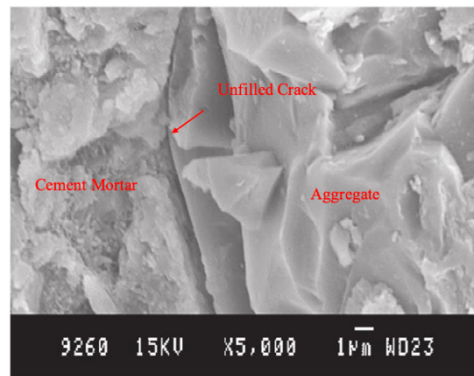
L'approccio di miscelazione normale (NMA) porta a un'idratazione incompleta del $Ca(OH)_2$ a causa dell'insufficienza di acqua, lasciando l'ITZ con molte crepe e pori. I metodi di miscelazione proposti in seguito possono portare alla formazione di un rivestimento cementizio a basso rapporto w/c sulla superficie dell'RCA, riducendo efficacemente le crepe e i pori, migliorando le ITZ e migliorando di conseguenza le proprietà meccaniche e di durabilità del RAC [149] [150].

Tali migliorie sono limitate se non si utilizzano materiali pozzolanici [146].

I metodi proposti sono: TSMA [148], TM [105], MMA [153], SEMA [153] e OTM [154].

Tam et al. [148] hanno confrontato le ITZ ottenute con il metodo TSMA con quelle ottenute con il metodo NMA.

L'NMA prevede l'aggiunta di tutti i materiali contemporaneamente e successivamente la loro miscelazione. Data la porosità dell'RCA, le microfrazioni non riempite permangono, come mostrato nella Figura 77 a).



(a) Unfilled crack in RCA using NMA

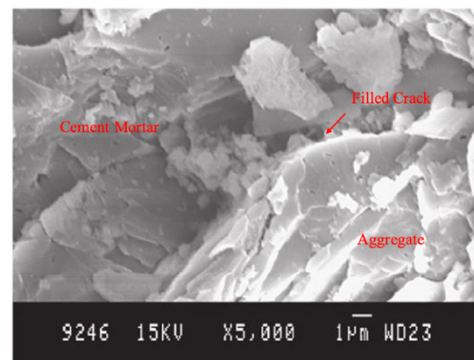


Figura 77: fratture nell'RCA utilizzando: a) NMA b) TSMA [148]

Con il metodo TSMA si produce il RAC in due fasi.

La prima fase è molto importante perché prevede di miscelare una certa porzione di acqua e cemento con l'RCA (20% 0–5 mm RCA, 40% 10 mm RCA e 40% 20 mm RCA), in modo da formare un sottile strato di malta cementizia sulla superficie degli RCA, con l'obiettivo di riempire pori e fratture (Figura 77 b)). Il metodo TSMA è stato utilizzato con grado di sostituzione compresi tra il 25% e il 40%, valori raccomandati per migliorare la microstruttura del RAC [151].

Li et al. [169] hanno studiato l'effetto dell'utilizzo dei metodi TSMA e NMA sulle ITZ dei RAC preparati con un grado di sostituzione del 100% di RCA. Rispetto all'NMA, il TSMA ha ridotto la porosità delle ITZ, ridotto la frazione volumica di $Ca(OH)_2$ ed ettringite, ha aumentato la frazione volumica di $C-S-H$ e ha di conseguenza densificato le ITZ. Quindi, la resistenza alla compressione del RAC è stata migliorata migliorando la microstruttura delle ITZ.

Otsuki et al. [147] hanno usato il doppio metodo di miscelazione (DM), simile al metodo TSMA, per ridurre localmente il rapporto w/c attorno all'RCA rispetto a quello della miscela (0,55). In confronto al metodo di miscelazione singolo, la microdurezza della nuova ITZ è aumentata in modo significativo.

Allo stesso modo, Ryu [170] ha trattato l'RCA con il metodo DM e ha scoperto che lo spessore della nuova ITZ è diminuito, il w/c del RAC è diminuito e la durabilità è aumentata di conseguenza per via della minore porosità.

L'aggiunta di materiali pozzolanici nella prima fase di miscelazione del metodo TSMA può favorire la formazione di uno strato di rivestimento pozzolanico sulla superficie dell'RCA, riempiendo così i pori e le crepe nelle ITZ, generando gel $C - S - H$ e $Ca(OH)_2$ non idratato, densificando le ITZ e aumentando l'influenza di queste ultime sulla microstruttura del RAC.

Tam et al. [140] hanno aggiunto SF sostituendo il 2% di cemento nella fase di premiscelazione e hanno proposto due metodi ottimizzati basati sul TSMA: $TSMA_s$ e $TSMA_{sc}$.

$TSMA_s$ in cui si aggiunge SF solo nella fase di premiscelazione.

$TSMA_{sc}$ in cui si aggiunge SF e una certa percentuale di cemento nella fase di premiscelazione. Quest'ultimo metodo riveste meglio l'aggregato rispetto all'utilizzo del primo metodo, come mostra la Figura 78.

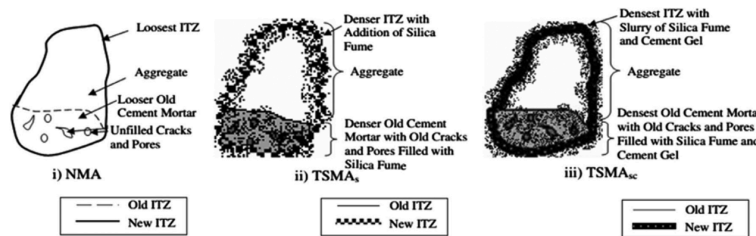


Figura 78: microstruttura del RAC dopo aver adottato i vari metodi [140]

Rajhans et al. [152] hanno proposto un metodo simile, basato sul TSMA, denominato $TSMA_{sfc}$, in cui è stata aggiunta nella prima fase della SF (sostituendo il 7% di FA), al fine di formare un rivestimento sulla superficie dell'RCA (5–20 mm), e nella seconda fase è stata aggiunta FA (34,78% del peso del cemento). Rispetto al TSMA tradizionale, le ITZ sono state ulteriormente densificate.

Questi risultati sono coerenti con quelli di Liang et al. [153], i quali hanno mescolato la malta cementizia con una soluzione di silice per pretrattare la superficie dell'RCA, utilizzando i metodi MMA e SEMA, ottenendo un buon legame tra RCA e la nuova matrice cementizia.

Quando si usa il metodo TSMA o DM, le particelle che penetrano nei pori e nelle ITZ sono limitate e la reazione pozzolanica è incompleta.

Sulla base dei metodi sopra menzionati, Kong et al. [105] hanno proposto un metodo simile al TM per formare un rivestimento di FA e/o un rivestimento di scorie sulla superficie del RCA (5–20 mm). Rispetto ai metodi TSMA e DM, il metodo TM ha ulteriormente migliorato il riempimento dei pori e ha reso ancora più completa la reazione pozzolanica.

Zhang et al. [154] hanno utilizzato il metodo OTM per preparare un RAC (100% RCA grosso + 30% RFA). La differenza tra questo metodo e i metodi DM e TM è l'ordine in cui vengono aggiunti i materiali pozzolanici (SF e scorie), l'acqua e il superfluidificante. Come mostrato nel Grafico 4, la porosità delle ITZ preparate con il metodo OTM è la più bassa perché questo metodo provoca un'alta dispersione del materiale pozzolanico.

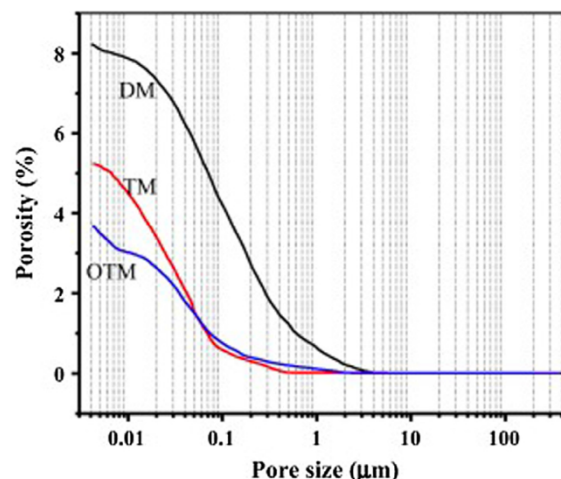


Grafico 4: porosità del RAC ottenuta con i diversi metodi [154]

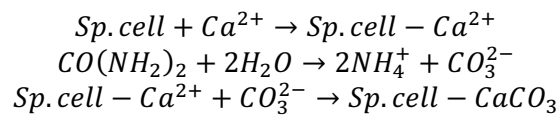
Precipitazione di carbonato di calcio

Biodeposizione di carbonato di calcio

La biodeposizione di $CaCO_3$ avviene coltivando specifici batteri aventi la capacità di far precipitare il $CaCO_3$ sulla superficie dell'RCA [171]. Lo sviluppo di tali batteri avviene naturalmente nell'ambiente e non ne perturba lo stato [172].

Grabiec et al. [172] hanno inoculato dei batteri della specie *Sporosaracina pasteurii* in un terreno di coltura liquido contenente urea e l'hanno posto in un incubatore a 30°C per 24 ore. La soluzione risultante è stata poi versata in un contenitore contenente gli RCA asciutti (12-16 mm) ed è stata poi posta in forno a 78°C per 24 ore per avviare il processo di biodeposizione. I batteri *S. pasteurii* hanno attratto lo ione Ca^{2+} che ha reagito con lo ione CO_3^{2-} , fornito dall'idrolisi dell'urea, per formare $CaCO_3$, riempiendo i pori dell'RCA.

Il processo di biodeposizione avviene secondo le seguenti reazioni:

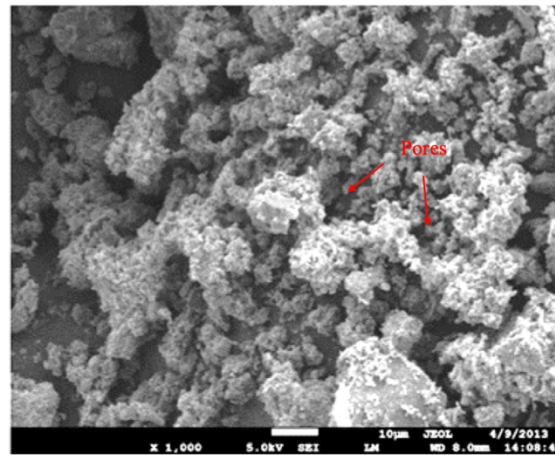


Questa scoperta è coerente con il risultato conseguito da Qiu et al. [173], i quali hanno diluito i batteri *S. pasteurii* a una concentrazione di 108 cellule/mL in un terreno di coltura liquido contenente $CaCl_2$ (16,8 g/L) e urea (20 g/L). L'idrossido di sodio (soluzione 1 N) è stato utilizzato per regolare il pH a 9,5. L'RCA (15-20 mm), utilizzato in condizioni SSD, è stato immerso nel terreno di coltura per 3 giorni a 35°C. Come mostra la Figura 79 (a), la superficie dell'RCA non trattato ha molti pori, mentre la Figura 79 (b) mostra che la superficie dell'RCA trattato con precipitazione batterica ha molti cristalli sferici. La Tabella 33 in cui è riportata l'analisi EDX dell'RCA trattato e non trattato mostra che i cristalli di superficie sono composti da $CaCO_3$.

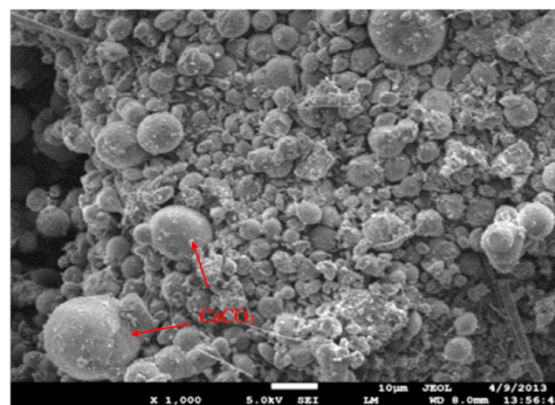
Tabella 33: analisi EDX dell'RCA trattato e non

Element	Weight (%)	
	Untreated RCA	MCP-treated RCA
Ca	3.41	29.37
Si	28.92	0.13
C	15.65	17.19
O	47.36	51.09
Others	3.66	2.22
Total	100.00	100.00

La quantità di $CaCO_3$ depositato ha raggiunto il massimo a pH=9,5 e tale quantità incrementa con l'incremento della concentrazione di Ca^{2+} , la concentrazione di batteri *S. pasteurii* e la temperatura.



(a) Untreated CRCA



(b) Bacterial precipitation-treated CRCA

Figura 79: micrografia SEM dell'RCA senza a) e con b) trattamento [173]

Wang et al. [143] utilizzarono per il trattamento dell'RCA (6,3 - 20 mm) alcuni batteri della specie *Bacillus Sphaericus* e MA. MA è un agglomerato misto riciclato composto da cemento frantumato, muratura, vetro e legno. Per prima cosa hanno coltivato per 24 ore i batteri su terreno sterile contenente lievito e urea; successivamente hanno coltivato l'aggregato su sul terreno per 24 ore. Il $CaCO_3$ prodotto funge da legante per migliorare il legame tra RCA e la matrice cementizia, oltre che per diminuire la dimensione e il volume dei pori, aumentando così la resistenza del RAC (Figura 80). Il numero di piccoli pori tuttavia è aumentato a causa del fatto che le dimensioni dei pori di dimensioni maggiori si sono ridotte e il $CaCO_3$ non ha potuto riempire i piccoli pori.

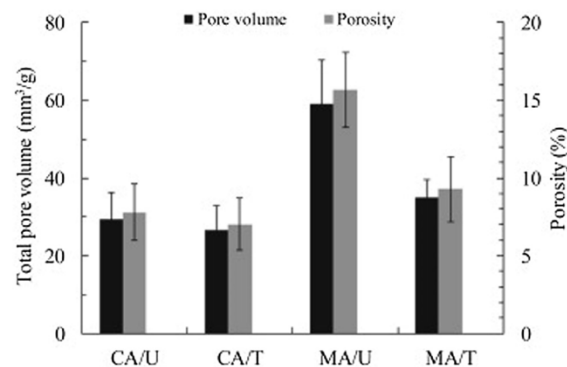


Figura 80: cambiamento di porosità (CA/U: RCA non trattato, CA/T: RCA trattato, MA/U: MA non trattato, MA/T: MA trattato) [143]

Il $CaCO_3$ precipitato dai batteri ha un effetto benefico anche sull'ITZ.

Zeng et al. [174] hanno attivato i batteri *S. pasteurii* iniettandoli in un terreno di coltura, lasciandoli a riposo per 3 giorni. L'RCA essiccato (10-20 mm) è stato posto in un altro terreno che conteneva *S. pasteurii* ed è stato conservato in un'incubatrice a 30°C per 1 giorno. Successivamente è stato posto in un terreno di coltura diverso, senza *S. pasteurii*, a 30°C per 6 giorni. È stato osservato che la micro-durezza della vecchia ITZ è aumentata dello 0,01%, mentre la microdurezza della nuova ITZ è aumentata del 17,39%. Pertanto, si può affermare che la maggior parte dei batteri viene assorbita in questa zona.

La biodeposizione di $CaCO_3$ è una tecnologia promettente per migliorare la microstruttura e la resistenza del RAC [175]. Attualmente non è ampiamente utilizzata ma la qualità del $CaCO_3$ prodotto dovrebbe essere ulteriormente studiata e migliorata [143].

Emulsione con polimeri

Le emulsioni polimeriche tipicamente utilizzate sono quelle di alcool polivinilico (PVA) e quelle con polimeri a base di silano [129], le quali, rivestendo la superficie dell'RCA, riducono la sua porosità migliorando la microstruttura del RAC. Anche in questo caso la soluzione di scarto dell'emulsione polimerica provoca inquinamento se dispersa in ambiente.

Il PVA è un polimero solubile in acqua che può essere utilizzato per ridurre il rapporto w/c e aumentare il legame della pasta cementizia con l'RCA [129]. Può essere adsorbito sulla superficie dell'RCA causando l'inattivazione dei siti di $Ca(OH)_2$, impedendone la formazione e aumentando la possibilità che venga sostituito da $C - S - H$ [176].

I polimeri a base di silicio includono silano, silossano o entrambi (Figura 81). Tali polimeri possono riempire i pori dell'RCA e reagire con $C - S - H$ per formare un film idrofobo sulla superficie di RCA [177]. L'aggiunta di silicato di sodio alle soluzioni di silano e silossano facilita l'idrolisi e compatta ulteriormente la microstruttura del RAC [142].

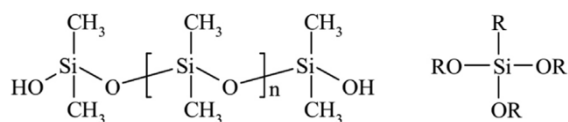


Figura 81: silossano e silano

Zhu et al. [142] hanno introdotto il silano nel RAC in due modi: applicando all'RCA (31,4% 10 mm RCA e 62,9% 20 mm RCA) una pasta a base di silano (100 g/m^2 e 200 g/m^2 rispettivamente) e miscelando la soluzione di silano direttamente all'impasto fresco del RAC (1% e 2% in peso sul cemento).

Hanno osservato che il legame tra RCA e nuova matrice cementizia si è indebolito, probabilmente a causa della formazione del film idrofobo sulla superficie dell'RCA.

Santos et al. [178] hanno osservato che quando l'RCA (4,75 - 9,52 mm) viene immerso in un'emulsione di silano al 20% per 24 ore si riducono pori con dimensioni al di sotto dei 100 nm.

Trattamento con anidride carbonica

I metodi di miglioramento delle proprietà degli RCA con l'utilizzo di anidride carbonica, illustrati nel seguito, sono stati proposti da Liang et al. [144] e ben riassumono le diverse modalità con cui è possibile effettuare il trattamento. Inoltre, tale pubblicazione fornisce anche un ottimo quadro delle reazioni alla base del processo di trattamento e di miglioramento di tali proprietà.

Il trattamento con la CO_2 è stato sviluppato per compensare le emissioni dovute al settore delle costruzioni in quanto tale settore è il maggiore emettitore di CO_2 e il maggiore consumatore di energia. Questa tecnologia di trattamento permette infatti all'aggregato di assorbire tale gas.

Le emissioni del settore delle costruzioni rappresentano fino al 45% di quelle globali, e, per quanto riguarda l'energia consumata, essa rappresenta il 40% del totale globalmente consumato [179].

La Figura 82 mostra un'immagine schematica dell'RCA e del CRA.

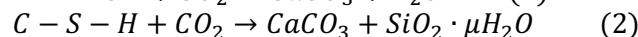
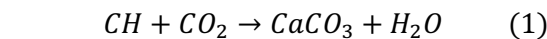


Figura 82: immagine schematica di RA e CRA [144]

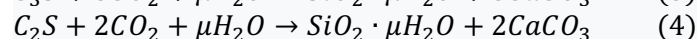
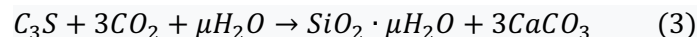
Meccanismo di trattamento con la CO_2 : metodo e fattori influenzanti

Meccanismo di miglioramento con la CO_2

Quando il cemento e/o il calcestruzzo sono esposti alla CO_2 , il gas penetra in essi principalmente attraverso la rete di pori e crepe reagendo con i prodotti di idratazione primari con conseguente produzione di $CaCO_3$ e gel di silice, come mostrato in Eq. (1), (2) [180].



Inoltre, il clinker non idratato, contenente il silicato tricalcico (C_3S) e il silicato bicalcico (C_2S), può ulteriormente reagire con la CO_2 , come mostrato nelle Eq. (3), (4) [181]. Poiché il $CaCO_3$ ha una durezza e un volume in fase solida superiori rispetto al $C - S - H$ e al CH , aumenta la resistenza della pasta cementizia nel primo periodo della reazione di carbonatazione e provoca un ulteriore aumento di resistenza nel successivo periodo [182].



La reazione di carbonatazione si verifica in particolare nella vecchia malta aderente.

Il volume in fase solida dei materiali cementizi dopo la carbonatazione è all'incirca dell'11-12% superiore a quello dei materiali precedenti alla carbonatazione [183] [184].

Il prodotto della reazione può ben riempire i pori della vecchia malta aderente, della ITZ, e aumentare nel frattempo anche la densità dell'RCA ricoprendone la superficie e migliorandone quindi le proprietà [185].

Maturazione con la tecnologia della CO_2

Il volume di CO_2 nell'aria è circa dello 0,04%, quindi, essendo molto modesto, rende la reazione di carbonatazione naturale piuttosto lenta.

Il coefficiente di diffusione della CO_2 nel calcestruzzo è circa $10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ [186].

I risultati conseguiti hanno mostrato che le profondità naturali di carbonatazione del calcestruzzo di classe C30 dopo 20 anni e 80 anni erano rispettivamente di soli 10 mm e 20 mm [187].

Il processo di carbonatazione accelerata è stato sviluppato per ovviare a tale problema.

Esso viene condotto aumentando la concentrazione di CO_2 , l'umidità relativa (RH) e la temperatura. Esiste una buona correlazione tra la carbonatazione normale e la carbonatazione accelerata del calcestruzzo [188].

La tecnologia di carbonatazione accelerata con CO_2 è stata sviluppata negli ultimi anni e può garantire che l'RCA sia rapidamente carbonatato in alcune ore [146].

Esistono quattro metodi principali di trattamento dell'RCA con CO_2 , ma i metodi di carbonatazione standard e carbonatazione pressurizzata sono le tecniche più comuni.

Metodo di carbonatazione standard

Il metodo di carbonatazione standard illustrato in [144] è stato impiegato sull'RCA in conformità con lo standard cinese GB50082-2009 (Figura 83) [189].

I campioni di RCA erano stati collocati nella camera di carbonatazione in cui la temperatura era pari a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, la RH pari $70 \pm 5\%$ a e la concentrazione di CO_2 pari a $20 \pm 3\%$. La CO_2 è stata mantenuta a pressione ambiente e, in questo caso, la penetrazione della CO_2 nell'RCA avveniva a bassa velocità, il che significava efficienza bassa e tempo di contatto che doveva e poteva essere prolungato.

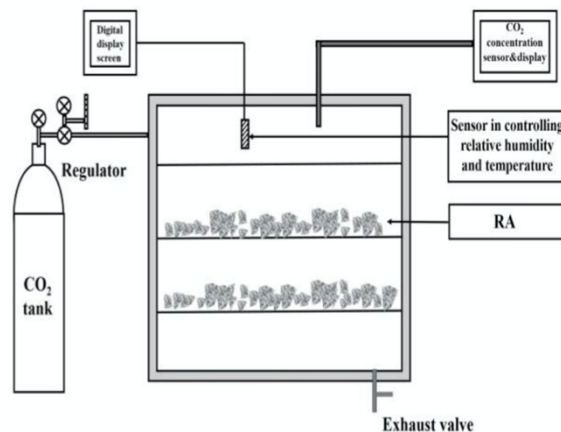


Figura 83: metodo di carbonatazione standard [189]

Metodo di carbonatazione pressurizzata

Per migliorare ulteriormente l'efficienza, è stata sviluppata la tecnologia di carbonatazione in pressione che fonda il suo principio sull'aumento della pressione della CO_2 .

La Figura 84 mostra un'apparecchiatura tipica utilizzata [190].

L'RCA è prima asciugato in un'apposita camera fino ad un livello di umidità prefissato, poi successivamente viene collocato in un'altra camera in cui RH e temperatura sono rispettivamente pari a $50 \pm 5\%$ e $25 \pm 3^\circ C$.

Prima dell'iniezione della CO_2 , la cui pressione viene mantenuta costante attraverso un apposito regolatore, viene utilizzata una pompa a vuoto per ridurre la pressione nella camera a 0,6 Bar.

Dopo l'immissione del gas, la pressione della CO_2 nella camera è maggiore di quella interna all'aggregato, perciò la CO_2 penetra facilmente incrementando l'efficienza rispetto al metodo standard.

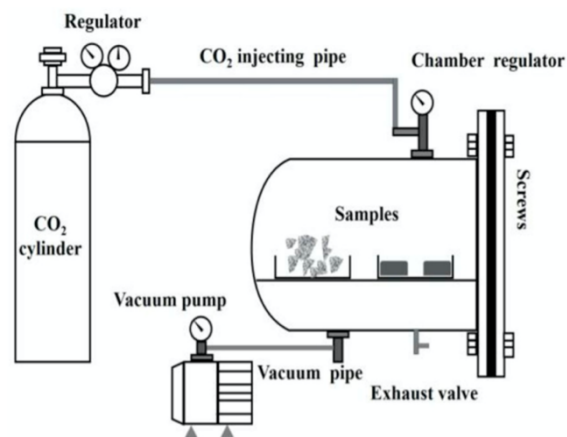


Figura 84: equipaggiamento carbonatazione pressurizzata [190]

Maturazione tramite flusso di CO_2

Questo metodo è stato sviluppato per aumentare ulteriormente l'efficienza di processo del trattamento, oltre ad avere il vantaggio di richiedere un'energia inferiore al metodo standard.

In Figura 85 ne viene rappresentato l'equipaggiamento [191].

La miscela di CO_2 e aria viene iniettata da un lato della camera e scaricata dal suo lato opposto. Con l'esposizione al flusso di CO_2 , l'RCA può raggiungere un tasso di carbonatazione più alto. L'RH nella camera è regolata a $50 \pm 5\%$ tramite l'utilizzo di una soluzione satura di $Mg(NO_3)_2$ e la portata e la concentrazione di CO_2 sono rispettivamente pari a 5 L/min e 10%.

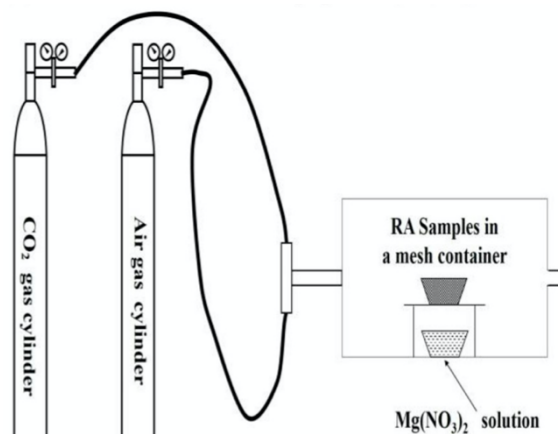


Figura 85: equipaggiamento per il trattamento tramite flusso di CO_2 [191]

Metodo di trattamento acqua- CO_2

Rispetto al trattamento con solo CO_2 , il trattamento acqua- CO_2 può migliorare ulteriormente l'efficienza di carbonatazione dell'RCA in quanto la reazione tra la CO_2 e lo ione Ca^{2+} è più completa [192].

Questo metodo è appropriato per la carbonatazione dell'aggregato fine riciclato e della polvere riciclata derivante dai rifiuti da C&D, e in Figura 86 sono mostrate le apparecchiature necessarie [193]. I campioni di RCA sono collocati in una camera contenente acqua in cui viene iniettata la miscela di CO_2 , O_2 e N_2 . L'efficienza del processo è maggiore in tali condizioni. Inoltre, le nano-bolle di CO_2 dissolvendosi nell'acqua aumentano ulteriormente l'efficienza del processo.

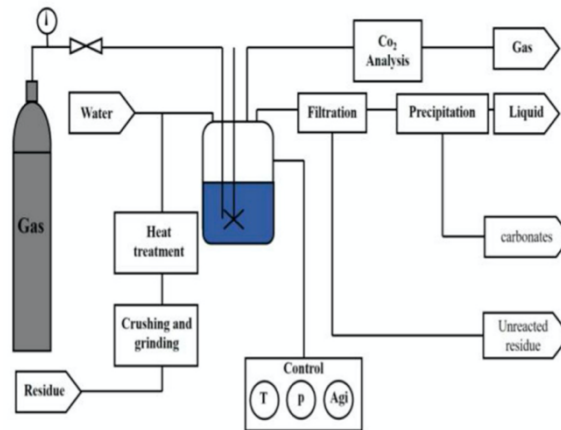


Figura 86: equipaggiamento per trattamento acqua- CO_2 [193]

Fattori impattanti sul trattamento con la CO_2

Effetti delle proprietà del materiale di origine sulle proprietà dell'RCA

Le proprietà dei materiali di origine hanno un impatto significativo sulle proprietà dell'RCA e del relativo CRA.

Generalmente, migliori proprietà dei materiali di origine determinano migliori proprietà degli RCA e CRA. Più si utilizzano materiali che hanno un'elevata resistenza, più aumenta la quantità di prodotti di idratazione che possono essere carbonatati. Tuttavia, la resistenza relativamente elevata dei materiali di origine porta ad un aumento della densità della malta aderente che può ridurre la capacità di penetrazione della CO_2 .

La Tabella 34 elenca le proprietà del CRA ottenuto da RCA con malta avente diverse caratteristiche meccaniche e fisiche. Rispetto ai materiali di base con bassa resistenza, Kou et al. [190], Li et al. [194] e Zhan et al. [195] hanno scoperto che i materiali di origine con elevata resistenza portano ad un aumento più significativo delle proprietà di CRA.

Tabella 34: proprietà di RCA e RAC ottenuti da calcestruzzi di varie resistenze [144]

Parent materials	Aggregate type	Apparent density (kg/m ³)	Water absorption (%)
Mortar with 55.6 MPa	RA	-	3.86
	CRA	-	3.16
Mortar with 37.5 MPa	RA	-	4.12
	CRA	-	3.67
Mortar with C40 strength	RA	2326	12.25
	CRA	2351	7.57
Mortar with C65 strength	RA	2355	10.81
	CRA	2371	4.84
Concrete with C30 strength	RA	2639	6.58
	CRA	2619	5.25
Concrete with C45 strength	RA	2623	5.98
	CRA	2606	4.71
Concrete with C60 strength	RA	2620	5.95
	CRA	2670	4.61
Concrete with C80 strength	RA	2602	5.81
	CRA	2661	4.41

Effetti della dimensione dell'RCA

I risultati delle precedenti indagini hanno mostrato che l'assorbimento di CO_2 è inversamente proporzionale alla dimensione degli aggregati [175].

Xuan et al. [196] hanno scoperto che l'assorbimento di CO_2 in aggregato con una dimensione inferiore a 5 mm è circa del 2,15%, mentre è dello 0,81% per aggregati con una dimensione di 5-10 mm.

Zhan et al. [197] sono giunti a una conclusione simile, ovvero che le percentuali di carbonatazione di RCA con una dimensione di 5-10 mm sono molto più alte di quelle con una dimensione di 14-20 mm.

Fang et al. [191] hanno inoltre scoperto che l'assorbimento di CO_2 in grani con dimensioni medie di 1,18 mm e 15 mm è rispettivamente di circa 54 g/kg e 27 g/kg. Questo perché al diminuire delle dimensioni degli aggregati la quantità di vecchia malta aderente aumenta e lo spessore della stessa diminuisce; pertanto, il tasso di carbonatazione di RCA con una dimensione ridotta è superiore a quello di RCA con una dimensione elevata [198], questo perché più è piccola la dimensione degli RCA, maggiore è la superficie specifica esposta alla CO_2 , e quindi è maggiore il tasso di carbonatazione [175].

La Tabella 35 elenca le proprietà di RCA e CRA di varie dimensioni granulometriche, presi da letteratura. Dall'osservazione della tabella e dalle considerazioni precedenti si può concludere che il trattamento con CO_2 di RCA con una dimensione più piccola porta a un miglioramento più significativo delle loro proprietà; per esempio, la diminuzione dell'assorbimento d'acqua e l'aumento della densità apparente sono più evidenti per dimensioni piccole dell'aggregato.

Tabella 35: WA e densità apparente di RCA e RAC di dimensione [144]

Aggregate types	(Water absorption, %)/(Apparent density, kg/m ³)								Reference
	Particle size (mm)								
	0.63–1.25	1.25–2.5	2.5–5	5–10	10–20	20–30	30–40	>40	
RA	9.37/-	7.79/-	7.12/-						[74]
CRA	6.27/-	5.57/-	5.25/-						
RA	12.3/2658			7.20/2624					[70]
CRA	9.0/2685			6.10/2660					
RA				7.52/2636					[75]
CRA				5.76/2700					
RA				6.95/-	6.78/-				[76]
CRA				4.76/-	4.52/-				
RA				12.25/2326	11.82/2326				[55]
CRA				7.57/2351	7.32/2345				
RA				10.81/2355	9.30/2355				
CRA				4.95/2378	4.84/2371				
RA				7.20/2624	6.10/2605				[77]
CRA				6.00/2663	5.00/2609				
RA				4.30/2470	5.40/2530				[78]
CRA				3.00/2590	4.20/2610				
RA				5.41/2473	4.32/2535				[79]
CRA				4.36/2592	3.67/2615				
RA						4.62/2635	4.60/2627	4.21/2610	[80]
CRA						3.14/2677	3.42/2651	3.80/2623	

Effetti di pretrattamento

Il miglioramento delle proprietà dell'RCA è dovuto principalmente alla produzione di $CaCO_3$ da parte della reazione di carbonatazione. Un'ulteriore aggiunta di ioni Ca^{2+} fornita da processi di pretrattamento può comportare una carbonatazione maggiore dell'RCA.

Zhan et al. [199] hanno presentato l'influenza dell'immersione in diverse soluzioni sul miglioramento delle proprietà del RAC e hanno scoperto che con l'immersione in $Ca(OH)_2$ si aveva il contenuto di polvere più basso, con l'immersione in $Ca(NO_3)_2$ si aveva il più basso valore di frantumazione e assorbimento d'acqua, e con l'immersione in $CaCl_2$ si aveva la massima resistenza alla compressione.

Pan et al. [161] hanno studiato gli effetti del trattamento con CO_2 sulle caratteristiche del RAC con e senza pre-immersione in $Ca(OH)_2$, e i risultati hanno mostrato che le proprietà con la pre-immersione erano migliori di quelle senza immersione. Una concentrazione appropriata di $Ca(OH)_2$ piuttosto che una concentrazione elevata è stata utile per migliorare le proprietà di RAC. Inoltre, le proprietà sono migliorate con l'aumentare dei cicli di pretrattamento con $Ca(OH)_2$ [195].

La Tabella 36 raccoglie le proprietà con vari metodi di pretrattamento.

Tabella 36: proprietà del RAC con vari pre-trattamenti [144]

Pretreatment method	Crushing value (%)	Water absorption (%)
Without pretreatment	18	4.35
Presoak by $CaCl_2$	11	1.77
Presoak by $Ca(OH)_2$	13	1.65
Presoak by $Ca(NO_3)_2$	10	1.53
Without pretreatment	19	3.75
0.01 mol/kg $Ca(OH)_2$	13	1.65
0.05 mol/kg $Ca(OH)_2$	14	2.00
0.25 mol/kg $Ca(OH)_2$	16	2.35
Without pretreatment	-	8.35
Presoak by $Ca(OH)_2$ -1 cycle	-	6.52
Presoak by $Ca(OH)_2$ -2 cycles	-	5.06
Presoak by $Ca(OH)_2$ -3 cycles	-	4.29

Effetti del contenuto d'acqua degli RCA

Il contenuto di acqua gioca un ruolo di primo piano nell'efficienza del processo, perché l'acqua dissolve la CO_2 e il Ca^{2+} contenuti nell'RCA e promuove la reazione di carbonatazione.

Tuttavia, esiste un contenuto d'acqua ottimale che non genera impatti negativi. Quando il contenuto di acqua scende al di sotto di tale contenuto, non c'è abbastanza acqua a partecipare alla reazione di carbonatazione, mentre di contro, un eccessivo contenuto d'acqua ostacola la penetrazione della CO_2 e riduce l'efficienza di carbonatazione.

Pan et al. [161] hanno osservato che l'assorbimento d'acqua del CRA diminuisce quando il contenuto di acqua dell'RCA passava dal 2,5% al 5,0%, mentre l'assorbimento di acqua del CRA aumentava quando il contenuto di acqua dell'RCA raggiungeva il 7,5%. Inoltre egli ha proposto un contenuto d'acqua ottimale del 5%, mentre Zhan et al. [200] hanno suggerito un contenuto d'acqua ottimale tra il 4% e il 6,5%.

Effetti della concentrazione di CO_2

La concentrazione di CO_2 è un fattore chiave.

Anche in questo caso esiste una concentrazione di CO_2 ottimale: quando tale concentrazione è inferiore al valore ottimale, l'efficienza di carbonatazione aumenta all'aumentare della concentrazione di CO_2 , mentre raggiunto il valore limite il miglioramento dell'efficienza di carbonatazione non può essere aumentato con un ulteriore aumento della concentrazione di CO_2 .

Kashef-Haghighi et al. [181] e Castellote [201] et al. hanno scoperto che l'aumento della concentrazione di CO_2 ha avuto un impatto trascurabile sulle percentuali di carbonatazione quando tale concentrazione era superiore al 20%. Inoltre, la percentuale di carbonatazione con una concentrazione di CO_2 del 100% era superiore solo del 9,1% rispetto a quella con concentrazione di CO_2 del 10%, dopo 24 ore dall'avvio del trattamento [166].

Pan et al. [161] hanno riscontrato un fenomeno simile: i valori di assorbimento d'acqua del CRA sottoposto a concentrazioni di CO_2 del 20%, 70% e 100% erano rispettivamente del 2,0%, 1,65% e 2,0%.

Questo risultato potrebbe essersi verificato perché le percentuali di carbonatazione sono controllate dal tasso di dissoluzione dei prodotti di idratazione e il $CaCO_3$ prodotto potrebbe inibire la penetrazione di CO_2 ; pertanto, un'eccessiva concentrazione di CO_2 è deleteria [181]. Le concentrazioni di CO_2 fino al 50% circa portano spesso a un'alta efficienza di carbonatazione [202]. Una concentrazione eccessiva del gas porta anche alla decalcificazione di $C - S - H$, e persino alla sua completa scomparsa nel caso di concentrazioni di CO_2 prossime al 100% [203].

La Figura 87 mostra l'effetto della concentrazione di CO_2 sull'efficienza di carbonatazione dell'RCA, evidenziando che una concentrazione ottimale risulta del 40-60% [191] [161].

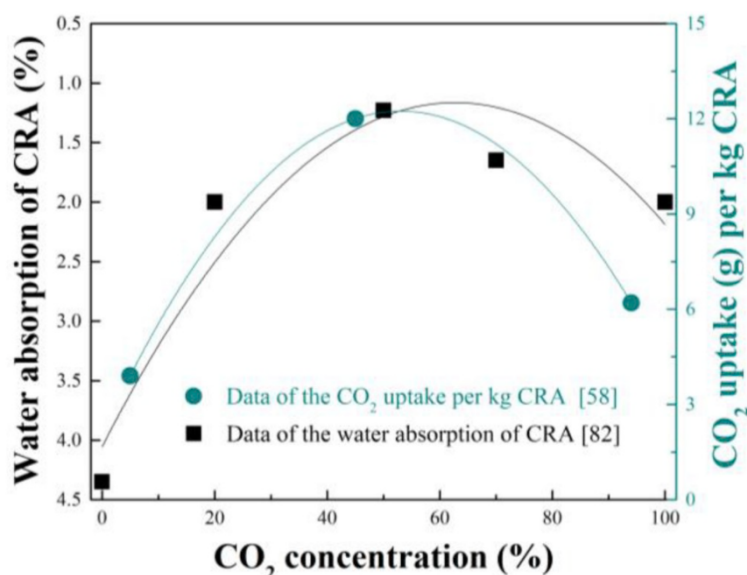


Figura 87: effetto della concentrazione di CO_2

Effetto della pressione della CO_2

La pressione della CO_2 ha un impatto evidente sull'efficienza di carbonatazione dell'RCA. Una pressione relativamente alta può migliorare l'assorbimento del gas all'interno dei materiali cementizi [181].

Fang et al. [191] hanno osservato che l'assorbimento di CO_2 con una pressione di 0,01 MPa è aumentato significativamente rispetto a quello senza pressione applicata e che la maturazione con CO_2 pressurizzata è più efficace per il miglioramento delle proprietà del RAC. Inoltre, si è osservato un ulteriore miglioramento dell'assorbimento quando la pressione è stata aumentata da 0,01 MPa a 0,5 MPa [146].

Tuttavia, la maggiore pressione non comporta un aumento significativo dell'efficienza di carbonatazione. Ad esempio, l'assorbimento d'acqua è diminuito quando la pressione è passata da 0 MPa a 0,5 MPa, ma è aumentato quando la pressione è passata da 0,5 MPa a 1,5 MPa [199].

Tang e Kou [204] hanno studiato ulteriormente gli effetti della pressione della CO_2 sulle proprietà dell'RCA dopo vari giorni di maturazione, e hanno riscontrato che valori di 0,1 Bar (0,01 MPa) sul CRA a 28 giorni di maturazione e di 0.5 Bar (0,05 MPa) sul CRA a 90 giorni di maturazione erano i più adatti per il miglioramento delle prestazioni del RAC in quanto si poteva osservare una riduzione significativa dell'assorbimento di acqua.

La Figura 88 mostra l'effetto della pressione di CO_2 sull'efficienza di carbonatazione del CRA [146] [191] [199]. Si può vedere come esista una pressione ottimale e una pressione eccessiva di CO_2 che è dannosa per le proprietà del CRA. Questo è dovuto al fatto che un'eccessiva pressione di CO_2 comporta la formazione di nuove crepe nella vecchia malta aderente, aumentando così la porosità e l'assorbimento d'acqua del CRA. Inoltre, è stato osservato che applicando una pressione troppo elevata si generano stress termici e prodotti simili al $CaCO_3$ ma con forma aghiforme, mentre, al contrario, quando si applicano basse pressioni si genera un prodotto simile ma con forma particellare [200] [205].

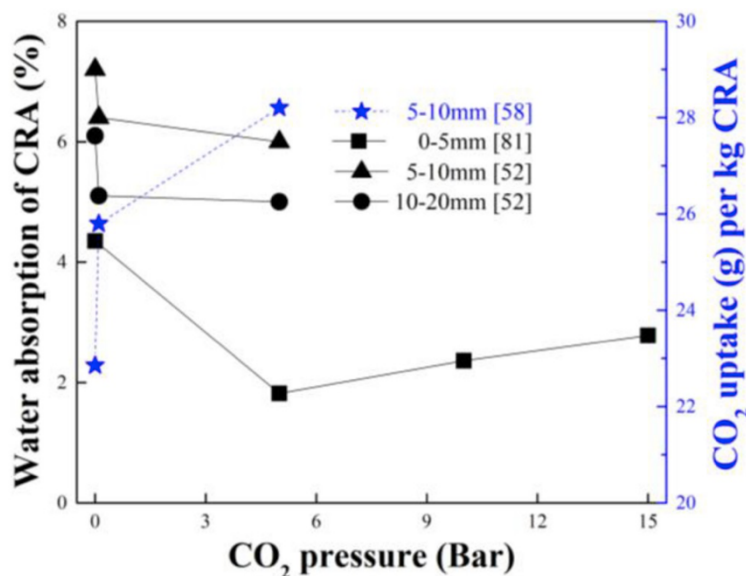


Figura 88: effetto della pressione della CO_2 [144]

Effetto del tempo, della temperatura e dell'RH sul processo di trattamento con CO_2

Generalmente, la percentuale di carbonatazione dell'RCA aumenta con l'aumentare del tempo di trattamento con la CO_2 , fino a quando l'aggregato non viene completamente carbonatato.

Zhan et al. [197] hanno osservato che la percentuale di carbonatazione è aumentata significativamente nelle prime 2 ore, in cui si è raggiunta una percentuale di carbonatazione del 25,06%, mentre si è passati al 28,47% tra le 2 e le 4 ore. L'effetto dei cicli di carbonatazione sulle proprietà dell'RCA con una dimensione piccola è più marcato di quello su RCA con una dimensione maggiore [190].

La Figura 89 mostra l'efficienza di carbonatazione a vari tempi di trattamento [191] [197]. Il miglioramento delle proprietà del CRA è significativo nella fase preliminare, mentre è più lento nella seconda fase; la massima efficienza è stata raggiunta quando il CRA è stato completamente carbonatato.

Temperature relativamente elevate determinano la lisciviazione degli ioni Ca^{2+} dai silicati e riducono la solubilità della CO_2 , portando ad un aumento del pH dell'acqua e una conseguente riduzione degli ioni Ca^{2+} disciolti [206]. Pertanto, la temperatura ha un'influenza significativa sul processo in esame.

Zhan et al. [199] hanno scoperto che il valore di frantumazione e l'assorbimento d'acqua del CRA sono leggermente diminuiti quando la temperatura è aumentata da 25 °C a 75 °C, passando rispettivamente dal 12% all'11% e dal 2,54% all'1,45%. Zhan et al. [200] hanno riferito che la percentuale di carbonatazione dell'RCA è aumentata dal 52,6% al 55,0% quando la temperatura è passata da 20 °C a 80 °C. Sebbene il calore della reazione di carbonatazione promuova la formazione di $CaCO_3$ metastabile, la reazione di carbonatazione dovrebbe essere mantenuta a bassa temperatura per formare la calcite più stabile.

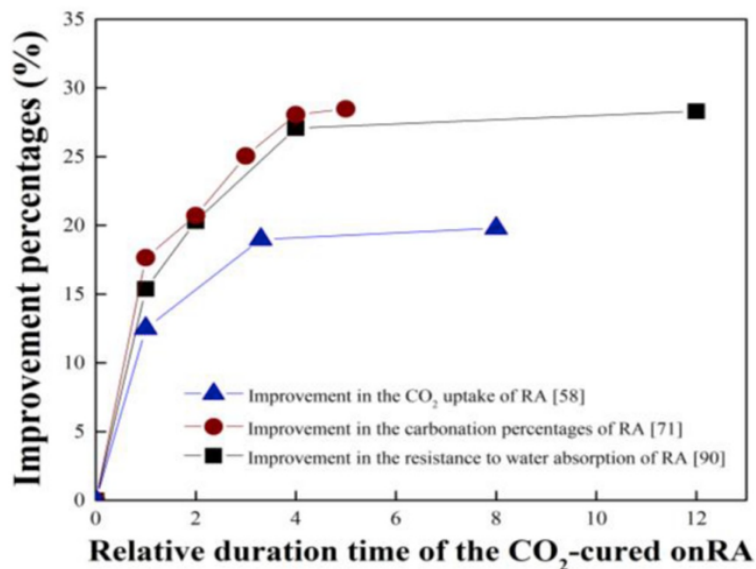


Figura 89: effetto del tempo di trattamento sull'efficienza del processo [144]

La Figura 90 mostra gli effetti dell'RH sull'efficienza di carbonatazione [197]. Si può vedere che esiste un RH ottimale compreso tra il 40% e il 70%: valori più bassi o più alti di questi hanno un impatto negativo sull'efficienza del processo. Questo è dovuto al fatto che la diffusione della CO_2 e la cinetica di reazione sono in conflitto tra loro.

Fang et al. [191] hanno scoperto che l'RH ottimale era vicino al 50% e Zhan et al. [197] [200] hanno osservato che l'efficienza del processo era eccellente quando l'umidità relativa era nel range 40-70%.

Questo risultato è stato spiegato con il fatto che l'RH ottimale ha determinato la carbonatazione rapida e la produzione di carbonato di calcio amorfo e monidrocaltite, mentre bassi valori di umidità relativa hanno dato luogo a una carbonatazione più lenta con la produzione di portlandite e vaterite nei materiali cementizi.

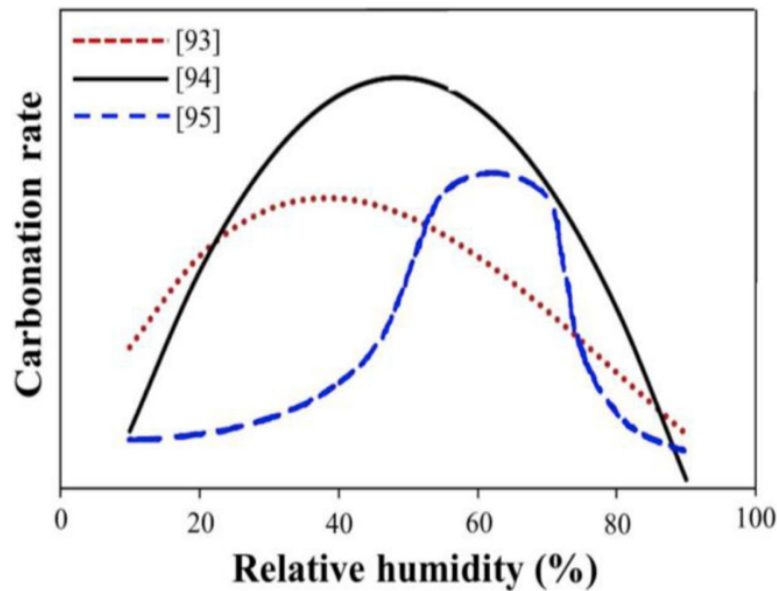


Figura 90: effetto dell'RH sull'efficienza del processo [144]

Assorbimento di CO_2 negli RCA

Durante l'intero ciclo di vita della struttura in calcestruzzo, solo una certa quantità di CO_2 può essere assorbita dalla reazione di carbonatazione naturale del calcestruzzo strutturale, mentre l'assorbimento dovuto all'aggregato è distinto a causa della sua minor dimensione, e compensa una porzione della CO_2 emessa nella produzione del cemento [207].

In generale, il tasso e la quantità di CO_2 assorbita aumentano con la riduzione della dimensione dell'RCA.

Ad esempio, la quantità di CO_2 assorbita da parte di RCA con una dimensione di 5-10 mm è circa il 50% superiore a quella assorbita da RCA con dimensioni di 14-20 mm [197]; inoltre, la quantità di CO_2 assorbita da RCA con una dimensione media di 1,18 mm è circa del 100% superiore a quella assorbita da quelli con una dimensione media dei grani di 7,5 mm [191]. Gli RCA più piccoli, avendo una superficie specifica più ampia esposta alla CO_2 , favoriscono la partecipazione di una maggiore quantità di cemento alla reazione di carbonatazione. Inoltre, con il trattamento con CO_2 pressurizzata si può aumentare ulteriormente l'assorbimento di CO_2 [195].

Ricerca sui CRA e sul calcestruzzo preparato

Caratteristiche degli RCA dopo trattamento con CO_2

Il $CaCO_3$ è prodotto dalla reazione di carbonatazione con i prodotti di idratazione primaria.

Il risultato è un aumento del volume della fase solida dell'11,8% [183]. Tale volume viene ulteriormente aumentato con la produzione di gel di silice mediante la reazione tra il $C - S - H$ e la CO_2 . Il $CaCO_3$ e il gel di silice riempiono i pori e le crepe nella vecchia malta aderente dell'RCA, migliorandone le proprietà.

Le proprietà principali del CRA sono la densità apparente, l'assorbimento d'acqua, il valore di frantumazione e la struttura dei pori, come descritto di seguito.

Densità apparente

Molti studiosi di tutto il mondo hanno scoperto che il trattamento con CO_2 aumenta la densità apparente dell'RCA, e i risultati precedenti hanno mostrato che l'aumento è del 5,6–7,8% rispetto a quello che si verificherebbe in assenza di CO_2 , a sua volta inferiore dell'1,5-2,6% rispetto a quello dell'aggregato naturale [189] [208] [209].

Cao [210] ha studiato gli effetti della dimensione dell'RCA sul miglioramento della densità apparente durante il trattamento con la CO_2 . Ha scoperto che le densità apparenti di RCA con dimensioni di 5-10 mm e 10-20 mm sono aumentate rispettivamente del 4,9% e del 3,2%, dimostrando che le dimensioni piccole sono utili per aumentare la densità apparente. Zhan et al. [197] hanno osservato che la densità apparente è cresciuta del 1.9% e 2.3% quando l'RCA era prodotto a partire da calcestruzzo di classe C60 e C80, mentre tali valori diminuivano allo 0,76% e dello 0,65% quando questo era prodotto da calcestruzzo di classe C30 e C45.

Assorbimento d'acqua

Il trattamento con CO_2 può ovviamente ridurre l'assorbimento d'acqua dell'RCA.

Zhang et al. [211] [189], Li [208] e Ying et al. [209] hanno scoperto che l'assorbimento d'acqua dell'RCA dopo tale trattamento è diminuito del 22,6-28,3% rispetto al valore precedente al trattamento. Si noti che anche in questo caso che la dimensione ha avuto un evidente impatto su tale proprietà.

Cao [210] ha riportato che i valori di assorbimento d'acqua dell'RCA con una dimensione di 5-10 mm e 10-20 mm sono diminuiti rispettivamente del 30% e del 22% dopo il trattamento con la CO_2 , e i valori riportati da Xuan et al. [146] sono dell'11,2% e del 16,7%.

Anche i materiali di origine da cui è stato prodotto l'RCA hanno avuto un evidente impatto sull'assorbimento d'acqua del relativo CRA.

Rispetto all'assorbimento d'acqua dell'RCA pre-trattamento, Kou et al. [190] hanno scoperto che l'assorbimento d'acqua dell'RCA post-trattamento è diminuito rispettivamente del 38,2% e del 54,2% quando le resistenze della malta di origine erano rispettivamente di 40 MPa e 65 MPa.

Zhan et al. [197] hanno scoperto che l'assorbimento d'acqua dopo la carbonatazione è diminuito rispettivamente del 20,2%, 21,2%, 22,5% e 24,1% quando le classi di resistenza del calcestruzzo di origine erano rispettivamente C30, C45, C60 e C80.

Zhan et al. [199] hanno inoltre scoperto che l'assorbimento di acqua dell'RCA dopo il trattamento di pre-immersione e di carbonatazione era ridotto del 59-65% rispetto a quello senza alcun trattamento.

Valore di frantumazione

Il trattamento con CO_2 causa una diminuzione del valore di frantumazione dell'RCA.

Xuan et al. [146] [212] hanno scoperto che il valore di frantumazione dopo la carbonatazione è stato ridotto del 25,9% rispetto a quello che si otterrebbe senza trattamento.

I risultati riportati da Cao [210] e Ying et al. [209] invece sono del 10,5% e del 31,5%.

Zhan et al. [199] hanno inoltre osservato che il valore di frantumazione dell'RCA dopo il trattamento di pre-immersione e la carbonatazione è diminuito al massimo del 44% rispetto a quello senza alcun trattamento.

Struttura dei pori

Il $CaCO_3$ prodotto ha un volume alto in fase solida e un valore alto di micro-durezza, perciò può riempire in modo soddisfacente i pori e migliorarne la struttura.

Rispetto alla porosità dell'RCA prima della carbonatazione, Zhan et al. [197] hanno riferito che la porosità dopo il trattamento è diminuita rispettivamente del 19,0%, 18,5%, 21,4% e 20,9% quando le classi di resistenza del calcestruzzo di origine erano rispettivamente C30, C45, C60 e C80.

Altre riduzioni di porosità ottenute da Zhan et al. [199] e Pan et al. [161] sono dal 30 al 60%.

Usando un porosimetro a mercurio, Fang et al. [182] hanno scoperto che il trattamento ha migliorato la struttura dei pori e ridotto il numero di macro-pori. In particolare, i pori con una dimensione superiore a 200 nm sono stati eliminati, i pori con una dimensione di 50-200 nm sono stati ridotti e la loro migliore struttura ha contribuito al miglioramento delle proprietà meccaniche e di durabilità del RAC [184] [146].

Proprietà della ITZ

L'ITZ tra aggregato e la matrice cementizia è la zona debole del calcestruzzo. Questo effetto negativo è più marcato nei RAC poichè possiedono più di una ITZ. Il trattamento di carbonatazione può migliorare le proprietà delle ITZ.

Come mostrato in Figura 91, le micrografie SEM mostrano che l'ITZ dell'RCA è costituita da $C - S - H$, che ha una struttura aperta, e dall'eletringite, che ha una struttura allungata piatta. La combinazione di queste due strutture rende la struttura dell'ITZ aperta e porosa, mentre dopo il trattamento, la ITZ è più densa, con micro-crepe piccole e difficilmente individuabili anche nelle immagini SEM [189].

Utilizzando la prova di durezza Vickers, Xuan et al. [146] hanno scoperto che la micro-durezza della nuova ITZ del CRA era superiore a quella dell'RCA, probabilmente perchè il basso assorbimento d'acqua di tale aggregato aveva determinato un basso rapporto w/c della malta intorno ad esso incrementandone quindi la resistenza.

Zhan et al. [195] hanno riferito che la micro-durezza della malta dopo carbonatazione è aumentata al massimo del 160% rispetto a quella prima della carbonatazione, e Lu et al. [159] hanno inoltre scoperto che la micro-durezza della vecchia ITZ e della nuova ITZ nel calcestruzzo contenente il 100% di CRA era rispettivamente superiori del 51,7% e del 50,1% rispetto a quella del RAC con lo stesso quantitativo di RCA.

La forma dell'RCA e le proprietà della vecchia malta aderente hanno un evidente impatto sulle proprietà della ITZ nel trattamento di carbonatazione [185]. Il gel di silice contenuto nel CRA può reagire con l'idrossido di calcio contenuto nella nuova malta, portando alla formazione del silicato di calcio idrato. Inoltre, la calcite contenuta nel CRA favorisce la formazione dell'eminocarbonatoalluminato di calcio e del monocarboalluminato di calcio, che stabilizza l'eletringite e aumenta il volume della fase solida [213].

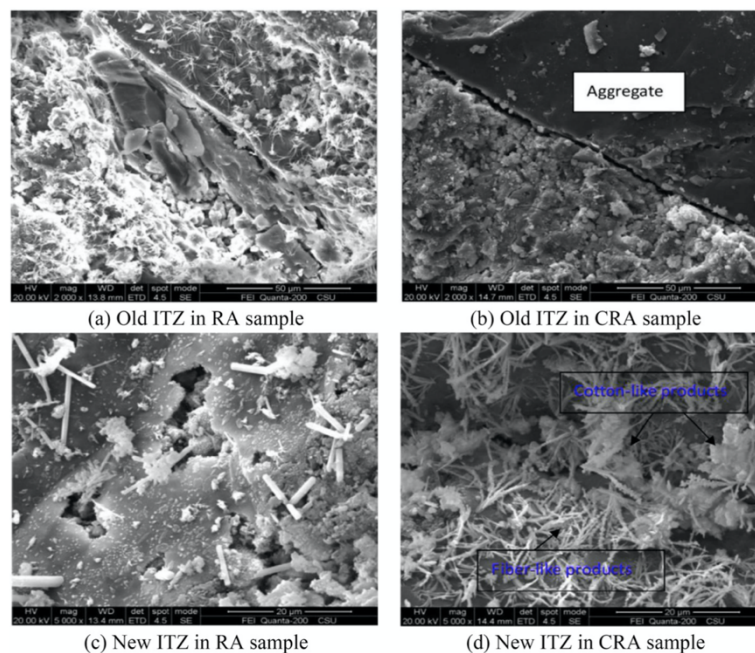


Figura 91: nuova e vecchia ITZ prima e dopo il trattamento di carbonatazione [144]

Performance del calcestruzzo con CRA nel primo periodo di maturazione

Lavorabilità

L'RCA ha generalmente un assorbimento d'acqua maggiore dell'NCA, e di conseguenza la lavorabilità del RAC è inferiore a quella del calcestruzzo ordinario [214]. Poiché il trattamento di carbonatazione migliora la densità della vecchia malta aderente, l'assorbimento di acqua del CRA è inferiore a quello dell'RCA e da ciò ne risulterà una lavorabilità maggiore del RAC.

Kou et al. [190] hanno scoperto che, quando il rapporto w/c effettivo è lo stesso ma viene aggiunta acqua in più nella miscela per saturare l'aggregato, lo slump iniziale della miscela di calcestruzzo con il CRA è inferiore a quello della miscela con l'RCA, ma con il passare del tempo quest'ultimo diventava superiore a quello con l'RCA. Per la miscela di calcestruzzo con il CRA, il tempo necessario per raggiungere lo slump finale è superiore di 30 minuti rispetto a quello della miscela con l'RCA. Quando il rapporto w/c è lo stesso e non viene miscelata acqua aggiuntiva, Zhang et al. [189] hanno scoperto che la fluidità della miscela di calcestruzzo con CRA è migliore di quella con RCA.

Tam et al. [205] hanno anche ottenuto una conclusione simile, secondo cui lo slump della miscela con il 100% di CRA è aumentato al massimo del 57,1% rispetto a quello con il 100% di RCA, e ha spiegato che il trattamento con CO_2 ha ridotto l'assorbimento di acqua dell'aggregato aumentando di conseguenza la fluidità dell'impasto.

Quando la fluidità iniziale era la stessa, Zhan et al. [199] e Pan et al. [161] hanno riscontrato che il rapporto w/c e la perdita di consistenza a 2 ore della miscela di calcestruzzo con CRA sono diminuiti rispettivamente del 12,6% e del 42,4%, e il tempo di presa della miscela di calcestruzzo con CRA è stato prolungato di 24 minuti rispetto a quello con RCA.

Ritiro da essiccazione e autogeno

In generale, il ritiro del RAC è superiore a quello del NAC e aumenta con l'aumento del contenuto di RCA. Tuttavia, il trattamento di carbonatazione riduce tale ritiro.

Zhang et al. [189] hanno scoperto che il ritiro (a 56 giorni) del mix con CRA è minore dell'8–13% rispetto a quello del mix con RCA; inoltre, a parità di grado di sostituzione con CRA e RCA, la resistenza al ritiro è maggiore nel primo caso rispetto al secondo [159].

Kou et al. [190] hanno riferito che il ritiro (a 112 giorni) del calcestruzzo con CRA è minore del 10-15% rispetto a quello con RCA, e la sua perdita d'acqua è minore del 24-26% rispetto a quella della mix con RCA.

Xuan et al. [212] hanno osservato che il ritiro (a 112 giorni) del calcestruzzo con CRA è diminuita del 23,0-25,2% rispetto a quella con RCA.

Tale diminuzione è attribuita al basso assorbimento d'acqua del CRA. Inoltre, la diminuzione del ritiro del calcestruzzo con RFA carbonatato è più evidente di quella con RCA grosso carbonatato.

Il trattamento di carbonatazione dell'RCA ha due impatti opposti sul ritiro autogeno del RAC. Innanzitutto, migliora la sua durezza, il che riduce già di per sé il ritiro autogeno del RAC. In secondo luogo, essendo il ritiro autogeno del RAC strettamente correlato all'assorbimento d'acqua dell'RCA, un elevato assorbimento d'acqua può provocare un effetto di maturazione interna e ridurre il ritiro autogeno di RAC, mentre il trattamento di carbonatazione dell'RCA riduce il suo assorbimento d'acqua, e può portare all'aumento del ritiro autogeno del calcestruzzo con CRA. Secondo le specifiche ASTM-C1761 [215], l'effetto di maturazione interna dell'aggregato viene prodotto quando il suo assorbimento d'acqua è superiore al 5% mentre quando tale valore è inferiore al 5% l'effetto può essere trascurato.

Cao [210] ha scoperto che i valori di ritiro autogeno del calcestruzzo con RCA e CRA erano rispettivamente 160 $\mu\epsilon$ e 100 $\mu\epsilon$. Tuttavia, quando i valori di assorbimento d'acqua di RCA e CRA sono superiori al 5% si verificava l'effetto di maturazione interna.

Zhang et al. [189] hanno scoperto che il ritiro autogeno del calcestruzzo con CRA è aumentato di oltre il 126% rispetto a quello con RCA.

La letteratura dimostra che l'aggiunta di CRA può migliorare le prestazioni del RAC nei primi periodi di maturazione.

Proprietà meccaniche del calcestruzzo contenente CRA

Resistenza a compressione

A causa del fatto che l'RCA ha una malta aderente porosa e una ITZ debole, si può osservare un'evidente riduzione della resistenza a compressione del RAC rispetto al NAC. La maggior parte dei ricercatori ha scoperto che il trattamento di carbonatazione ha migliorato la resistenza a compressione del RAC, la quale è aumentata con l'aumentare del contenuto di CRA [146] [209]; inoltre, la resistenza a compressione a 28 giorni del calcestruzzo con CRA può raggiungere quella del calcestruzzo ordinario [190] dimostrando che il trattamento con CO_2 attenua l'effetto negativo che hanno alti gradi di sostituzione sulle prestazioni meccaniche [159].

I risultati della resistenza a compressione relativa del calcestruzzo con RCA e CRA sono mostrati nel Grafico 5, ed evidenziano che la resistenza a compressione del calcestruzzo con CRA è del 5,0–32,9% superiore a quella del mix con RCA.

La resistenza del calcestruzzo originale utilizzato nella preparazione di RCA e CRA ha un impatto distinto sulla resistenza a compressione del RAC. Una resistenza più elevata del calcestruzzo originale comporta un basso aumento della resistenza alla compressione del RAC, dimostrando che il trattamento di carbonatazione è più adatto per migliorare le proprietà di RCA di bassa qualità [189].

Li et al. [216] hanno studiato gli effetti della velocità di deformazione sulla resistenza a compressione del calcestruzzo con CRA e i risultati mostrano che i picchi di tensione nel calcestruzzo con CRA a velocità di deformazione di $10^{-5}/s$, $10^{-5}/s$, $10^{-5}/s$, $10^{-5}/s$ e $10^{-5}/s$ sono aumentati rispettivamente del 16,6%, 36%, 16,6%, 12,6% e 5,4% rispetto a quello con RCA, mostrando che la differenza tra le tensioni di picco tra i due mix sono diminuite con l'aumentare della velocità di deformazione.

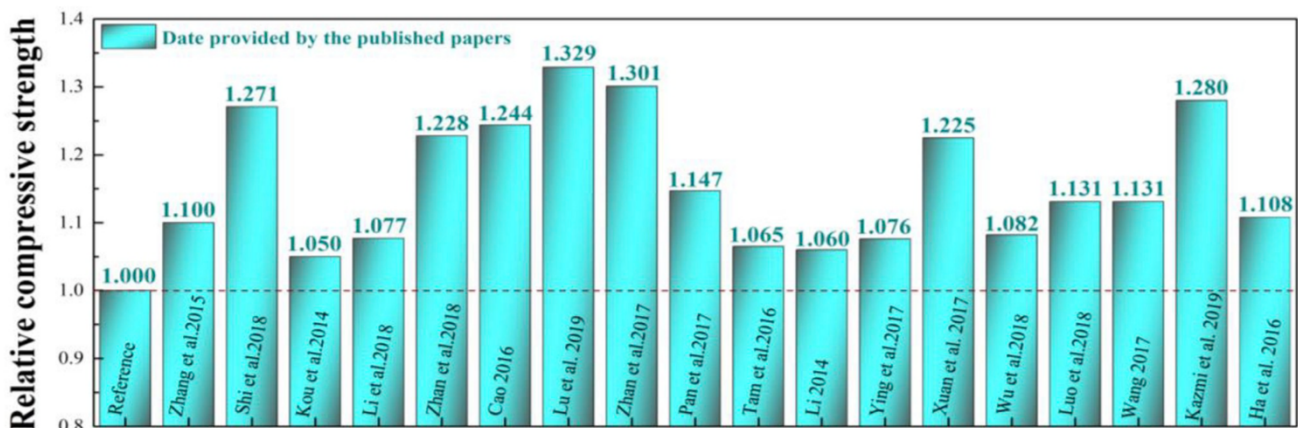


Grafico 5: Resistenza a compressione relativa del calcestruzzo con CRA [144]

Modulo elastico

Il modulo elastico del RAC può essere migliorato dal trattamento di carbonatazione.

I risultati riportati da Kou et al. [190] e Xuan et al. [212] mostrano che il valore di E del calcestruzzo con CRA è del 13% superiore a quello con RCA.

Per RCA ottenuti da varie fonti di macerie da C&D, Kazmi et al. riferiscono che il valore di E del calcestruzzo con CRA è superiore dell'8–27% a quello del corrispondente RCA.

Li et al. [194] ha studiato gli impatti della velocità di deformazione sul valore di E del calcestruzzo con CRA e hanno scoperto che esso aumenta con l'aumentare della velocità di deformazione e in particolare, a velocità di deformazione di $10^{-5}/s$, $10^{-4}/s$, $10^{-3}/s$, $10^{-2}/s$ e $10^{-1}/s$ aumenta rispettivamente dell'8,8%, 12,2%, 2,6%, 10,9% e 2,2% rispetto a quella del mix con RCA.

Xuan et al. [212] hanno inoltre scoperto che l'incorporazione di CRA ha migliorato il valore di E residua del RAC dopo l'esposizione a temperature elevate.

La Figura 92 mostra il modulo di elasticità relativo del calcestruzzo con CRA [190] [194] [205] [212] [217] e mostra che il valore di E del calcestruzzo con CRA è del 3,1–27,0% superiore a quella con RCA.

Una formula empirica utilizzata nel calcolo del modulo di elasticità del calcestruzzo con CRA è stata descritta in Eq. (5), dove E_c rappresenta il modulo di elasticità del calcestruzzo con CRA, e f_{cc} è la resistenza a compressione di campioni cilindrici [217].

$$E_c = 1.26f_{cc}^{0.95} \text{ per gradi di sostituzione con CRA tra 30 e 100\%} \quad (5)$$

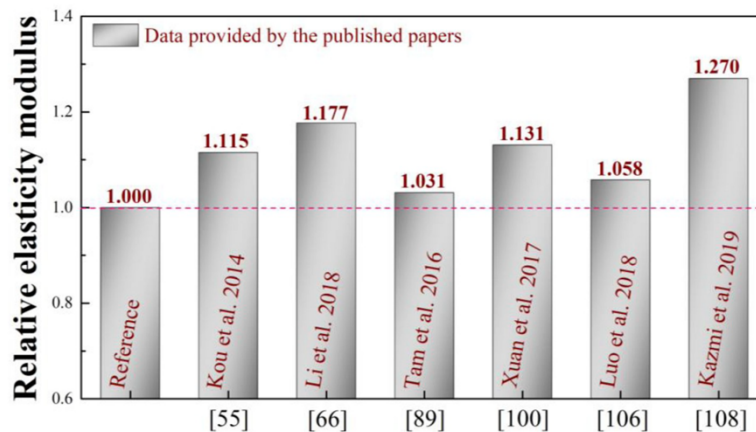


Figura 92: modulo elastico relativo del calcestruzzo con CRA [144]

Resistenza a trazione e flessione

Quando il rapporto w/c effettivo era lo stesso e veniva aggiunta ulteriore acqua nella miscela del RAC, Kou et al. [190] hanno osservato che la resistenza a trazione del mix con CRA a 28 giorni e 90 giorni è aumentata del 6% e del 12% rispetto a quella del mix con RCA, e la resistenza a trazione con CRA a 90 giorni era persino superiore a quella del calcestruzzo di riferimento.

Wu et al. [218] e Patil et al. [219] hanno osservato che la resistenza a trazione con CRA è aumentata del 9,2-37,1% rispetto a quella del mix con RCA, e l'effetto del trattamento con CO_2 sull'aumento della resistenza a trazione era più significativo rispetto a quello sulla resistenza a compressione.

Xuan et al. [146] e Tam et al. [205] hanno inoltre scoperto che la resistenza alla flessione di mix con il 100% di CRA è aumentata del 28,7% e del 16,2-50,8%, rispettivamente, rispetto a quella del mix con RCA. Tuttavia lo studio precedente ha scoperto che la resistenza a trazione del mix con il 100% di CRA diminuiva dello 7,1-10,8% rispetto a quella del mix con RCA quando la quantità d' acqua era uguale e non veniva addizionata acqua aggiuntiva alla miscela, spiegando che il trattamento con la CO_2 riduceva l'assorbimento d'acqua dell'RCA, traducendosi in un rapporto w/c effettivo più alto del calcestruzzo con CRA rispetto a quello con RCA [205].

Considerando RCA ottenuti da varie macerie C&D, Kazmi et al. [217] hanno scoperto che la resistenza alla trazione indiretta e la resistenza alla flessione del calcestruzzo con CRA erano rispettivamente del 9,5-19% e del 22-27% superiori a quelle dell'RCA non trattato.

Le formule empiriche utilizzate per il calcolo della resistenza alla trazione indiretta e della resistenza alla flessione del calcestruzzo con CRA sono mostrate nelle Eq. (6), (7), dove f_t e f_f sono la resistenza alla trazione indiretta e la resistenza alla flessione del calcestruzzo con CRA [217].

$$f_t = 0.47 f_{cc}^{0.58} \text{ per } 30\text{-}100\% \text{ CRA} \quad (6)$$

$$f_f = 2.00 f_{cc}^{0.20} \text{ per } 30\text{-}100\% \text{ CRA} \quad (7)$$

Gli studi analizzati hanno riferito che il trattamento con CO_2 è utile per migliorare le proprietà del RAC. Tuttavia, le prove sperimentali effettuate per studiare le prestazioni strutturali dei RAC contenenti CRA sono piuttosto poche, perciò il loro comportamento all'interno di travi e colonne dovrebbe essere ulteriormente studiato.

Performance di durabilità del calcestruzzo con CRA

Permeabilità al gas e all'acqua

È stato osservato che l'aggiunta di RCA aumenta la permeabilità ai gas [72] e la permeabilità all'acqua del calcestruzzo [220]. Il trattamento di carbonatazione migliora queste proprietà.

Xuan et al. [109] hanno scoperto che il coefficiente di permeabilità al gas diminuiva con l'aumentare del grado di sostituzione con CRA e tale diminuzione era del 43,6% quando il grado di sostituzione con CRA era del 100%.

Wang [221] ha anche ottenuto conclusioni simili secondo cui la permeabilità ai gas del calcestruzzo con CRA è diminuita del 43,5% rispetto a quella del calcestruzzo con RCA. La ragione di ciò è che il trattamento di carbonatazione ha eliminato i pori più grandi con una dimensione superiore a 200 nm e ha ridotto le quantità di pori con una dimensione di 50-200 nm, portando a una riduzione generale della porosità [212].

Wang [221] ha scoperto che i rispettivi valori di assorbimento e permeabilità all'acqua del calcestruzzo con CRA erano inferiori del 20,7% e del 19,4% rispetto a quelli con RA. Inoltre, si può osservare una buona correlazione tra permeabilità ai gas e assorbimento d'acqua di RAC [221].

Permeabilità al cloro e risultante corrosione dell'acciaio

La penetrazione degli ioni cloruro provoca frequentemente la corrosione dell'acciaio nel cemento armato, riducendo quindi la sicurezza della struttura e la durata del calcestruzzo [222]. La permeabilità agli ioni cloruro è un indicatore chiave della durabilità del calcestruzzo e il trattamento di carbonatazione aumenta questa resistenza.

Kou et al. [190] ha scoperto che il coefficiente di diffusione del cloro del calcestruzzo con CRA è diminuito del 41–46% rispetto a quello con RCA.

Xuan et al. [212] hanno riferito che il coefficiente di diffusione del cloruro di RAC è diminuito con l'aumentare del contenuto di CRA rispetto a quello con RCA, e il coefficiente di diffusione del cloruro è diminuito del 36,4% quando i rapporti di sostituzione di CRA erano del 100%.

Liang et al. [184] hanno inoltre dimostrato che la permeabilità agli ioni cloruro del calcestruzzo con aggregati fini e grossolani carbonatati era molto inferiore a quella del calcestruzzo con aggregati fini e grossolani riciclati non carbonatati. Inoltre, la diminuzione della permeabilità al cloruro è stata più significativa per il calcestruzzo con CRA di bassa qualità rispetto a quello con CRA di alta qualità [184] [189].

La Figura 93 mostra i risultati della permeabilità al cloro del calcestruzzo con CRA e mostrano che la permeabilità al cloro del calcestruzzo con CRA è inferiore del 67–91% rispetto a quella con RCA.

Il comportamento alla corrosione dell'acciaio è strettamente correlato alla penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo. Liang et al. [184] e Zhan et al. [223] hanno riferito che la corrosione dell'acciaio nel cemento armato è diminuita con l'aumento del grado di sostituzione con CRA, e ciò può essere dovuto al fatto che il trattamento di carbonatazione ha ridotto il numero dei pori riducendo le concentrazioni di ioni cloruro attorno all'armatura. Inoltre, è stato ulteriormente studiato il comportamento del legame tra il calcestruzzo con CRA e l'acciaio corrosivo, e i risultati hanno mostrato che la rigidità del cemento armato con CRA era migliorata rispetto a quella con RCA quando i gradi di sostituzione con CRA erano inferiori al 40% [224].

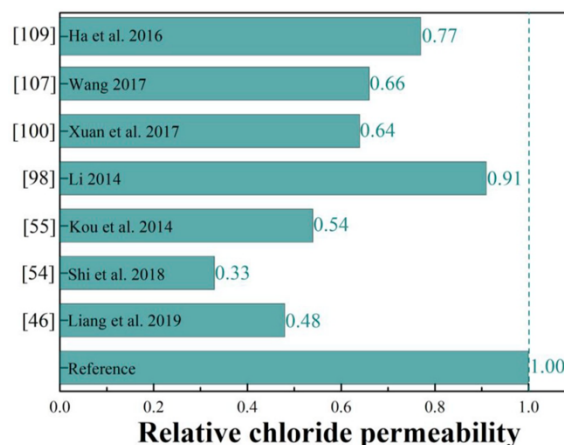


Figura 93: permeabilità relativa al cloro [144]

Comportamento alla carbonatazione

Precedenti studi hanno investigato gli effetti del CRA sul comportamento alla carbonazione del RAC preparato e i risultati hanno evidenziato che il trattamento con la CO_2 dell'RCA ha migliorato la resistenza alla carbonatazione del RAC preparato.

Cao [210], Wang [221] e Ha et al. [225] hanno mostrato che la profondità di carbonatazione del calcestruzzo con CRA è diminuita rispettivamente di circa il 28,7%, il 22,2% e il 19,7% rispetto a quella dell'RCA. Tuttavia, il trattamento di carbonatazione dell'RCA ha due impatti opposti sul comportamento del RAC.

Innanzitutto, riduce il suo contenuto di alcali, il che può comportare un aumento della profondità di carbonatazione del calcestruzzo preparato. In secondo luogo, il trattamento di carbonatazione dell'RCA migliora le sue strutture dei pori e riduce la sua porosità, rendendolo più denso dell'RCA. In questo caso, la penetrazione della CO_2 viene ridotta e la resistenza alla carbonatazione del RAC aumenta. Il comportamento alla carbonatazione del RAC è stato determinato dalle proprietà e dal contenuto della nuova malta piuttosto che dalla vecchia malta aderente dell'aggregato riciclato [226]. Pertanto, la struttura migliorata dei pori del CRA svolge un ruolo di primo piano nella resistenza alla carbonatazione di RAC e l'aggiunta di CRA migliora la resistenza di carbonatazione.

Gli studi precedenti hanno evidenziato che il trattamento ha migliorato la durabilità del RAC. Oltre a questi parametri di durabilità esaminati sopra, la resistenza al gelo/disgelo, l'attacco ai solfati e le prestazioni di durabilità dovrebbero essere ulteriormente studiate nelle ricerche future. Inoltre, la carbonatazione di materiali cementizi è stata utile per migliorare la resistenza agli attacchi di gelo e disgelo e solfato, che può essere riferita negli studi sulla durabilità del calcestruzzo con CRA che contiene una massa di materiali cementizi nel vecchio mortaio aderito [227].

Secondo le statistiche, una tonnellata di RCA può assorbire 11-20 kg di CO_2 [175], rendendone quindi sostenibile l'uso per l'ingegneria civile portando un significativo vantaggio ambientale. Tuttavia, l'attuale tecnologia utilizzata per la produzione di CRA ha un costo relativamente alto e poco efficace, e la maggior parte degli studi sono stati condotti in laboratorio e non a scala industriale.

7.5 Metodo di predizione della resistenza a compressione di un RAC

Quando la composizione di un RAC è già determinata a priori, è possibile prevederne il valore di resistenza a compressione. Il metodo successivamente illustrato è stato proposto da Eduardus et al. [228] e ha lo scopo di predire sia il valore finale, sia l'evoluzione nel tempo della resistenza a compressione dei RAC. Le formulazioni proposte sono state calibrate e validate sui risultati di vari esperimenti in cui sono stati monitorati vari parametri come w/c, assorbimento d'acqua, condizioni di umidità iniziali etc.

I diagrammi successivamente illustrati dimostrano la facilità del metodo e il potenziale di impiego.

“Generalised mix design rules for concrete with recycled aggregates”

Come precedentemente affermato gli RCA considerati come un composto di due fasi: gli aggregati naturali originari e la malta attaccata (AM) composta da sabbia, prodotti di idratazione e frazioni di cemento non idratato. La AM, con la sua alta porosità, è responsabile dell'incremento di capacità di assorbimento d'acqua.

Il processo che verrà esaminato prende in considerazione i parametri chiave caratterizzanti gli RCA; la porosità è il parametro principale e condiziona le proprietà fisiche e meccaniche degli RCA, oltre che i fenomeni di trasporto acquoso occorrenti tra cemento e aggregati durante la maturazione.

Il ruolo dell'acqua libera diventa fondamentale perché determina come evolve la resistenza dell'interfaccia tra gli aggregati e il cemento (ITZ). In più, la presenza di un mezzo poroso nel RAC è un possibile punto debole del conglomerato.

Caratterizzazione sperimentale degli RCA

Gli RCA usati per la validazione del metodo hanno due origini: da demolizione di strutture in calcestruzzo e da frantumazione di provini testati in laboratorio. Per l'aggregato grosso sono stati utilizzati tre differenti fusi granulometrici:

- classe 1 (4,75-9,5 mm);
- classe 2 (9,5-19 mm);
- classe 3 (19-31 mm).

Su di essi è stato effettuato un processo di pulizia [229].

Sono state effettuate molte prove sia su campioni di RCA che di RAC e ne sono state misurate molte proprietà fisiche, come il contenuto di AM tramite analisi CT [230] (ASTM E1570 2011), l'assorbimento d'acqua in 24 ore, la densità e la porosità, determinata con il Porosimetro a Intrusione di Mercurio (ASTM D4404 2010) [231].

Queste misurazioni sono servite per caratterizzare la morfologia interna e la porosità degli RCA e per determinare il volume relativo di fasi presenti.

La relazione tra densità e porosità degli RCA è stata determinata da varie fonti.

La Figura 94 mostra i risultati relazionati con la porosità e la densità. Ad alte porosità e alto contenuto di AM corrisponde ovviamente una minore densità.

Infine, sono state fatte alcune correlazioni analitiche tra il contenuto di AM e le proprietà fisiche dell'RCA, come l'assorbimento d'acqua e la densità.

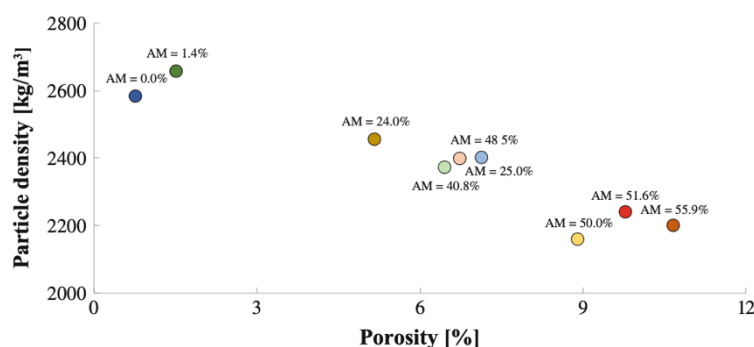


Figura 94: densità vs porosità vs AM [228]

Caratterizzazione sperimentale degli RAC e modelli dei processi di idratazione

La Tabella 37 descrive una serie di esperimenti che hanno avuto lo scopo di analizzare il ruolo del grado di sostituzione degli aggregati, il contenuto di umidità iniziale e il rapporto w/c.

Per ogni mix è stato effettuato un test a 1, 3 e 28 giorni su provini cubici di spigolo 15 cm, lasciati a maturare in immersione in acqua a una temperatura di 20 +/- 2°C.

La temperatura è stata misurata al centro dei provini cubici in condizioni semi-adiabatiche [232]. Le resistenze a compressione medie sono riportate in Tabella 37 e fanno vedere chiaramente che l'uso di RCA, insieme alla loro umidità iniziale, ha un'influenza significativa nelle performance finali. Quando si compara diversi calcestruzzi con lo stesso rapporto w/c nominale e la stessa umidità iniziale si evince che maggiore è il grado di rimpiazzamento con RCA, minore è la resistenza a 28 giorni. Questo effetto diviene più pronunciato quando si applicano le condizioni di completa saturazione dell'aggregato.

Quando gli aggregati sono asciutti invece tendono ad assorbire parte dell'acqua riducendo il rapporto w/c.

Tabella 37: risultati sperimentali [228]

Mix	w/c	RAC (%)	Moisture condition	w/c _{eff}	R _{cm,28days} (MPa)
0.50_OC_Dry	0.50	0	Oven dried	0.50	49.12
0.50_OC_Sat	0.50	0	Saturated with dry surface	0.50	47.00
0.50_RAC50_Dry	0.50	50	Oven dried	0.46	47.55
0.50_RAC50_Sat	0.50	50	Saturated with dry surface	0.50	40.88
0.50_RAC100_Dry	0.50	100	Oven dried	0.39	38.57
0.50_RAC100_Sat	0.50	100	Saturated with dry surface	0.50	31.66
0.40_RAC100_Dry	0.40	100	Oven dried	0.32	42.39
0.40_RAC100_Sat	0.40	100	Saturated with dry surface	0.40	41.15
0.60_RAC100_Dry	0.60	100	Oven dried	0.47	36.60
0.60_RAC100_Sat	0.60	100	Saturated with dry surface	0.60	22.59

Basandosi su queste considerazioni [233] risulta chiaro che il contenuto di umidità e la porosità tendono a modificare w/c, e per questa ragione il w/c deve tenere conto di questi parametri:

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{eff} = \frac{w}{c} + \frac{w_{add}}{c} - \delta \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i * P_i}{c} \right) \quad (1)$$

Dove:

- $\frac{w}{c}$ è il rapporto acqua-cemento nominale;
- w_{add} è l'acqua extra aggiunta, corrispondente al totale o parziale riempimento della porosità degli aggregati;
- p_i e P_i rappresentano la capacità di assorbimento e il peso nella mixtura dell'i-esimo aggregato;
- δ parametro che tiene conto dell'umidità iniziale degli aggregati (0 saturo, 0,5 asciutto) [233].

Gli autori hanno anche proposto anche un modello per predire l'evoluzione del grado di idratazione calcolato a partire dalla temperatura di provini cubici in condizioni semi-adiabatiche [232].

Quest'ultimo può simulare le reazioni di idratazione per differenti condizioni termiche.

Dopo averlo calcolato, è stato correlato con la resistenza a compressione di diversi provini in differenti tempi di maturazione.

La formulazione è [234]:

$$R_c = R_{c,max} \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad (2)$$

Dove:

- α_0 è il minimo grado di idratazione alla fine della fase di presa;
- $R_{c,max}$ è la resistenza a compressione di un provino ideale con grado di idratazione pari a 1.

La correlazione tra le proprietà meccaniche e il grado di idratazione può esprimere l'influenza tra la frazione di cemento non idratata, la porosità e il contenuto di umidità iniziale sui processi di idratazione generali che controllano la formazione della microstruttura del calcestruzzo e la sua resistenza.

Proprietà fisiche degli RCA: il ruolo di AM

Una correlazione lineare possibile per legare la porosità e la AM è:

$$p = (p_{NA}(1 - AM) + p_{AM}(AM)) \left(\frac{d_0}{d} \right) \quad (3)$$

Dove:

- d è il diametro dell'aggregato in millimetri
- d_0 è il diametro di riferimento pari a 20 mm
- p_{NA} è la porosità di un aggregato naturale contenuto nell'RCA, pari a 0,45 circa
- p_{AM} è la porosità dell'AM attaccata ad esso, pari a 15% circa

Un altro parametro fondamentale è la densità. Una prima relazione con la porosità è rappresentata da:

$$\gamma = \gamma_0(1 - \beta p) \quad (4)$$

Dove:

- γ_0 è la densità di un aggregato ideale con porosità pari a 0 (2700 kg/m^3);
- β costante pari a 2.

Il processo di pulizia effettuato a scala di laboratorio è servito a migliorare le proprietà delle particelle di calcestruzzo frantumato riducendo l'AM e di conseguenza l'assorbimento d'acqua [221].

Questa formulazione serve a valutare la porosità in funzione del tempo di pulizia, espresso in minuti:

$$p(t) = \left(1 - \frac{a * t}{b + t} \right) p_{t=0} \quad (5)$$

Dove:

- $p_{t=0}$ è la porosità iniziale senza pulizia;
- a è pari a 0,6 per la classe 1 e pari a 0,2 per la classe 2;
- b è pari a 2.

Mix design per RAC

Il primo passo consiste nel creare una formulazione capace di predire la resistenza meccanica dei RAC prendendo in considerazione sia la composizione sia i parametri principali degli RCA.

La prima correlazione relaziona α_0 , $R_{c,max}$ e il w/c effettivo che tiene conto del reale quantitativo d'acqua disponibile nell'impasto.

Tuttavia, la resistenza del calcestruzzo è condizionata dal grado di sostituzione degli aggregati, non considerato fin'ora.

Perciò è stato introdotto un ulteriore parametro che tiene in considerazione le porosità medie degli aggregati sciolti impiegati:

$$A_{MIX} = \sum_{i=1}^n p_i V_i \quad (6)$$

Dove:

- p_i è la porosità aperta;
- V_i è la corrispondente frazione volumica ($V_{i,agg} / \sum V_i$).

Questo parametro può spiegare la riduzione di resistenza dovuta al rimpiazzo di NCA con RCA. In particolare, può spiegare la decrescita di α_0 e $R_{c,max}$ che caratterizzano l'evoluzione della resistenza di un RAC rispetto a $\alpha_{0,NAT}$ e $R_{c,max,NAT}$ caratterizzanti la resistenza di un calcestruzzo creato da soli aggregati naturali (con dimensioni costanti).

È possibile definire anche un valore di r^* e α^* per esprimere la riduzione di resistenza e il suo sviluppo in termini di α_0 e $R_{c,max}$. Le seguenti formulazioni analitiche adimensionali sono state introdotte per descrivere la relazione esistente tra i suddetti parametri r^* e α^* e il rapporto A_{NAT}/A_{MIX} :

$$r^* = \frac{R_{c,max}}{R_{c,max,NAT}} = \frac{a_R \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)}{b_R + \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)} \quad (7)$$

$$\alpha^* = \frac{\alpha_0}{\alpha_{0,NAT}} = \frac{a_\alpha \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)}{b_\alpha + \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)} \quad (8)$$

Dove:

- A_{NAT} è il corrispondente valore A_{MIX} per un calcestruzzo ordinario;
- a_R è pari a 1,06;
- b_R è pari a 0,06;
- a_α è pari a 1,05;
- b_α è pari a 0,05.

I valori di α_0 e $R_{c,max}$ possono essere infine divisi per i corrispondenti valori di r^* e α^* e adesso possono essere rappresentati con il rispetto dell'effettivo w/c.

L'analisi di questi risultati [233] mostra che tutti i punti si allineano su una curva che può essere espressa dalla legge di Abram e può essere rappresentata dalle espressioni successive. Similmente anche la correlazione tra α_0/α^* e w/c_{eff} può essere espressa da una legge simile:

$$R_{c,max} = \frac{A_R}{B_R^{w/c_{eff}}} r^* = \frac{A_R}{B_R^{w/c_{eff}}} \frac{a_R \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)}{b_R + \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)} = \frac{265}{9.5^{w/c_{eff}}} \frac{1.06 \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)}{0.06 + \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)} \quad (9)$$

$$\alpha_0 = A_\alpha \left(\frac{w}{c_{eff}} - B_\alpha \right) \alpha^* = 1.62 \left(\frac{w}{c_{eff}} - 0.28 \right) \frac{1.05 \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)}{0.05 + \left(\frac{A_{NAT}}{A_{MIX}} \right)} \quad (10)$$

Dove:

- A_R pari a 265;
- B_R pari a 9,5;
- A_α pari a 1,62;
- B_α pari a 0,28.

L'accuratezza della legge può essere valutata dalla Figura 95. I dati sperimentali e la predizione del modello sono rappresentati in termini di resistenza a compressione a 28 giorni. Questi dati sperimentali possono essere usati per calibrare il modello proposto e per renderlo uno strumento di valutazione utilizzabile per i RCA.

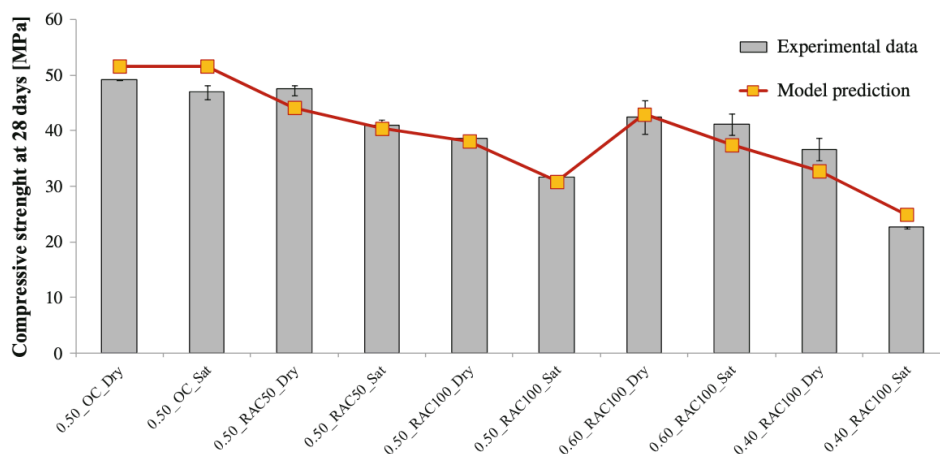


Figura 95: calibrazione del processo di mix design [228]

Diagrammi di design e modelli potenziali

Riassumendo questo metodo si propone di definire un nuovo parametro A_{MIX} , rappresentativo della porosità media del calcestruzzo prodotto con RCA. Quando la composizione del calcestruzzo è definita, il parametro può essere calcolato facilmente, applicando la formula (6), e conseguentemente è definito anche il rapporto A_{NAT}/A_{MIX} .

La Figura 96 mostra il trend generale di $R_{c,max}$ e α_0 in funzione di w/c_{eff} , per differenti valori di A_{NAT}/A_{MIX} , rappresentanti la quantità di RCA, o più specificatamente il contenuto di AM, e l'influenza del w/c_{eff} che tiene in conto delle condizioni iniziali di umidità.

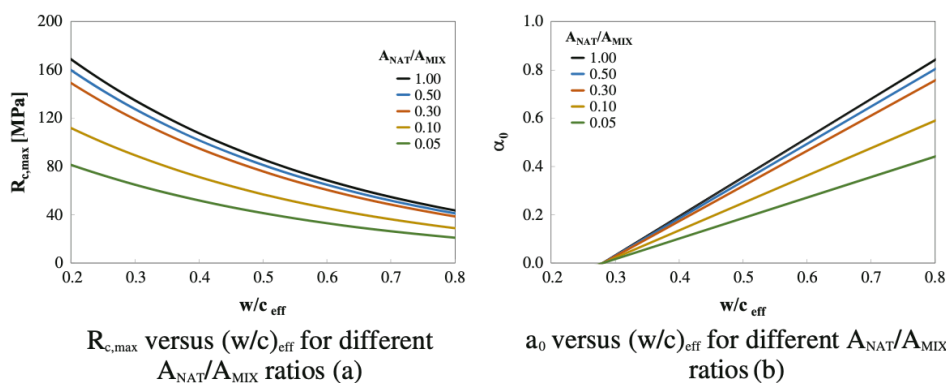


Figura 96: influenza di A_{nat}/A_{mix} su $R_{c,max}$ e α_0 [228]

Le curve riportate nella Figura 96 sono descritte dalle formule (9) e (10), con il significato di essere degli abachi per il mix design.

I modelli numerici proposti dagli autori consentono una facile analisi dell'evoluzione della resistenza e del grado di idratazione. In alternativa il grado di idratazione a 28 giorni può essere determinato con la seguente relazione [235]:

$$\alpha_{\max} = \frac{1.031 \frac{W}{C_{\text{eff}}}}{0.194 + \frac{W}{C_{\text{eff}}}} \quad (11)$$

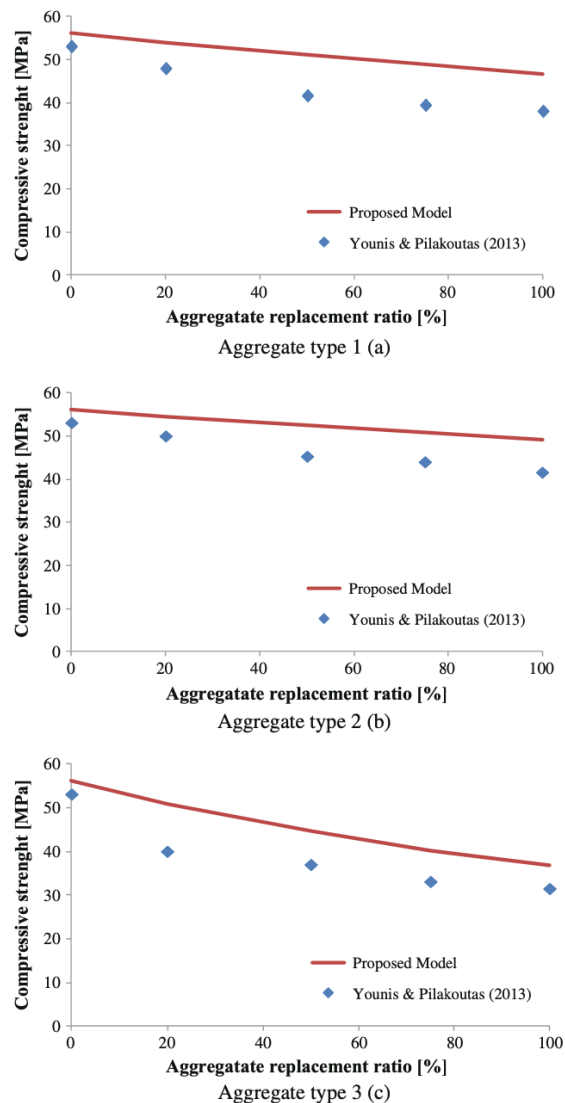


Figura 97: potenziale del metodo [226]

Infine, per valutare il potenziale del metodo descritto sono stati analizzati degli esperimenti trovati in letteratura (Younis and Pilakoutas, 2013 [94]). I risultati sono riportati nella Figura 97 e mostrano che, anche se le formulazioni proposte dovranno essere calibrate meglio con più dati sperimentali, l'introduzione del parametro A_{MIX} è capace di predire i cambiamenti nelle performance dei RAC rispetto agli ordinari.

7.6 Metodo di mix design per i RAC

Per i RAC, come evidenziato dalla letteratura analizzata, è emersa la necessità di tenere conto della malta aderente, e di conseguenza dell'alto assorbimento d'acqua dell'inerte. Il metodo proposto da G. Fathifazi et al. [236] tuttavia, è adatto solo al confezionamento di calcestruzzi contenenti RCA grossi.

Il metodo, denominato "Equivalent Mortar Volume" [236], si basa su due ipotesi:

1. l'RCA sia composto da due fasi: la malta aderente residuale RM (Residual Mortar) e l'aggregato naturale OVA (Original Virgin Aggregate) su cui aderisce la malta. Questa ipotesi è confermata dalle osservazioni sperimentali.
2. Il volume di malta totale TM (Total Mortar) nel RAC sia lo stesso di un analogo mix avente le stesse proprietà meccaniche ma costituito interamente da aggregati naturali grossi aventi proprietà simili a quelle contenuti nell'RCA (OVA).

Per l'applicazione di questo metodo è richiesta la conoscenza del contenuto di malta aderente. Le modalità per la determinazione di quest'ultima saranno descritte nel seguito.

"Equivalent mortar volume"

In questo studio gli RCA utilizzati per la validazione del metodo sono di due tipi:

- RCA-M, ottenuto nell'impianto di riciclo di Montreal, il cui OVA è calcare;
- RCA-V, ottenuto nell'impianto di riciclo di Vancouver, il cui OVA è ghiaia di fiume.

Determinazione delle proporzioni di un mix equivalente contenente soli aggregati naturali

Per prima cosa si crea un mix composto da soli NCA, aventi stessa granulometria e diametro massimo degli RCA che si andranno ad utilizzare (mix che verrà chiamato NAC). V_{NCA}^{NAC} rappresenta il volume di NCA contenuti in questo mix.

Determinazione di RCA e NA nel mix RCA

Successivamente si crea un altro mix contenente una parte di NCA e una parte di RCA. Il volume di NCA in quest'ultimo è denominato $V_{NCA}^{RCA-concrete}$. Si può definire perciò il contenuto di naturali R come:

$$R^8 = \frac{V_{NCA}^{RCA-concrete}}{V_{NCA}^{NAC}} \quad (1)$$

L'ipotesi effettuata in precedenza si traduce nelle seguenti equazioni:

$$V_{TM}^{RCA-concrete} = V_M^{NAC} \quad (2)$$

$$V_{TNCA}^{RCA-concrete} = V_{NCA}^{NAC} \quad (3)$$

Dove:

- $V_{TM}^{RCA-concrete}$ è il quantitativo di TM nel mix con RCA
- V_M^{NAC} è il volume di malta nel mix equivalente contenente solo NA
- $V_{TNCA}^{RCA-concrete}$ è il quantitativo totale di NCA nel mix con RCA, somma del volume dei nuovi NCA e degli NCA contenuti negli RCA, denominati precedentemente OVA

Quindi si possono riscrivere le equazioni precedenti come:

$$V_{TM}^{RCA-concrete} = V_{RM}^{RCA-concrete} + V_{NM}^{RCA-concrete} \quad (4)$$

$$V_{TNCA}^{RCA-concrete} = V_{OVA}^{RCA-concrete} + V_{NCA}^{RCA-concrete} \quad (5)$$

⁸ R=0 corrisponde a un mix con soli riciclati e R=1 corrisponde a un mix con soli naturali

Dove:

- $V_{RM}^{RCA-concrete}$ è la quantità di RM nel mix con RCA
- $V_{NM}^{RCA-concrete}$ è la quantità di nuova malta nel mix con RCA
- $V_{OVA}^{RCA-concrete}$ è la quantità di OVA nel mix con RCA

Va sottolineato che la differenza di resistenza e densità della RM rispetto alla NM e la differenza tra gli OVA e gli NA dal punto di vista della forma e/o tipo può portare a differenze minime nelle proprietà tra il mix RAC e il suo equivalente NAC. Inoltre, va sottolineato che la malta residuale attaccata è di buona qualità in quanto quella danneggiata generalmente non resiste alle forze agenti durante la frantumazione.

Per soddisfare la condizione di egual volume di NCA nei mix deve essere conosciuto $V_{OVA}^{RCA-concrete}$, il quale a sua volta può essere determinato conoscendo l'RMC, ovvero il contenuto di RM, il peso specifico degli OVA e il loro volume. Si avrà quindi:

$$V_{OVA}^{RCA-concrete} = V_{RCA}^{RCA-concrete} (1 - RMC) \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}} \quad (6)^9$$

In cui:

- $V_{RCA}^{RCA-concrete}$ è il volume degli RCA nel mix con RCA
- SG_b^{RCA} è il peso specifico degli RCA
- SG_b^{OVA} è il peso specifico degli OVA

Usando la (1), (3), (5) e (6) è possibile calcolare i volumi e le masse di RCA richiesti nel mix con RCA:

$$V_{RCA}^{RCA-concrete} = \frac{V_{NCA}^{NAC} (1 - R)}{(1 - RMC) \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}}} \quad (7)$$

$$V_{NCA}^{RCA-concrete} = V_{NCA}^{NAC} R \quad (8)$$

$$W_{OD-RCA}^{RCA-concrete} = V_{RCA}^{RCA-concrete} SG_b^{RCA} 1000 \quad (9)$$

$$W_{OD-NCA}^{RCA-concrete} = V_{NCA}^{RCA-concrete} SG_b^{NCA} 1000 \quad (10)$$

Dove:

- $W_{OD-RCA}^{RCA-concrete}$ è il peso di RCA asciutti nel mix con RCA
- $W_{OD-NCA}^{RCA-concrete}$ è il peso di NA asciutti nel mix con RCA
- SG_b^{NCA} è il peso specifico degli NCA

Determinazione dell'acqua, del cemento e del quantitativo di fini nel mix RCA

Per soddisfare l'equazione (2) deve essere determinato $V_{RM}^{RCA-concrete}$, il quale può essere ottenuto sottraendo $V_{OVA}^{RCA-concrete}$ da $V_{RCA}^{RCA-concrete}$:

$$V_{RM}^{RCA-concrete} = V_{RCA}^{RCA-concrete} \left(1 - (1 - RMC) \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}} \right) \quad (11)$$

⁹ Ottenuta a partire da un bilancio di massa: $M_{RCA}^{RCA} = M_{OVA}^{RCA} + M_{RM}^{RCA}$

Usando le equazioni (2), (4) e (11) il volume di nuova malta può essere determinato come:

$$V_{NM}^{RCA-concrete} = V_M^{NAC} - V_{RM}^{RCA-concrete} \quad (12)$$

Moltiplicando le quantità nel mix NAC per il rapporto $V_{NM}^{RCA-concrete} / V_M^{NAC}$ si possono ricavare le quantità di sabbia, cemento e acqua nel mix RCA come:

$$W_w^{RCA-concrete} = W_w^{NAC} \frac{V_{NM}^{RCA-concrete}}{V_M^{NAC}} \quad (13)$$

$$W_c^{RCA-concrete} = W_c^{NAC} \frac{V_{NM}^{RCA-concrete}}{V_M^{NAC}} \quad (14)$$

$$W_{OD-FA}^{RCA-concrete} = W_{OD-FA}^{NAC} \frac{V_{NM}^{RCA-concrete}}{V_M^{NAC}} \quad (15)$$

In cui:

- $W_w^{RCA-concrete}$ e W_w^{NAC} è il peso dell'acqua
- $W_c^{RCA-concrete}$ e W_c^{NAC} è il peso del cemento
- $W_{OD-FA}^{RCA-concrete}$ e W_{OD-FA}^{NAC} è il peso dei fini in condizione asciutte

Per diversi gradi di sostituzione, risulteranno diverse proporzioni, ma tutti i mix avranno la stessa TM e lo stesso quantitativo di NCA. Si noti che differenti gradi di sostituzione, al contrario del mix design tradizionale, non portano a un aumento del quantitativo di malta nel RAC rispetto al NAC.

Minimo grado di sostituzione nel mix RCA

Sebbene è desiderabile avere solo RCA nei mix, basandosi su questo mix design c'è un limite massimo di quantitativo, funzione dell'RMC. Per investigare gli effetti dell'RMC è necessario prendere in considerazione i limiti teorici dello 0% e del 100%.

In assenza di RM, l'RCA risulta pari a un NCA e il rapporto $\frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}}$ è uguale a 1. Di conseguenza anche $\frac{V_{RCA}^{RCA-concrete}}{V_{NCA}^{NAC}}$ è pari a 1. Può essere utilizzato il mix design tradizionale.

Quando RMC è 100%, $V_{RCA}^{RCA-concrete}$ cresce iperbolicamente e $\frac{V_{RCA}^{RCA-concrete}}{V_{NCA}^{NAC}}$ tende a ∞ . Questa condizione si traduce nella pratica in un aggregato costituito solo da RM e senza l'OVA. Il suo contributo nel mix consiste solo in un apporto di malta.

Per bassi RMC, il $V_{RCA}^{RCA-concrete}$ richiesto per mantenere uguale al mix NAC il quantitativo di TM e NCA rimane entro valori accettabili, ma per alti valori di RMC, $V_{RCA}^{RCA-concrete}$ cresce proporzionalmente.

Il massimo quantitativo di aggregati grossi che possono essere inseriti in un mix di volume unitario, comprensivo di RCA, è pari al volume di questi aggregati compattati e in condizioni asciutte ($V_{DR-RCA}^{RCA-concrete}$). Quindi, il massimo volume di RCA aggiungibile a un volume unitario di mix RCA è:

$$V_{max\ RCA}^{RCA-concrete} = \frac{SG_{DR}^{RCA}}{SG_b^{RCA}} \quad (16)$$

Dove SG_{DR}^{RCA} è il peso specifico in condizioni asciutte e sotto compattazione.

Per alti RMC, non è possibile inserire il $V_{RCA}^{RCA-concrete}$ richiesto in un volume unitario di mix. In altre parole, non è possibile usare il 100% di RCA ma è necessario un certo quantitativo di NCA per compensare questa carenza ($R > 0$).

Il volume di NCA in NAC nella (7) può essere correlato con il volume in condizioni asciutte e sotto compattazione (V_{DR-NAC}^{NAC}) secondo la (17):

$$V_{NCA}^{NAC} = V_{DR-NAC}^{NAC} \frac{SG_{DR}^{NCA}}{SG_b^{NCA}} \quad (17)$$

In cui SG_{DR}^{NCA} è il peso specifico di NCA in condizioni asciutte e sotto compattazione.

Sostituendo le equazioni (16) e (17) nella (7) si ottiene il minimo grado di sostituzione R_{min} :

$$R_{min} = 1 - \frac{(1 - RMC)}{V_{DR-NAC}^{NAC}} \times \frac{SG_{DR}^{RCA}}{SG_{DR}^{OVA}} \times \frac{SG_b^{NCA}}{SG_b^{OVA}} \geq 0 \quad (18)$$

Assumendo la stessa forma e taglia tra RCA e NCA si può scrivere che:

$$\frac{SG_{DR}^{RCA}}{SG_{DR}^{NCA}} = \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{NCA}} \quad (19)$$

Assumendo che l'NCA sia simile all'OVA nell'RCA il rapporto $\frac{SG_b^{NCA}}{SG_b^{OVA}}$ nella (18) è 1. Sostituendo quindi la (19) nella (18) si ottiene:

$$R_{min} = 1 - \frac{(1 - RMC)}{V_{DR-NAC}^{NAC}} \times \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{NCA}} \geq 0 \quad (20)$$

Conoscendo il volume di NCA compattato in condizioni asciutte nel mix NAC, per esempio dalla Tabella A.1.5.3.6 of ACI-211.1-97 (ACI Committee 211 1997 [237]), e il peso specifico di RCA e NCA, il minimo quantitativo di NCA nel mix RCA può essere calcolato dalla precedente equazione (20)¹⁰.

Come detto precedentemente, quando RMC è 100%, $V_{RCA}^{RCA-concrete}$ cresce iperbolicamente e $\frac{V_{RCA}^{RCA-concrete}}{V_{NCA}^{NAC}}$ tende a ∞ .

Però se nella (7) (1-R) al numeratore è posto uguale al denominatore, $(1 - RMC) \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}}$, l'equazione risultante è valida per ogni RMC. La spiegazione fisica di quest'ultima azione è il rimpiazzamento del volume di RM degli RCA con gli NCA ($V_{NCA}^{RCA-concrete} = V_{RM}^{RCA-concrete}$) per compensare la carenza di NCA nel mix RCA in rapporto a quelli presenti nel mix NAC. Perciò:

$$R = \frac{V_{RM}^{RCA-concrete}}{V_{RCA}^{RCA-concrete}} \quad (21)$$

¹⁰ Per esempio: con un aggregato di dimensione massima 19 mm e modulo di finezza di 2.6 per il fine, la Tabella A.1.5.3.6 of ACI-211.1-97 (ACI Committee 211 1997) restituisce $V_{DR-NAC}^{NAC} = 0.64$.

Usando l'RCA-M di questo studio, con $SG_b^{RCA} = 2.31$, RMC=41% e $SG_b^{NCA} = 2.70$, $R_{min} = 21\%$. Ciò significa che per un mix composto da RCA-M almeno il 21% dell'aggregato grosso deve essere costituito da NCA.

Usando l'RCA-V di questo studio invece, con $SG_b^{RCA} = 2.42$, RMC=23% e $SG_b^{NCA} = 2.72$, $R_{min} = -7\%$. Ciò significa che per un mix composto da RCA-V si possono non usare NCA.

Sostituendo la (21) e la (11) nella (7), il volume di NCA e RCA richiesto può essere trovato tramite:

$$V_{RCA}^{RCA-concrete} = V_{NCA}^{NAC} \quad (22)$$

$$V_{NCA}^{RCA-concrete} = V_{NCA}^{NAC} \left(1 - (1 - RMC) \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}} \right) \quad (23)$$

In questo studio quest'ultimo approccio è stato usato per calcolare le masse di NCA e RCA richieste in un mix RAC attraverso l'utilizzo del metodo EMV. Usando le equazioni (22) e (23) al posto della (7) e (8) e le equazioni (12)-(15) le proporzioni del mix sono ottenute.

Massimo contenuto di malta residua nel mix RAC con il 100% di RCA

Riarrangiando la (20) il massimo RMC per i mix con il 100% di RCA è:

$$RMC_{max} \% = \left(1 - V_{DR-NCA}^{NAC} \frac{SG_b^{NCA}}{SG_b^{RCA}} \right) 100 \quad (24)$$

Se l'RMC di un aggregato è maggiore dell'RMC massimo non è possibile rimpiazzare completamente gli NCA e soddisfare i requisiti specifici del calcestruzzo fresco e indurito dell'equivalente mix NAC¹¹.

Validazione sperimentale

Per validare il metodo proposto sono stati creati dei mix utilizzando prima il metodo ACI per il calcestruzzo tradizionale (ACI Committee 211 1997 [237]), trattando gli RCA come aggregati naturali di analoghe proprietà fisiche (la gravità specifica dell'aggregato (AC) e la porosità sono state determinate utilizzando procedure standardizzate ASTM 2003 [238]), e successivamente il metodo EMV.

Il valore di RMC è stato ottenuto con un nuovo metodo in cui l'RCA è sottoposto a cicli di gelo-disgelo mentre è immerso in una soluzione di solfato di sodio. Una spiegazione schematica è descritta nel seguito ed è meglio approfondita in [239].

Determinazione del contenuto di malta residua (RMC)

Sono stati usati 10 campioni in frazioni granulometriche individuali per determinare l'RMC dell'RCA ed è stato determinato un RMC medio pesato per l'RCA miscelato (35% per la frazione 4.75-9.5 mm, 25% per la frazione 9.5-12 mm e 40% per la frazione superiore a 12 mm).

I campioni rappresentativi sono stati ottenuti mediante il metodo della divisione in quarti (Herubin and Marotta 1987 [240]) usata per gli NCA e i quantitativi dei campioni sono di circa 1000 g per la frazione 4.75-9.5 mm e 2000 g per le frazioni superiori.

Dopo averli fatti asciugare per 24 ore a 105°C il campione viene immerso per 24 ore in una soluzione di solfato di sodio al 26% in peso e viene sottoposto a cinque cicli di gelo-disgelo, ossia viene posto per 16 h a -17°C (le stesse condizioni usate per la ASTM C 672 e 8 ore in forno a 80°C. Dopo l'ultimo ciclo la soluzione è stata drenata dal campione e l'aggregato è stato lavato con acqua su un setaccio N°4 (4.75 mm). Successivamente l'aggregato viene posto in forno a 105°C per 24h e dopo ne viene misurata la massa. L'RMC è ottenuta come:

$$RMC\% = \frac{W_{RCA} - W_{OVA}}{W_{RCA}} 100$$

¹¹ Nel caso dell'RCA-M il massimo di RMC è 25.2% mentre quello dell'aggregato è del 41%. Ciò significa che non è possibile un mix con solo riciclati.

Nel caso dell'RCA-V il massimo di RMC è 28.1% mentre quello dell'aggregato è del 23%. Contrariamente al primo caso è quindi possibile creare un mix in cui l'aggregato grosso è costituito solo da RCA-V

Dove:

- W_{RCA} massa del campione secco prima del test (g)
- W_{OVA} massa del campione secco dopo rimozione della RM (g)

La Tabella 38 mostra l'AC medio pesato, la densità, la densità SSD, e il peso specifico apparente di RCA-M, RCA-V, calcare naturale, ghiaia naturale e sabbia di fiume.

Gli OVA in RCA-M e RCA-V sono rispettivamente calcari naturali e ghiaia naturale rispettivamente. Sia i naturali che i riciclati hanno un diametro massimo nominale di 19 mm. Gli aggregati sono stati asciugati all'aria individualmente e poi mixati per produrre la granulometria voluta.

Le proprietà medie pesate riportate in Tabella 38 sono state ottenute moltiplicando la percentuale di quella frazione per la rispettiva proprietà. Gli aggregati grossi sono stati bagnati preventivamente mentre i fini sono stati mantenuti umidi per 24 ore prima della miscelazione (Lamond et al. 2002 [241]; Abbas et al. 2008 [239]).

Le misure effettuate includono la misura dello slump, del contenuto d'aria, della densità, della resistenza a compressione e del modulo elastico, misurate secondo le norme ASTM più appropriate. In particolare, il modulo elastico si riferisce al modulo elastico secante.

Le procedure per la maturazione e la creazione dei provini sono state prese dalla ASTM C 192/ C192M-02 (ASTM 2003) e tutte le proprietà sono state misurate a 28 giorni.

Tabella 38: proprietà fisiche medie degli aggregati [236]

Aggregate	Moisture Content (%)	Absorption Content (%)	Specific Gravity			RMC ^a (%)
			Bulk	SSD	Apparent	
RCA-M	1.1	5.4	2.31	2.42	2.64	41
RCA-V	1.3	3.3	2.42	2.50	2.64	23
Limestone	0.2	0.34	2.70	2.71	2.73	—
River Gravel	0.2	0.89	2.72	2.74	2.79	—
River Sand ^b	4	0.54	2.70	2.72	2.76	—

^aResidual mortar content=oven-dry weight of residual mortar/oven-dry weight of RCA.

^bFinesness modulus of 2.60.

Nei mix preparati con il metodo ACI è stato prima preparato il mix con il 100% di RCA grossi, mentre una seconda serie di mix è stata preparata con il metodo EMV.

Per entrambi i set il w/c è 0,45 e in alcuni casi sono stati utilizzati agenti aeranti e riduttori di acqua. Sono stati aggiunti anche in alcuni mix, vista la notevole presenza nei calcestruzzi moderni, ceneri volanti e scorie di altoforno granulari macinate (bfs), e ne sono stati investigati gli effetti.

Come cemento è stato usato un Tipo I Portland con una gravità specifica media di 3,15, mentre le ceneri volanti sono provenienti da Sundance, Alberta, Canada e sono Type CI¹² secondo la classificazione CSA, con gravità specifica media di 2,01, e le BFS sono Grade 80¹³ con gravità specifica media di 2,99.

Nella Tabella 39 sono indicati i quantitativi usati nei mix e la nomenclatura utilizzata per designarli. In particolare, si evidenzia che la prima lettera indica se sono fatti con il metodo Equivalent Mortar Volume [236], indicato con la E, o con il metodo tradizionale, indicato con la C.

¹² Costituite da una percentuale di CaO compresa tra il 6 e il 20% in peso e una percentuale cumulata di SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ compresa tra il 70 e il 100% in peso.

¹³ Lo standard ASTM C-989-09 ammette: Grade 80, Grade 100, Grade 120. Il "Grade" dipende dalla qualità e dalla finezza della scoria ed è determinata dalla resistenza ottenuta miscelandola a un'equivalente massa di cemento Portland. Il numero è determinato dal rapporto percentuale tra la resistenza a compressione media del campione cubico di riferimento con una determinata scoria e la resistenza a compressione media del campione cubico confezionato con la scoria utilizzata.

Il quantitativo di RCA è stato ottenuto dividendo il peso asciutto (all'aria) dell'RCA per il peso asciutto totale (all'aria) degli aggregati grossi.

Si osservi che il metodo EMV richiede meno cemento del metodo tradizionale e di conseguenza rende il cemento più eco-friendly.

Come si può osservare il mix senza RCA richiede più di 400 kg/m^3 mentre i mix con gli RCA e preparati con il metodo EMV richiedono per quello contenente RCA-M 352 kg/m^3 e per quello contenente RCA-V 377 kg/m^3 .

I risultati dei test sono analizzati comparando lo slump, la densità, la resistenza a compressione e il modulo elastico dei RAC rispetto ai NAC. I risultati indicati sono la media di tre misurazioni effettuate su tre campioni diversi.

Tabella 39: proporzioni dei mix [236]

Mix ID	RCA content %	Mix Proportions (kg/m^3)						Coarse aggregate			Air content (%)
		Water	Cement	Fly ash	bfs	Sand	RCA	NA	WRA (ml/m^3)	AE (ml/m^3)	
CM-C	100	156	349	0	0	888	792	0	1,396	35	6.9
CM-F	100	157	262	87	0	888	792	0	None	209	7.4
CM-B	100	155	227	0	122	888	792	0	523	35	6
EM-C	63.5	151	335	0	0	630	720	414	1,005	33	6
EM-F	63.5	151	251	84	0	630	720	414	606	201	5.7
EM-B	63.5	149	218	0	117	630	720	414	1,339	33	5.7
CL-C	0	193	430	0	0	808	0	833	None	86	6.3
CV-C	100	156	349	0	0	857	867	0	1,047	35	7.4
CV-F	100	157	262	87	0	857	867	0	None	209	6
CV-B	100	155	227	0	122	857	867	0	1,047	35	7.1
EV-C	74.3	161	358	0	0	645	813	281	1,075	36	6
EV-F	74.3	161	269	90	0	645	813	281	None	215	5.5
EV-B	74.3	160	233	0	125	645	813	281	1,792	36	6.8
CG-C	0	191	424	0	0	765	0	898	None	85	6.3

Mix designation nomenclature (1) E or C: mix proportioned based on EMV (E) or conventional method (C); (2) M, V, L, or G: mix made with RCA-M (M), RCA-VA (V), natural limestone (L), or natural gravel (G); and (3) C, F, or B: mix made with ordinary portland cement only (C), cement plus fly ash (F), or cement plus bfs (B).

Slump

Il Grafico 6 mostra gli effetti del mix design sullo slump.

Generalmente i RAC fatti con il metodo EMV hanno valori maggiori rispetto a quelli fatti con il metodo tradizionale, a parità di w/c.

Infatti, i mix EM-C e EM-B hanno il 50 e il 45% in più di slump rispetto a CM-C e CM-B rispettivamente.

Similmente EV-C, EV-B e EV-F hanno il 100, 56 e 36% di slump in più rispetto a CV-C, CV-B e CV-F.

Inoltre, il cemento e l'acqua dei RAC prodotti con entrambi i metodi sono identici per ogni fonte degli RCA. Va sottolineato infine che lo slump dei mix prodotti con il metodo EMV è adatto per la maggior parte delle tipologie di costruzioni.

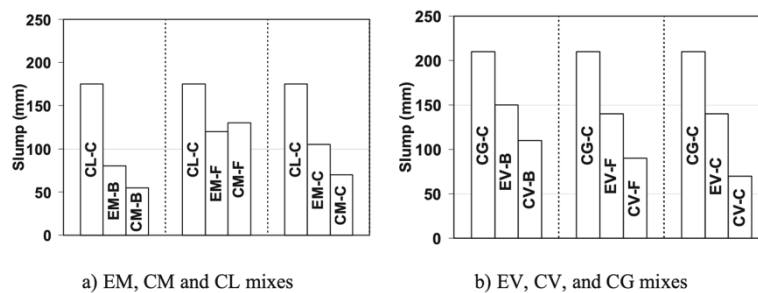


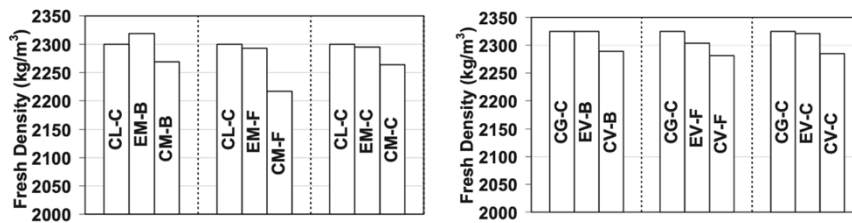
Grafico 6: effetti del mix design sullo slump [236]

Densità del calcestruzzo fresco e indurito

Il Grafico 7 e il Grafico 8 mostrano gli effetti del mix design sulla densità del calcestruzzo fresco e indurito. Generalmente con il mix design tradizionale i RAC (CM e CV) hanno densità inferiori comparate ai rispettivi NAC (CL e CG). Questo è dovuto al fatto che il mix design tradizionale porta a un quantitativo di TM maggiore nel RAC rispetto al NAC. Al contrario il metodo EMV porta a densità più alte per tutti i RAC (EM e EV).

In tutti i mix EM e EV i valori di densità dell'impasto fresco sono maggiori dei corrispondenti CM e CV, ma poco minori dei rispettivi CL-C e CG-C mix. Questo è dovuto al fatto che EM e EV hanno lo stesso quantitativo di TM dei corrispondenti CL-C e CG-C.

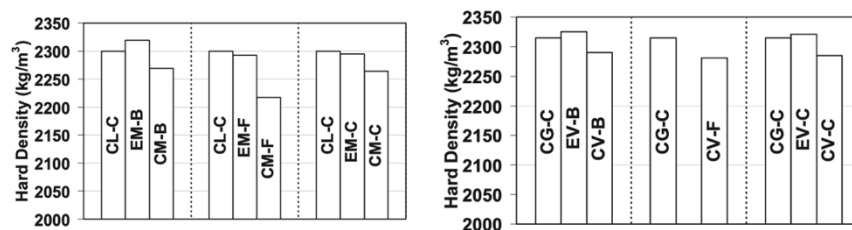
Il leggero incremento di densità di CL-C e CG-C rispetto a EM e EV è dovuto al fatto che l'RM contenuta nella TM ha una gravità specifica minore comparata rispetto alla malta fresca nei CL-C e CG-C.



a) EM, CM and CL mixes

b) EV, CV, and CG mixes

Grafico 7: effetto del mix design sulla densità del calcestruzzo fresco [236]



a) EM, CM and CL mixes

b) EV, CV, and CG mixes

Grafico 8: effetto del mix design sulla densità del calcestruzzo indurito [236]

Resistenza a compressione

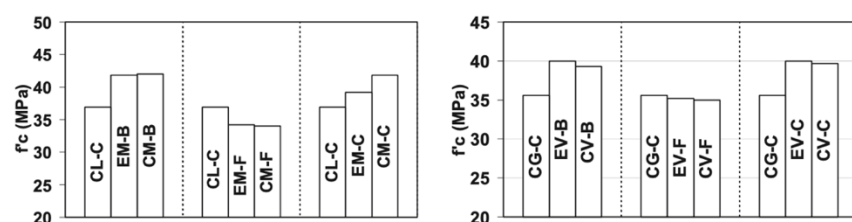
Nel Grafico 9 sono mostrati gli effetti del mix design sulla resistenza a compressione.

Eccetto per CM-F e CV-F, la resistenza degli altri mix CM e CV è del 12-14% e 10-12% più alta dei corrispondenti CL-C e CG-C. Questo è dovuto principalmente all'additivo riduttore di acqua addizionato nei mix CM-C e CM-B che ha come conseguenza un miglioramento della qualità della malta.

Usando il metodo EMV si ha che tutti gli EM e EV hanno una resistenza del 6 e 13% maggiore rispetto ai rispettivi CL-C e CG-C. La più alta resistenza di EM-B rispetto a EM-C può essere attribuita all'effetto di densificazione delle bfs sulla microstruttura del cemento idratato risultante in una resistenza maggiore.

Si noti però che i mix CM-F ed EM-F hanno una resistenza del 7-8% minore rispetto al CL-C, indistintamente dal metodo di mix design. Questo è dovuto alla bassa spigolosità dell'RCA-M rispetto al calcare frantumato.

Invece per i mix CV-F e EV-F la resistenza è comparabile al CG-C perché la spigolosità e la rugosità dell'RCA-V comparata alla ghiaia naturale.



a) EM, CM and CL mixes

b) EV, CV, and CG mixes

Grafico 9: effetti del mix design sulla resistenza a compressione [236]

Modulo elastico

Il Grafico 10 mostra gli effetti del mix design sul modulo elastico.

Generalmente usando il mix design tradizionale si ha che i mix CM e CV hanno un modulo elastico minore dei rispettivi CL-C e CG-C.

Contrariamente, con il metodo EMV si ha che EM-C e EM-V hanno modulo elastico dell'11-14% maggiore rispetto a CL-C e CG-C. Quindi il modulo elastico di EV-C è sempre maggiore del CG-C. I risultati mostrano quindi che con il metodo EMV non si hanno bassi valori dei moduli elastici per i RAC. Gli alti moduli osservati possono essere attribuiti all'egual quantità di NCA tra i mix EM e CL-C e tra EV e CG-C.

Si noti che l'aggiunta dell'additivo riduttore di acqua non altera il volume di TM, il rapporto w/c o altre proporzioni di questi mix rispetto ai NAC. L'agente riducente è stato usato semplicemente per migliorare la lavorabilità e di conseguenza l'alto modulo elastico determinato non può essere ascritto. Il modulo elastico più alto di EM-B rispetto a quello di EM-C può essere dovuto all'azione densificante delle bfs sulla microstruttura del cemento idratato che porta all'alto valore determinato. Essendo basso il valore di RMC in RCA-V, la differenza tra i moduli di EV-C e EV-B è minima. Il modulo elastico di EM-F e EV-F è comparabile o maggiore di CL-C e CG-C, ma maggiore del 10 e 12% di CM-F e CV-F rispettivamente.

I risultati precedenti mostrano che l'utilizzo del metodo EMV, contrariamente al metodo tradizionale, porta a una predizione corretta delle proprietà meccaniche dei RAC.

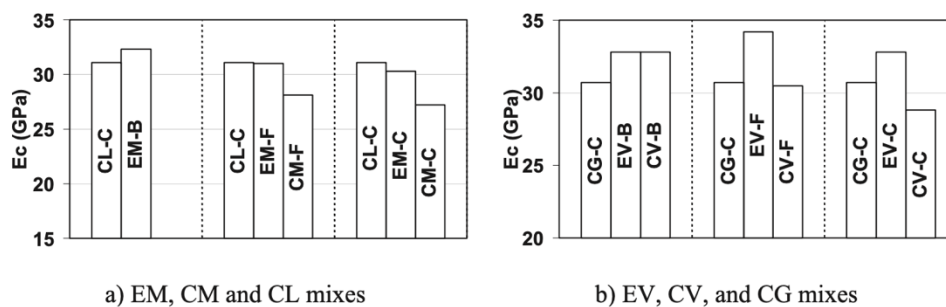


Grafico 10: effetti del mix design sul modulo elastico [236]

Analisi statistica

Per assicurarsi che i risultati conseguiti con il metodo EMV non siano dovuti a variazioni casuali delle proprietà del calcestruzzo è stata effettuata un'ANOVA per analizzare le proprietà dei RAC preparati con il metodo proposto rispetto a quelli preparati con il metodo tradizionale.

La Tabella 40 presenta i risultati delle analisi su densità del calcestruzzo indurito, resistenza a compressione e modulo elastico dei RAC.

Per la densità del calcestruzzo indurito si osserva che i valori p , con o senza ceneri volanti e/o bfs, sono generalmente compresi nel range 0,01-0,10% per i mix con RCA-M e 0,31-6,43% per i mix con RCA-V, che sono generalmente minori della soglia di errore accettabile del 5%.

Il valore p per i mix con le ceneri volanti è del 6,43%, leggermente superiore al limite del 5% ma ancora ragionevole.

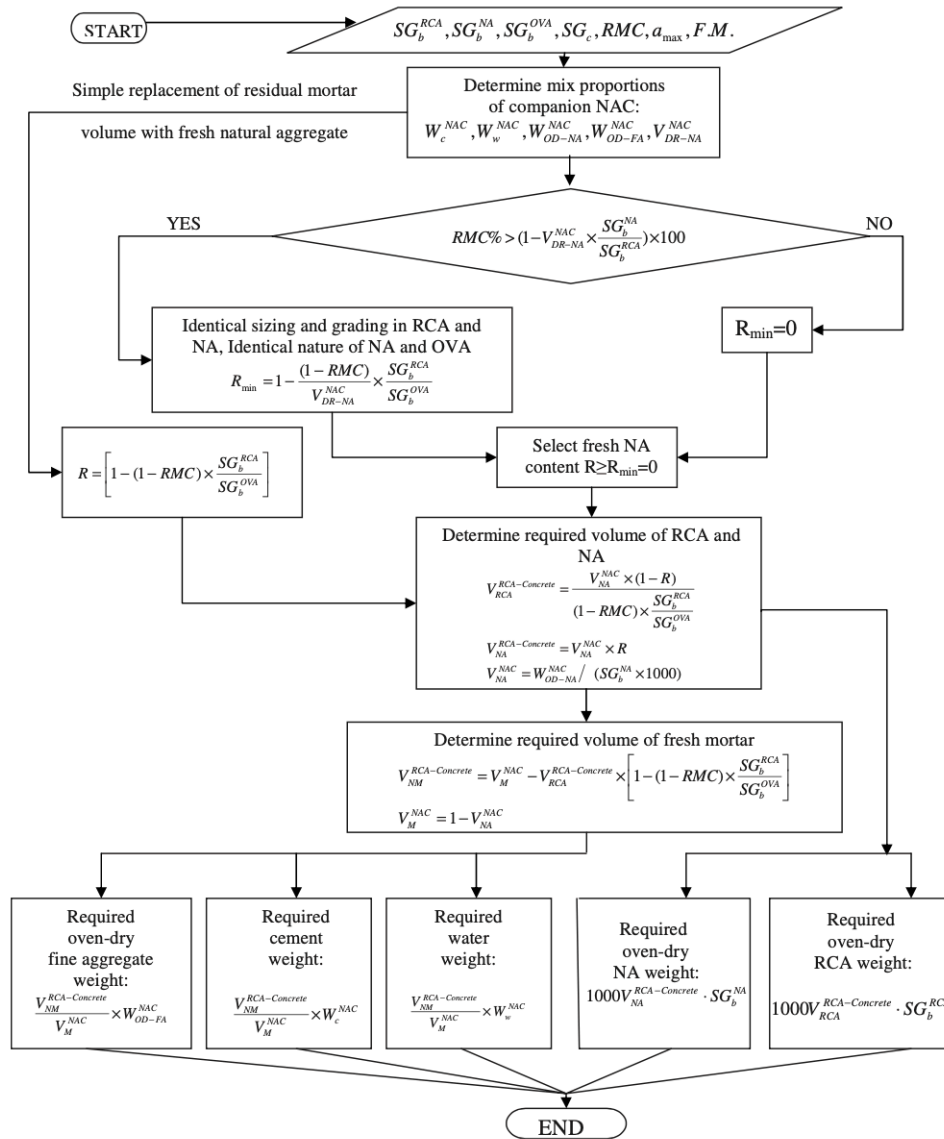
Similmente il valore p per tutti i mix, con o senza ceneri volanti e/o bfs, è nel range 0,88-1,90% per i mix con RCA-M e 0,04-1,25% per i mix con RCA-V, minori della soglia di errore accettabile del 5%.

Però nei mix con RCA-V e ceneri volanti il valore di p è 98,34% che è un valore molto alto. Sebbene un valore così indichi che il metodo di mix design non è un parametro importante, si osservi che questo valore è causato dal basso modulo elastico di un solo mix. Questo potrebbe essere un outlier statistico perciò va trattato con cautela. Per quanto riguarda i valori p per la resistenza a compressione tutti i valori sono maggiori del 5% limite, e maggiori anche del 60%, indice del fatto che il metodo di mix design non è significativo per la resistenza.

Queste conclusioni sono consistenti con le anticipazioni fatte in precedenza, ovvero che usando il mix design tradizionale si può raggiungere la stessa resistenza ma non lo stesso modulo elastico.

Tabella 40: risultati ANOVA [236]

Mix ID	Elastic modulus, E_c (GPa)	Compressive strength, f'_c (MPa)	Hardened density, γ_c (kg/m ³)	f'_c	γ_c	E_c
CM-C	28	42	2,264			
	28.4	41.3	2,266			
	—	42.2	2,263			
EM-C	31	40.6	2,293			
	31.8	39.8	2,298			
	—	37.3	2,295	6.52	0.01	1.90
CM-F	28	34.5	2,215			
	28.2	32.8	2,221			
	—	34.6	2,216			
EM-F	30.7	35.2	2,286			
	31.2	33.3	2,300			
	—	34.2	2,292	75.60	0.01	0.88
CM-B	—	42	2,267			
	—	43	2,270			
	—	41	2,270			
EM-B	31.9	41.2	2,308			
	32.7	41.7	2,322			
	—	42.6	2,327	82.54	0.10	—
CV-C	31.2	41.2	2,283			
	31.4	39.3	2,278			
	—	38.5	2,293			
EV-C	32.8	41	2,316			
	32.8	40.2	2,328			
	32.7	38.9	2,319	73.44	0.31	0.04
CV-F	31.2	34.3	2,276			
	29.8	36.1	2,277			
	—	34.7	2,291			
EV-F	34.2	33	2,312			
	34.8	36.5	2,289			
	33.6	36.1	2,310	89.90	6.43	1.25
CV-B	32.4	39.1	2,273			
	33.8	41.6	2,292			
	32.2	37.2	2,301			
EV-B	34.1	40.8	2,332			
	34.4	38.7	2,320			
	30	40.4	2,323	66.48	1.57	98.34



Schema 2: diagramma di flusso EMV [236]

8. IL PROGETTO INIZIALE

8.1 Premessa

Il lavoro di ricerca iniziale, interrotto a causa dell'emergenza Covid-19, prevedeva una serie di prove condotte in laboratorio, aventi lo scopo di studiare e migliorare le proprietà meccaniche di calcestruzzi confezionati con RCA prodotti dalla F.G. srl di Pianezza e di confrontarne le proprietà con calcestruzzi aventi uguali caratteristiche meccaniche, ma confezionati con NCA prodotti dalla stessa azienda.

La F.G. srl è un'azienda attiva ormai da anni nel settore delle escavazioni, delle demolizioni e della produzione di aggregati. Inizialmente l'azienda si occupava solamente di movimento terra, ma con il passare degli anni ha ampliato il suo core business aggiungendo, nel 2008, tra le sue attività, la produzione di aggregati naturali e riciclati.

Poiché come evidenziato nei capitoli iniziali, l'utilizzo degli RCA all'interno delle costruzioni ha avuto e ha tutt'ora un ruolo di nicchia, dovuto essenzialmente a lacune normative e scientifiche, si era deciso di effettuare questo lavoro di ricerca per ottenere un prodotto valido ed ecosostenibile, dimostrando la validità di queste materie prime secondarie.

8.2 Inquadramento del lavoro

Nel seguito si darà un inquadramento generale del lavoro per poi entrare nel dettaglio nei paragrafi successivi.

Per l'obiettivo prefissato si è proceduto per step andando a migliorare le criticità individuate negli step precedenti. Si prevedeva di realizzare n. 5 provini contenenti NCA e n. 5 provini contenenti RCA per i primi tre step, in modo da avere dei dati statisticamente significativi. Per il quarto e quinto set di provini era prevista la realizzazione di soli n. 5 provini secondo le indicazioni che verranno date successivamente.

Inizialmente è stato effettuato un primo tentativo creando un cassero in legno, di forma cubica e lato 100 mm, rivestito con un film plastico per facilitare la scasseratura del provino. Il mix è stato fatto con rapporti tra i costituenti molto qualitativi, che saranno illustrati successivamente, in quanto non erano richiesti particolari target di resistenza ma serviva solo per valutare la bontà del cassero.

È stato osservato che questo tipo di rivestimento non permetteva la realizzazione di un provino perfettamente cubico a causa del rivestimento plastico che creava deformazioni superficiali e angoli smussati; perciò nel secondo step si è passati alla realizzazione di n°2 casseri in legno, contenenti ciascuno 4 provini, sigillati tramite silicone nelle giunture. In questo modo è stato possibile utilizzare un olio disarmante al posto del film plastico e risolvere così i problemi riscontrati nella prima prova.

Per queste prime prove i materiali utilizzati sono sempre stati gli stessi, come anche gli additivi e il metodo di mix design.

Nel seguito verrà illustrato ciò che era stato previsto per la prosecuzione del lavoro.

Per il terzo set di provini era stato previsto di cambiare l'additivo e il disarmante e passare a dei casseri commerciali in polistirolo espanso (Figura 98), di forma cubica e lato di 150 mm in modo da raggugiarsi con le NTC 2018 [35] Sottoparagrafo 11.2.1.



Figura 98: casseri cubici in polistirolo, lato 150 mm

Inoltre, si prevedeva di aggiungere un terzo aggregato naturale avente il compito di colmare il vuoto della frazione intermedia per entrambi i mix.

Nel quarto set era stata decisa di optare la sostituzione della sabbietta riciclata con la sabbia naturale prodotta da terzi, così da evidenziare l'influenza della tipologia di frazione fine utilizzata.

Nel quinto set era invece previsto di utilizzare gli aggregati del precedente set ma utilizzando il metodo di mix design "Equivalent Mortar Volume" [236] in modo da evidenziare gli effetti di differenti tipologie di mix design sul RAC preparato.

Tutti i set di provini sono stati lasciati a maturare un giorno nei casseri e i successivi 27 in immersione in acqua prelevata dalla rete idrica.

Per la prova effettuata, la resistenza a compressione dei provini è stata valutata a 28 giorni, come indicato da NTC 2018 [35], tramite il laboratorio MASTRLAB del DISEG.

Per semplicità di scrittura nel seguito verranno identificati i provini confezionati con riciclati con la lettera R seguita da un numero compreso tra 1 e 5, indicante il set di provini di appartenenza, seguito da un punto e un numero, indicante lo specifico provino. Lo stesso codice identificativo verrà utilizzato per i provini confezionati interamente con aggregati naturali che verranno però identificati in questo caso con la lettera N.

Riguardo le specifiche per i componenti del calcestruzzo si è fatto riferimento al Sottoparagrafo 11.2.9 "Leganti" delle NTC 2018 [35].

In merito al quantitativo di aggregati riciclati non si è seguito ciò che definiva la norma in termini di percentuale di RCA in funzione della resistenza caratteristica R_{ck} ma si è andati a studiare come variano le proprietà meccaniche per quantitativi più alti di RCA.

In merito agli additivi sono stati utilizzati solo quelli conformi alla normativa vigente, Sottoparagrafo 11.2.9.4 "Additivi". Per l'acqua di impasto è stata usata acqua prelevata dalla rete idrica del Politecnico. Si darà ora una panoramica più specifica dei costituenti utilizzati per le miscele.

8.2 I materiali utilizzati

Aggregati

Gli aggregati utilizzati sono prodotti nello stabilimento della F.G. srl, situato in Strada Cassagna SN nel comune di Pianezza in provincia di Torino, e hanno due tipi di provenienza: naturale, da escavazione di terreno in situ, e riciclato, proveniente dal trattamento di rifiuti da costruzione e demolizione.

Gli aggregati utilizzati tra quelli a listino sono i seguenti, indicati con la denominazione commerciale e da marcatura:

- sabbietta riciclata (da marcatura CE: Sabbietta riciclata 0/5,6, All. 13, Figura 99);



Figura 99: sabbietta riciclata

- frantumato riciclato 15/30 (da marcatura CE: Riciclato 8/22,4, All. 14, Figura 100);



Figura 100: Frantumato riciclato 15/30

- pietrisco 5/15 (da marcatura CE: Ghiaia 6,3/16, All. 9);



Figura 101: Pietrisco 5/15

- pietrisco 15/30 (da marcatura CE: Ghiaia 8/22,4, All. 12, Figura 102);



Figura 102: Pietrisco 15/30

In aggiunta a questi prodotti è stato utilizzato come aggregato fine, per i provini costituiti da aggregati naturali, una sabbia naturale granita con granulometria 0/5,6 proveniente da terzi (All.1, Figura 103). Questo materiale è stato utilizzato in sostituzione alla sabbia naturale prodotta dalla F.G. srl (All. 16) in quanto contenente un minore quantitativo di impurità come si può vedere dal ridotto valore del “Contenuto di polveri” e dal confronto delle rispettive curve granulometriche.



Figura 103: Sabbia granita

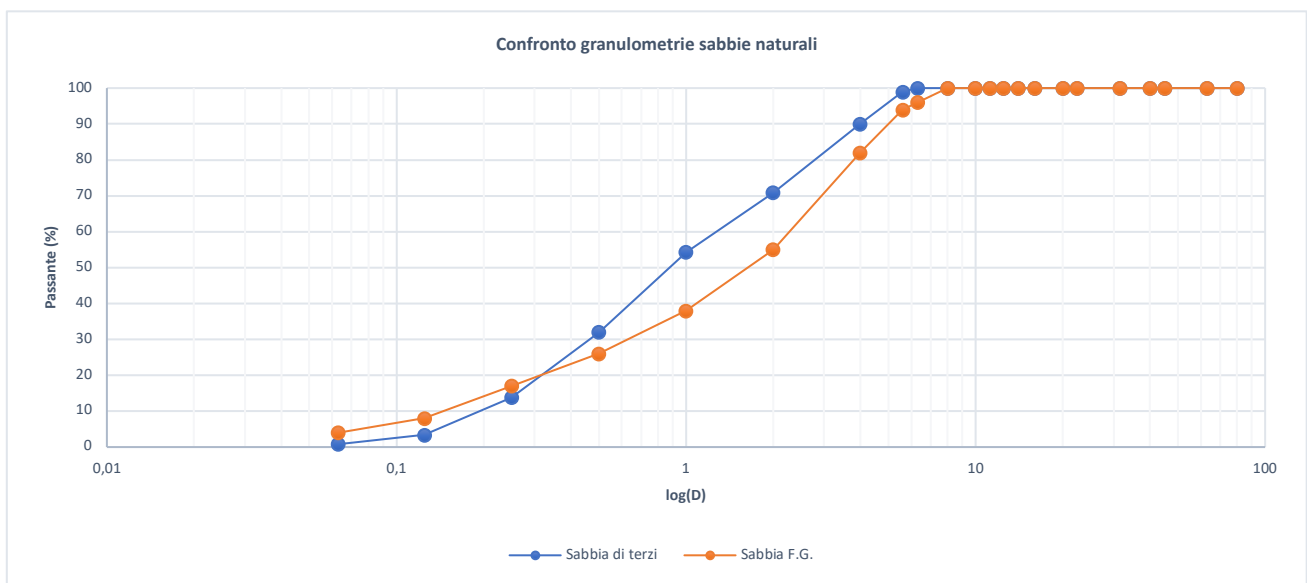


Grafico 11: confronto granulometrico

Per il confronto tra le granulometrie si è fatto riferimento all'ultimo Rapporto di Prova, avente numero 063-2/18, effettuato il 05/02/19, per la sabbia prodotta in situ, e alla DOP per la sabbia prodotta da terzi.

Come si può evincere dal Grafico 11 la sabbia prodotta da F.G. contiene un maggior quantitativo di fini per diametri inferiori a 0,25 mm.

Va sottolineato inoltre che il frantumato riciclato 15/30 non è marcato secondo la norma armonizzata UNI EN 12620 [13], la quale prevede come utilizzo "per calcestruzzo da utilizzare per costruzioni, strade e altre opere di ingegneria civile con requisiti di sicurezza elevati". Tuttavia, si è utilizzato lo stesso tale aggregato per andare ad analizzare il suo comportamento in accoppiamento a un altro materiale riciclato, la sabbietta riciclata.

Processo di produzione

Il processo di produzione si svolge presso il sito ubicato in Strada Cassagna s.n. nel comune di Pianezza (TO).



Figura 104: sito produttivo

Le attività svolte sono riassumibili in:

1. Stoccaggio, movimentazione e trasporto dei materiali.
2. Raccolta e trattamento di rifiuti speciali non pericolosi derivanti dalle operazioni di demolizione e costruzione e di conglomerato bituminoso.
3. Recupero ambientale e ripristino dell'area di cava.

Gli aggregati naturali e riciclati vengono prodotti utilizzando le stesse macchine poste secondo lo stesso schema in entrambi i cicli di produzione.

Esse consistono in un frantumatore a cui fa seguito un vaglio (Figura 105).

L'unica differenza che si ha nei due cicli è relativa alla produzione degli aggregati naturali in cui si utilizza una rete armonica aggiuntiva nel vaglio con dimensione delle maglie pari a 15 mm.



Figura 105: frantumatore e vaglio

L'attività di frantumazione viene svolta con un impianto mobile a mascelle per materiali inerti, modello OM Crusher Apollo, la cui scheda tecnica è in All. 5 ed è costituita da una macchina semovente di frantumazione su cingoli, equipaggiata con frantoio, la cui bocca di alimentazione ha dimensioni 1050 x 730 mm, con un sistema di alimentatore più prevaglio ad azioni indipendenti.

La sua versatilità permette di utilizzarla sia per il riciclaggio di materiale proveniente da demolizione e da scavo, separando anche le parti ferrose, sia per il trattamento di materiali provenienti da cave.

È una macchina capace di elevate produzioni, fino a 240 t/h, ha una potenza installata pari a 186 kW ed è totalmente autonoma nelle sue funzioni (Tabella 41).

Tabella 41: caratteristiche OM Crusher Apollo

Produzione massima	-	240 t/h
Peso totale (senza optional)	-	37500 kg
Alimentazione	Alimentatore vibrante a piano cieco	925 x 2600 mm
	Vaglio	965 x 1420 mm
	Con barrotti/luce min/max	30 – 45 mm
Tramoggia di carico	Con cilindri idraulici per ribaltamento sponde	4 m ³
Frantumazione	Frantoio a mascella a regolazione	-
	Dimensioni bocca di carico	1050 x 650 mm
	Regolazione scarico	20 – 145 mm
	Peso frantoio	14600 kg
	Mascella fissa liscia 12Mn2Cr	Altezza 1325 mm
	Mascella mobile dentata 12Mn2Cr	Altezza 1535 mm
Motorizzazione	Motore diesel 6 cilindri raffreddato ad acqua sovralimentato, potenza 1800 RPM	186 kW
Impianto abbattimento polveri		
Gruppo pompa travaso gasolio		
Separatore magnetico		
Pompa acqua per impianto abbattimento polveri		

A valle del gruppo semovente di frantumazione è presente un impianto di vagliatura OM Screen Eolo, macchina semovente di selezionatura cingolata, equipaggiata con vaglio vibrante (scheda tecnica in All. 6).

Anch'essa è una macchina la cui versatilità permette di utilizzarla sia per il riciclaggio di materiale pretrattato proveniente da demolizione e da scavo sia per la selezionatura di materiali provenienti da cave.

La produzione massima è di 210 t/h, e la potenza installata è pari a 72 kW ed è totalmente autonoma nelle sue funzioni. Inoltre, è stata progettata per essere facilmente trasportabile su normali carrelloni ribassati. Ed è l'unico selezionatore mobile con larghezza del vaglio 1500 mm avente larghezza in sagoma di trasporto 2500 mm.

Tabella 42: caratteristiche OM Screen Eolo

Produzione massima	-	210 t/h
Peso totale (senza optional)	-	23000 kg
Vaglio vibrante a due piani	Primo piano: rete a maglia quadra	-
	Secondo piano: rete antintasante	-
	Regolazione idraulica dell'inclinazione in fase di lavoro	-
	Griglione sgrassatore con barrotti luce (mm 120)	-
Tramoggia di carico	-	2.5 m ³
Motorizzazione	Motore diesel 4 cilindri raffreddato ad acqua sovralimentato, potenza 2500 RPM	72 kW

Gli schemi di flusso e di impianto sono illustrati nei seguenti sottoparagrafi.

Gli aggregati prodotti vengono riportati con il loro nome commerciale.

Naturali

Gli aggregati naturali prodotti sono costituiti principalmente da materiale alluvionale scavato in situ.

Il materiale è composto per lo più da rocce metamorfiche, per il 90% in peso, e rocce sedimentarie per il restante 10%. Sono assenti gesso, anidrite, pirite, radiolarite, silice amorfa e/o idrata e conchiglie.

Il ciclo di lavorazione può essere schematizzato secondo il seguente schema di flusso:

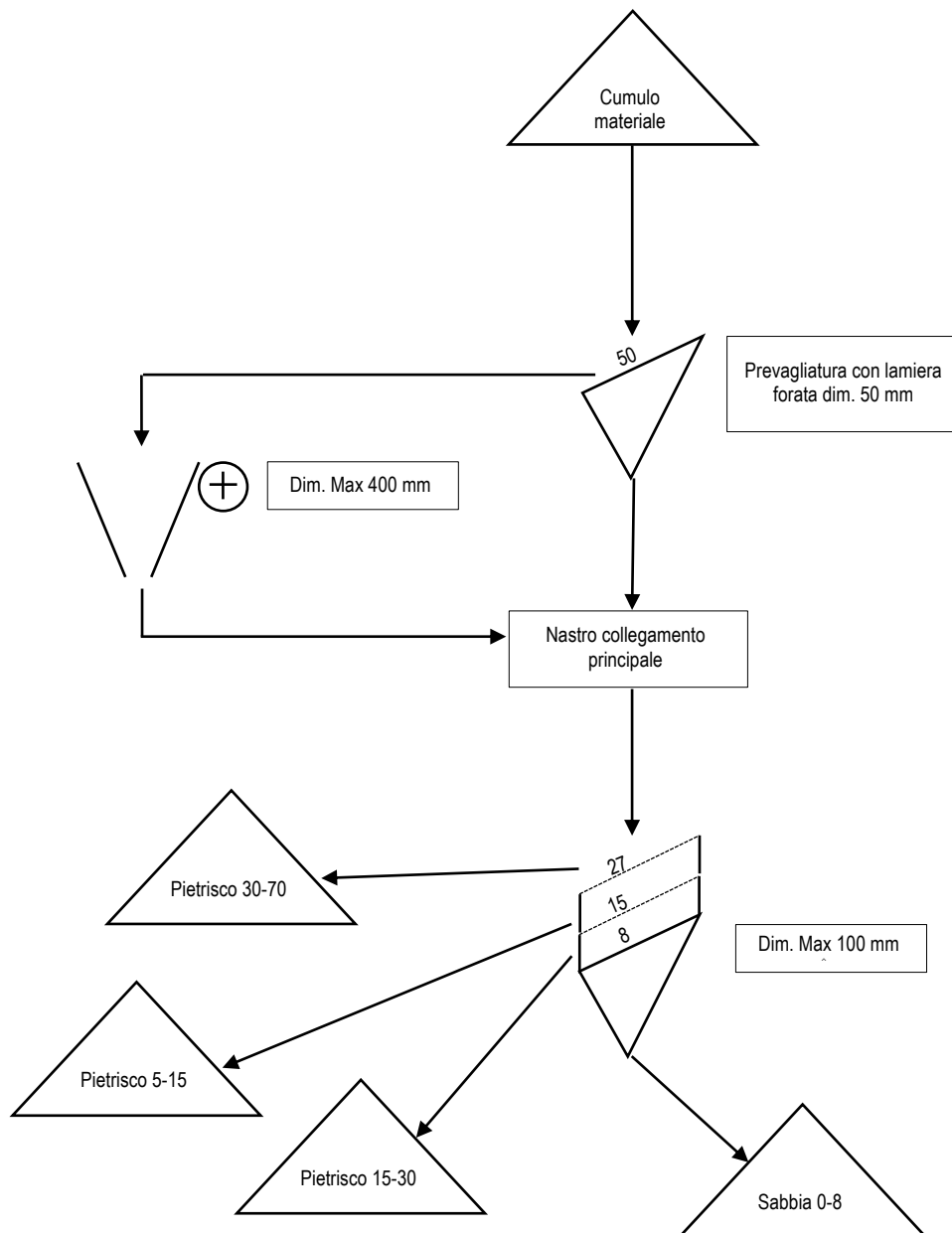


Figura 106: schema di flusso aggregati naturali

Le operazioni di frantumazione si possono svolgere, durante l'arco della giornata, per un tempo variabile (al massimo uguale alle 8 ore lavorative), in funzione della quantità di materiale che deve essere trattato.

Il materiale viene prima accumulato nella zona delle macchine per il trattamento, poi viene caricato nella tramoggia con l'utilizzo di escavatori. Prima dell'operazione di frantumazione il materiale viene prevagliato per rendere più regolare l'ingresso nel frantoio stesso. La regolazione idraulica delle mascelle del frantoio permette l'ottenimento di un materiale omogeneo che abbia le caratteristiche merceologiche volute. La produzione dell'impianto è variabile a seconda della tipologia del materiale trattato. La durata del ciclo non è quantificabile in quanto dal caricamento del materiale nella tramoggia all'uscita sul nastro si procede in modo automatico.

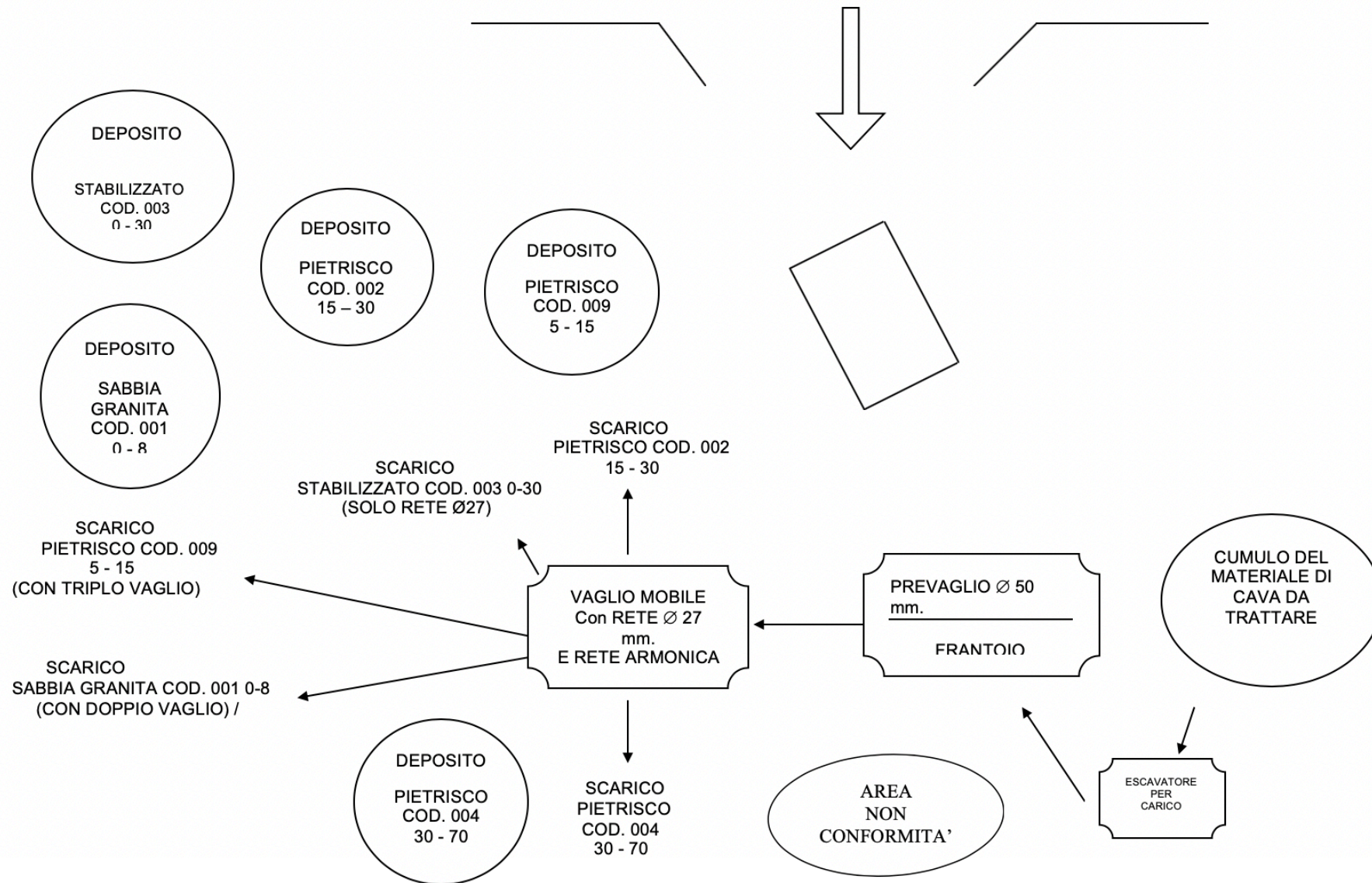


Figura 107: schema di impianto aggregati naturali

Riciclati

Gli aggregati riciclati prodotti provengono dal trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione afferenti ai codici CER individuati in Tabella 43, a cui corrisponde la tipologia di rifiuto individuata secondo l'All. 1 DM 5/2/98 riportata nella seconda colonna e recuperata con l'attività R5 "riciclo/recupero di sostanze inorganiche" secondo l'articolo 3 del DM 5/2/98.

I rifiuti provengono da "attività di demolizione, frantumazione e costruzione, selezione da RSU e/o RAU; manutenzione reti; attività di produzione di lastre e manufatti in fibrocemento" e sono costituiti da "materiale inerte, laterizio e ceramica cotta anche con presenza di frazioni metalliche, legno, plastica, carta e isolanti escluso amianto" (All. 1 suball. 1 del'all. 2 suball. 1 del D.M. 5 febbraio 1998 [26]).

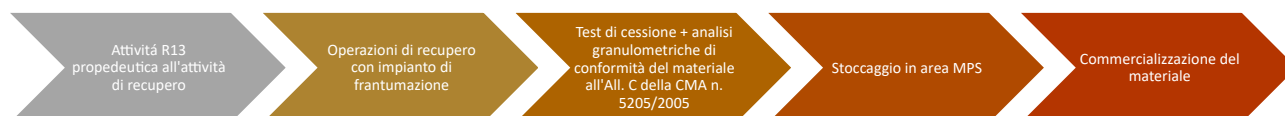
Per questa tipologia di rifiuto è previsto il test di cessione con cadenza annuale o ogni qualvolta intervengano modifiche sostanziali nel processo di recupero dei rifiuti, sui materiali nelle condizioni finali di utilizzo e preventivamente ad una eventuale miscelazione con inerte vergine.

Tabella 43: attività di recupero

CER	Tipologia di rifiuto All. 1 DM 5/2/98	Attività di recupero
101311 170101 170102 170103 170107 170802 170904	7.1 rifiuti costituiti da laterizi, intonaci e conglomerati di cemento armato e non, comprese le traverse e traversoni ferroviari e i pali in calcestruzzo armato provenienti da linee ferroviarie, telematiche ed elettriche e frammenti di rivestimenti stradali, purché privi di amianto	R5 ¹⁴

Ciclo di lavorazione

Le fasi operative sono riassumibili secondo il seguente schema:



Lo stoccaggio dei rifiuti avviene in area dedicata in cumuli distinti tra rifiuto in ingresso e rifiuto lavorato in attesa dei risultati dei test e delle analisi effettuati. Una volta ottenuti gli esiti positivi i rifiuti acquisiscono la caratteristica di materia prima secondaria e vengono spostati e stoccati in altre aree dell'unità locale su cui insiste l'azienda.

In fase di accettazione del rifiuto viene svolta una prima selezione sul materiale stesso per verificare la compatibilità di questo con la tipologia di rifiuto autorizzata; in caso di rifiuto non idoneo questo non viene accettato.

Le operazioni di frantumazione si possono svolgere, durante l'arco della giornata, per un tempo variabile (al massimo uguale alle 8 ore lavorative), in funzione della quantità di materiale che deve essere recuperato.

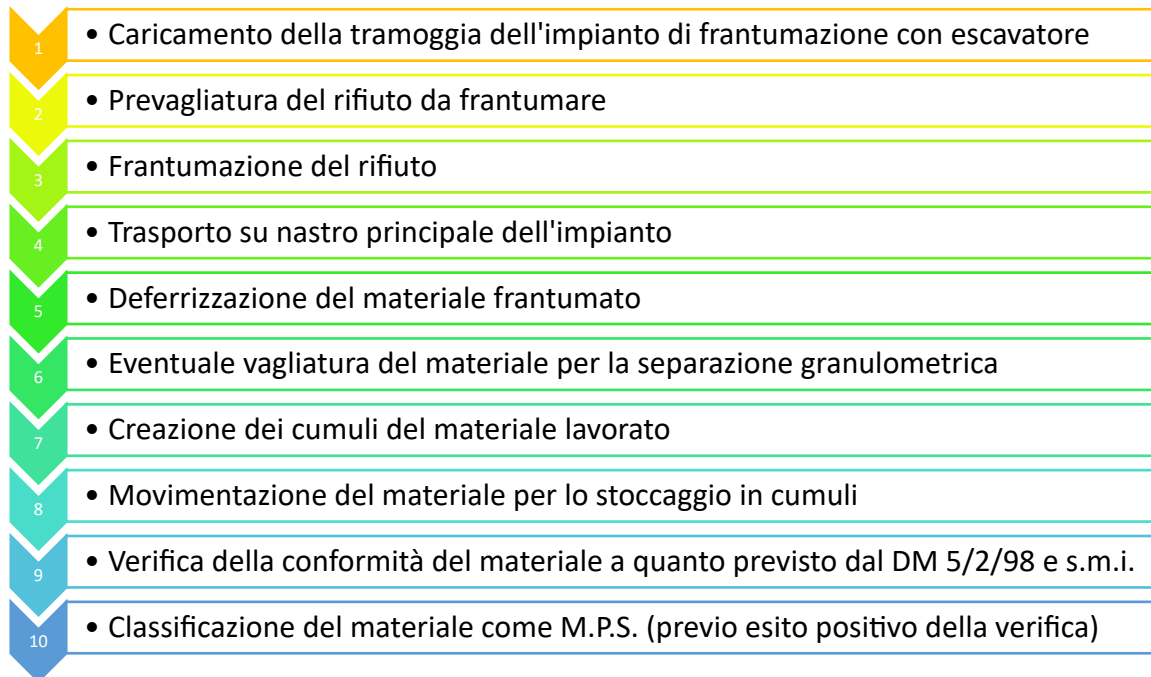
Il materiale preventivamente selezionato (sono rimosse tutte le frazioni indesiderate quali ferro, legno, plastica, etc.) viene caricato nella tramoggia con l'utilizzo di escavatori; l'eventuale ferro ancora presente viene estratto da un separatore magnetico il quale tramite apposito nastro lo divide dal materiale frantumato.

Prima dell'operazione di frantumazione il materiale viene prevagliato per rendere più regolare l'ingresso nel frantoio stesso. La regolazione idraulica delle mascelle del frantoio permette l'ottenimento di un materiale omogeneo che abbia le caratteristiche merceologiche volute. Un separatore magnetico separa il rifiuto ferroso dal materiale frantumato e lo scarica di lato.

¹⁴ Attività di recupero R5, p.to 7.1.3 lett. a) – produzione di MPS: "materie prime secondarie per l'edilizia con caratteristiche conformi all'allegato C della Circolare del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio 15/7/2005 n. UL/2005/5205

La produzione dell'impianto è variabile a seconda della tipologia del materiale trattato.
La durata del ciclo non è quantificabile in quanto dal caricamento del materiale nella tramoggia all'uscita sul nastro si procede in modo automatico.

Lo schema del ciclo lavorativo è rappresentato di seguito:



Per quanto riguarda quindi gli aggregati riciclati il ciclo può essere schematizzato secondo il seguente schema di flusso:

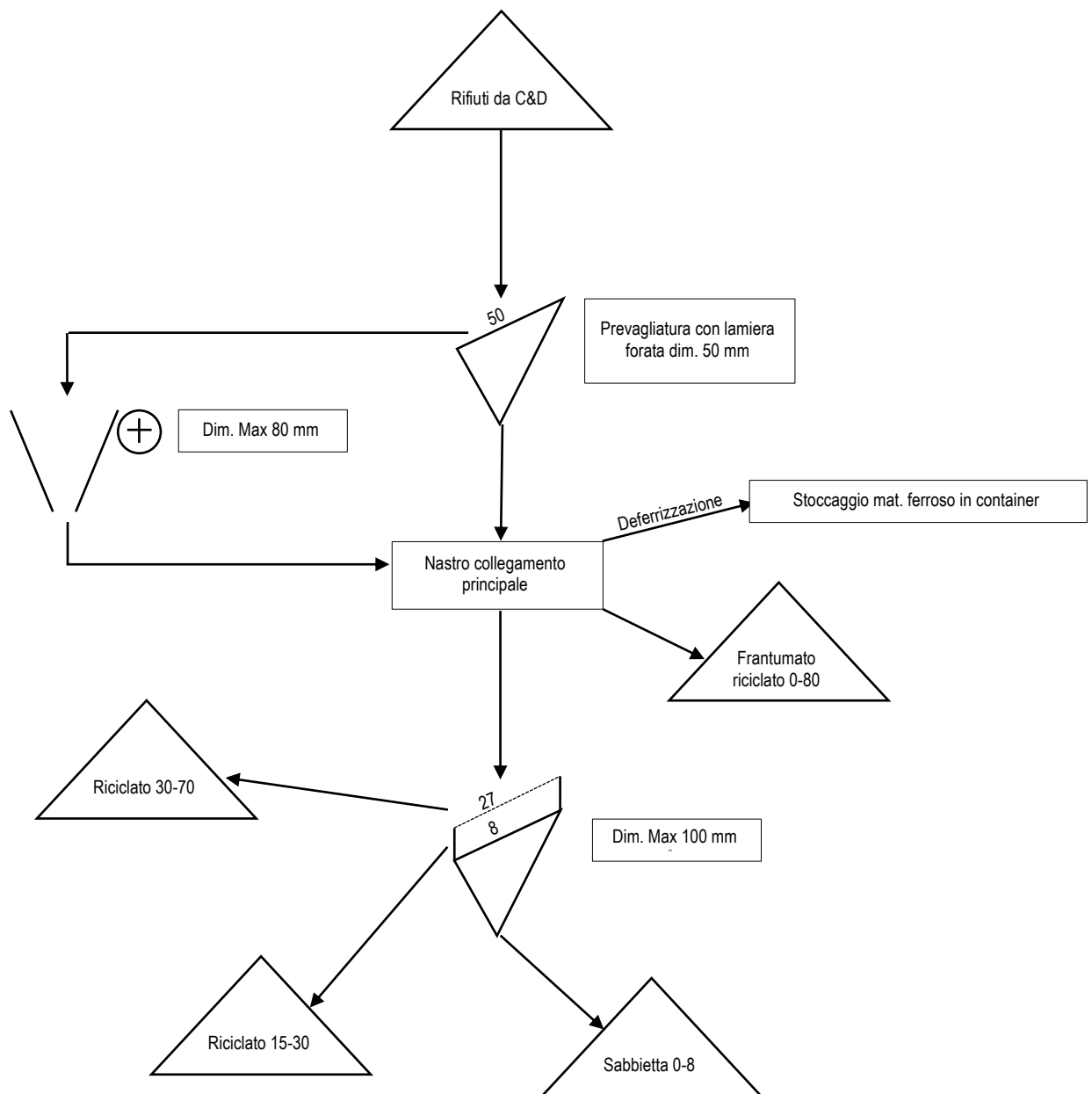


Figura 108: schema di flusso aggregati riciclati

Lo schema di impianto invece è rappresentato nelle pagine successive.

Rispetto al precedente schema di impianto riferito agli aggregati naturali, lo schema di impianto dei riciclati differisce nell'iter del materiale in ingresso nel ciclo produttivo.

I rifiuti da C&D provenienti dall'esterno passano prima sulla pesa per verificare la quantità di materiale presente. Successivamente l'operatore provvede a compilare e verificare il formulario di accompagnamento insieme ad una verifica visiva del rifiuto. Infine, i rifiuti vengono scaricati nel relativo cumulo da cui poi verranno prelevati dall'escavatore per essere immessi nella tramoggia del frantoio.

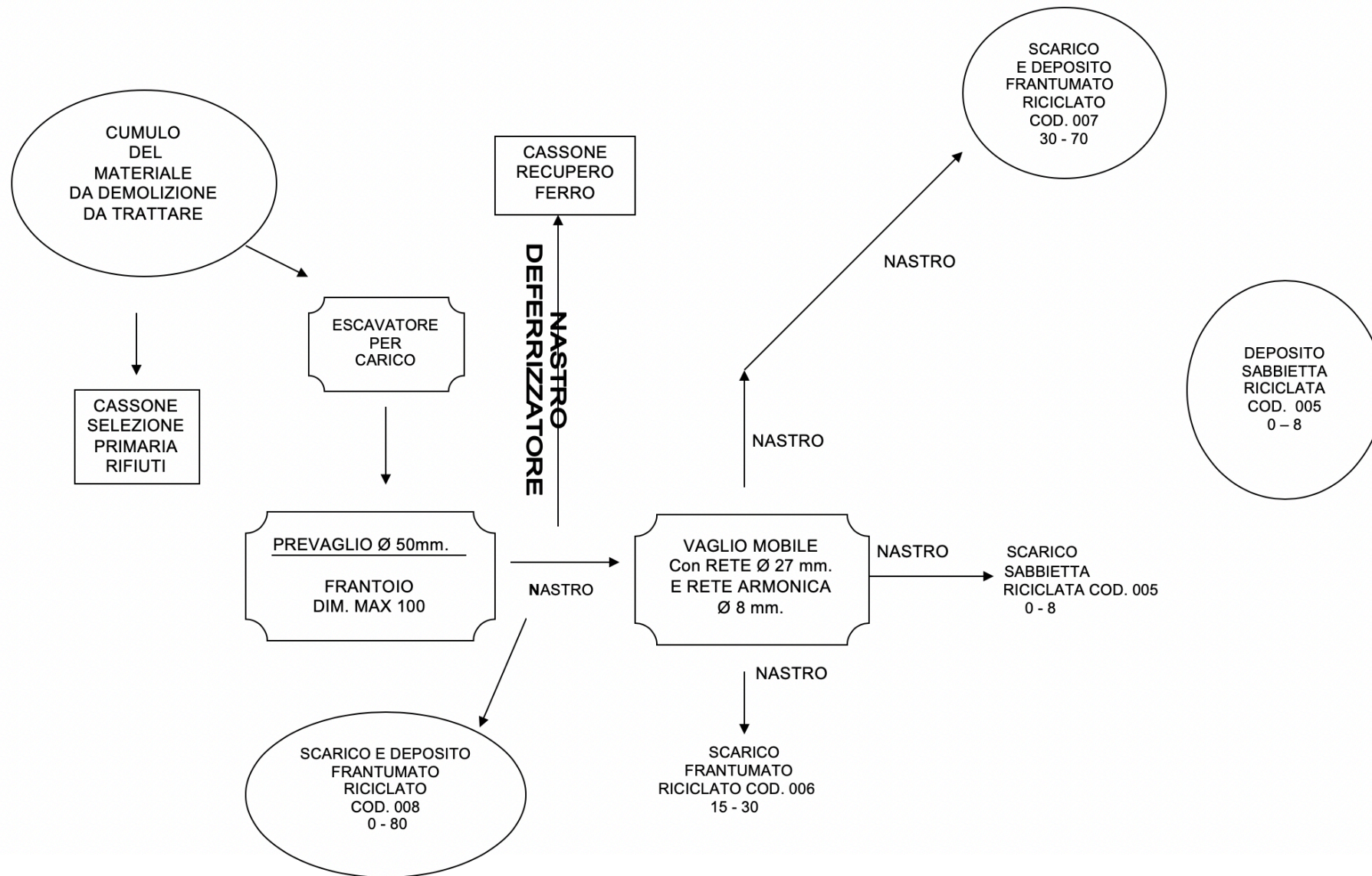


Figura 109: schema di impianto aggregati riciclati

La composizione percentuale del frantumato misto riciclato ottenuta è riassunta secondo la tabella seguente, ed è stata estratta dal Rapporto di prova n.063-9/19 emesso il 07/02/19 "Caratteristiche prestazionali degli aggregati riciclati, D.M. 5205 del 15/07/2005" (All. 7) [11]:

Tabella 44: composizione percentuale frantumato misto riciclato

PARAMETRO	Modalita' di prova	Risultato	Limite Allegato C1 CORPO DEI RILEVATI D.M. 5205 del 15.07.05
Materiali litici di qualunque provenienza, pietrisco tolto d'opera, calcestruzzi, laterizi, refrattari, prodotti ceramici, malte idrauliche ed aeree, intonaci, scorie spente e loppe di fonderia di metalli ferrosi (caratterizzazione secondo EN 13242)	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio da 8 mm (rif. UNI EN 13285/2004)	97,5%	> 70% in massa
Vetro e scorie vetrose	idem	0,0%	≤ 15% in massa
Conglomerati bituminosi	idem	2,5%	≤ 25% in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nel corpo stradale ai sensi della legislazione vigente	idem	0,0%	≤ 15% in totale e ≤ 5% per ciascuna tipologia
Meateriali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume; Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie in plastica ecc.	idem	0,0%	≤ 0,1% in massa
Altri materiali (metalli, gesso, guaine, gomme, lana di roccia o vetro ecc.)	idem	0,0%	≤ 0,6% in massa
Passante al setaccio da 63 (mm)	UNI EN 933/1	82%	85 - 100%
Passante allo staccio da 4 (mm)	UNI EN 933/1	26%	≤ 60%
Passante al setaccio da 0,063 (mm)	UNI EN 933/1	8,1%	≤ 15%
Equivalente in Sabbia (%)	UNI EN 933-8	38%	> 20%
Dimensione massima (mm)	UNI EN 933/1	95 mm	= 125 mm

Come si può ben osservare il frantumato misto riciclato è composto per la quasi sua interezza da materiali litici, pietrisco, calcestruzzi, laterizi, refrattari, prodotti ceramici, malte idrauliche ed aeree, intonaci, scorie spente e loppe di fonderia di materiali ferrosi (97,5% in peso) e per la restante parte da conglomerati bituminosi (2,5% in peso).

Entrando più nello specifico è possibile distinguere meglio i costituenti degli aggregati riciclati grossi facendo riferimento alla Tabella 45 appartenente al documento MR01.PC09 in cui è individuata la composizione dell'aggregato riciclato secondo la norma UNI EN 933-11 [40]:

Tabella 45: MR01.PC09

Nome commerciale	Tipo di aggregato	Dimensioni	Categoria	Norma di riferimento	Origine	Tipologia di lavorazione	Composizione	Provenienza	Deposito
Sabbione naturale	FINE (EN 12620) FINE (EN 13242)	0/4	Gf85 (EN 12620) Gf85 – Gf25 (EN 13242)	UNI EN 12620 UNI EN 13242	Naturale alluvionale	frantumazione/ selezione	Rocce Sedimentarie 10%; Rocce Metamorfiche 90%. Sono assenti: Gesso, Anidrite, Pirite, Radiolarite, Silice amorfa e/o idrata, Conchiglie.	Naturale alluvionale, cava propria in Pianezza (TO)	Nessuno
Ghiaia naturale 15-30	GROSSO (EN 12620) GROSSO (EN 13242)	8/22,4	Gc90/15 – Gt15 (EN 12620) Gc85/15 – Gt25/15 (EN 13242)	UNI EN 12620 UNI EN 13242	Naturale alluvionale	frantumazione/ selezione	Rocce Sedimentarie 5%; Rocce Metamorfiche 95%. Sono assenti: Gesso, Anidrite, Pirite, Radiolarite, Silice amorfa e/o idrata, Conchiglie.	Naturale alluvionale, cava propria in Pianezza (TO)	Nessuno
Stabilizzato naturale 0-30	IN FRAZIONE UNICA	0/22,4	Ga85 – GTa25	UNI EN 13242	Naturale alluvionale	frantumazione/ selezione	Rocce Sedimentarie 8%; Rocce Metamorfiche 92%. Sono assenti: Gesso, Anidrite, Pirite, Radiolarite, Silice amorfa e/o idrata, Conchiglie.	Naturale alluvionale, cava propria in Pianezza (TO)	Nessuno
Ghiaia naturale 30-70	GROSSO	31,5/63	Gc80/20 – Gt25/15	UNI EN 13242	Naturale alluvionale	frantumazione/ selezione	Rocce Metamorfiche 100%. Sono assenti: Gesso, Anidrite, Pirite, Radiolarite, Silice amorfa e/o idrata, Conchiglie.	Naturale alluvionale, cava propria in Pianezza (TO)	Nessuno
Sabbione riciclato	MISTO (EN 12620) FINE (EN 13242)	0/5,6	Ga90 (EN 12620) Gf85 – Gf25 (EN 13242)	UNI EN 12620 UNI EN 13242	Riciclato	frantumazione/ selezione	L'aggregato proviene dalla frantumazione di: aggregati rocciosi frantumati, aggregati di ghiaia, calcestruzzo e altre miscele legate con leganti idraulici, mattoni, blocchi di muratura e calcestruzzo, asfalto frantumato recuperato.	Riciclato, materiali da demolizione (raggio di 20 km. da Pianezza-TO-)	Nessuno
Riciclato 15-30	GROSSO	8/22,4	Gc85/15 – Gt25/15	UNI EN 13242	Riciclato	frantumazione/ selezione	Rc50; Ru11,7; Rcug 70; Rb 30-; Ra 5-; Rg 2- ; X 1- ; FL 5-. C.M. n. 5205 del 15/07/2005: Corpo dei rilevati.	Riciclato, materiali da demolizione (raggio di 20 km. da Pianezza-TO-)	Nessuno
Riciclato 30-70	GROSSO	31,5/80	Gc80/20 – Gt25/15	UNI EN 13242	Riciclato	frantumazione/ selezione	Rc35; Ru48,7; Rcug 70; Rb 30-; Ra 5-; Rg 2-; X 1- ; FL 5-. C.M. n. 5205 del 15/07/2005: Strati accessori aventi funzione antigelo, anticapillare, drenante, etc.	Riciclato, materiali da demolizione (raggio di 20 km. da Pianezza-TO-)	Nessuno
Riciclato 0-120	IN FRAZIONE UNICA	0/80	Ga80-GTa20	UNI EN 13242	Riciclato	frantumazione/ selezione	Rc50; Ru8,5; Rcug 70; Rb 30-; Ra 5-; Rg 2-; X 1- ; FL 5-. C.M. n. 5205 del 15/07/2005: Corpo dei rilevati.	Riciclato, materiali da demolizione (raggio di 20 km. da Pianezza-TO-)	Nessuno
Ghiaia naturale 5-15	GROSSO (EN 12620) GROSSO (EN 13242)	6,3/14	Gc90/15 – Gt15 (EN 12620) Gc85/15 – Gt25/15 (EN 13242)	UNI EN 12620 UNI EN 13242	Naturale alluvionale	frantumazione/ selezione	Aggregato naturale composto prevalentemente da frammenti di rocce ultramafiche (Peridotiti) e rocce di diverso grado metamorfico, la composizione dei minerali è essenzialmente silicatica.	Naturale alluvionale, cava propria in Pianezza (TO)	Nessuno

Tabella 46: MR02.PC09

Prove	Norme di prova	Frequenze di prova		Campo di applicazione
		Prove iniziali	Controllo di produzione	
Requisiti geometrici				
Granulometria	UNI EN 933-1	Settimanale	Mensile <u>Frequenza diminuita in considerazione dell'elevato grado di conformità granulometrica storicamente conseguita (100% dal 2009, anno di marcatura, ad oggi).</u>	UNI EN: 12620 / 13242
Contenuto di polveri	UNI EN 933-1	Settimanale	Mensile <u>Frequenza diminuita in considerazione dell'elevato grado di conformità granulometrica storicamente conseguita (100% dal 2009, anno di marcatura, ad oggi).</u>	UNI EN: 12620 / 13242
Indice di forma	UNI EN 933-4	Mensile (frantumati) Semestrale (non frantumati)	Mensile (frantumati) Semestrale (non frantumati)	UNI EN: 12620 / 13242 No: 0-4N/0-5,6R
Indice di appiattimento	UNI EN 933-3	Mensile (frantumati) Semestrale (non frantumati)	Mensile (frantumati) Semestrale (non frantumati)	UNI EN: 12620 / 13242 No: 0-4N/0-5,6R
Percentuale di particelle frantumate ed arrotondate	UNI EN 933-5	Mensile	Mensile	UNI EN : 13242 No: 0-4N/0-5,6R
Equivalente in sabbia o Valore di Blu	UNI EN 933-8 / UNI EN 933-9	Si / Settimanale solo se > 3% al passante 0,063	Annuale / Settimanale solo se > 3% al passante 0,063	UNI EN: 12620 / 13242 Solo su: 0-4N/0-22,4N/0-5,6R/0-80R
Requisiti fisici				
Massa volumica dei granuli	UNI EN 1097-6	Si	Annuale (Naturali) Mensile (Riciclati)	UNI EN: 12620 / 13242
Assorbimento d'acqua dei granuli	UNI EN 1097-6	Si	Annuale	UNI EN: 12620 / 13242
Resistenza alla frammentazione	UNI EN 1097-2	Semestrale	Semestrale	UNI EN: 12620 / 13242 No: 0-4N/31,5-63N/0-5,6R/31,5-80R
Reattività alcali-silice	UNI 8520 parte 22	Si	Quando richiesto e in caso di dubbio	UNI EN: 12620
Resistenza all'usura	UNI EN 1097-1	Semestrale	Annuale (UNI EN 12620) Semestrale (UNI EN 13242)	UNI EN : 12620 / 13242 No: 0-4N/31,5-63N/0-5,6R/31,5-80R
Resistenza all'abrasione superficiale	UNI EN 1097-8 Appendice A	Semestrale	Annuale	UNI EN : 12620 No: 0-4N/0-5,6R
Resistenza al gelo/disgelo	UNI EN 1367-1	Si	Biennale	UNI EN: 12620 / 13242 No: 0-4N/0-5,6R
Resistenza all'effetto del solfato di magnesio	UNI EN 1367-2	Si	Biennale	UNI EN: 12620
Requisiti chimici				
Contenuto di sostanze organiche	UNI EN 1744-1, 15.1	Si	Annuale	UNI EN: 12620 / 13242
Contenuto di solfato idrosolubile	UNI EN 1744-1, 10	Si	Mensile	UNI EN: 12620 / 13242 Solo su: aggregati riciclati
Contenuto di solfati solubili in acido	UNI EN 1744-1, 12	Si	Annuale	UNI EN: 12620 / 13242
Contenuto di cloruri solubili in acqua	UNI EN 1744-1, 7	Si	Biennale	UNI EN: 12620

Contenuto di cloruri solubili in acido	UNI EN 1744-5	Si	Semestrale	UNI EN: 12620 Solo su: aggregati riciclati
Contenuto di zolfo	UNI EN 1744-1, 11	Si	Annuale (Naturali) Semestrale (Riciclati)	UNI EN: 12620 / 13242
Classificazione dei costituenti	UNI EN 933-11	Si	Mensile	UNI EN: 12620 / 13242 Solo su: aggregati riciclati, eccetto 0-5,6R
Contenuto di carbonato di calcio	UNI EN 1744-1, 12.3	Si	Annuale	UNI EN: 12620
Contenuto di contaminanti leggeri	UNI EN 1744-1, 14.2	Si	Semestrale	UNI EN: 12620
Influenza sul tempo di inizio presa del cemento	UNI EN 1744-6	Si	Semestrale	UNI EN: 12620 Solo in caso di aggregati grossi riciclati
Analisi chimica sull'eluato in acqua	D.M. 186/2006	Si	Annuale	UNI EN: 12620 / 13242 Solo su: misto di produzione di aggregati riciclati
Resistenza comparativa (tempo di presa)	UNI EN 1744-1, 15.3	Se richiesto o in caso di dubbio	Se richiesto o in caso di dubbio	UNI EN: 12620 / 13242
Caratterizzazione degli aggregati	C.M. 5205/2005	Si	Se richiesto o in caso di dubbio	UNI EN: 13242 Solo su: 8-22,4R/31,5-80R/0-80R
Descrizione petrografica	UNI EN 932-3 D.Lgs. 152-2006	Si	Triennale	UNI EN: 12620 / 13242 Solo su: aggregati naturali

Principalmente si possono suddividere i suoi costituenti in macrocategorie facendo riferimento al Paragrafo “Classificazione dei costituenti degli aggregati riciclati grossi” della norma UNI EN 13242 [7], riportati in Tabella 14.

Tabella 47: classificazione costituenti aggregati grossi riciclati secondo UNI EN 13242 [7]

Costituenti	Contenuto percentuale in massa	Categoria
R_c	≥ 90	R_{c90}
	≥ 80	R_{c80}
	≥ 70	R_{c70}
	≥ 50	R_{c50}
	< 50	$R_{cDichiarato}$
	Nessun requisito	R_{cNR}
$R_c + R_u + R_g$	≥ 90	R_{cug90}
	≥ 70	R_{cug70}
	≥ 50	R_{cug50}
	< 50	$R_{cugDichiarato}$
	Nessun requisito	R_{cugNR}
R_b	≤ 10	R_{b10-}
	≤ 30	R_{b30-}
	≤ 50	R_{b50-}
	> 50	$R_{bDichiarato}$
	Nessun requisito	R_{bNR}
R_a	≥ 95	R_{a95}
	≥ 80	R_{a80}
	≥ 50	R_{a50}
	≥ 40	R_{a40}
	> 30	R_{a30}
	≤ 30	R_{a30-}
	≤ 20	R_{a20-}
	≤ 10	R_{a10-}
	≤ 5	R_{a5-}
	≤ 1	R_{a1-}
	Nessun requisito	R_{aNR}
X	≤ 1	X_{1-}
	Contenuto cm^3/kg	Categorie
FL	≤ 5	FL_{5-}
	≤ 10	FL_{10-}

In cui:

- R_c : calcestruzzo, prodotti di calcestruzzo, malta; elementi di calcestruzzo per muratura;
- R_u : aggregato non legato, pietra naturale; aggregato legato idraulicamente;
- R_b : elementi di laterizio per muratura (mattoni e piastrelle); elementi di silicato di calcio per muratura; calcestruzzo aerato non flottante;
- R_a : materiali bituminosi;
- R_g : vetro;
- X : altro;
- FL : materiale flottante in volume.

Si può quindi dire che nel caso dell'aggregato grosso utilizzato nella ricerca sperimentale si ha, in termini di contenuto percentuale in massa:

- più del 70% tra calcestruzzo e suoi prodotti, aggregati non legati e legati e vetro.
Tra questi, più del 50% è costituito da calcestruzzo e suoi prodotti;
- meno del 30% di elementi di laterizio per muratura (mattoni e piastrelle), elementi di silicato di calcio per muratura, calcestruzzo aerato non galleggiante;
- meno del 5% di materiali bituminosi;
- meno del 2% di vetro;
- meno dell'1% di materiale di altro genere;
- meno del 5% di materiale galleggiante (in cm^3/kg).

La caratterizzazione chimiche del frantumato riciclato misto è invece riassunta in Tabella 48 seguente ed è stata estratta dal Rapporto di prova n. 181530.001 emesso in data 15/10/18 “Eluato in acqua” (All. 8). È stata fornita solo per dare maggior completezza del prodotto, in quanto è rappresentativa dello stesso, ma è molto variabile in funzione del rifiuto in ingresso.

Tabella 48: caratteristiche chimiche frantumato misto riciclato

DESCRIZIONE	RISULTATO	U.M.	LQ	LIMITI	METODO	U	NOTE
Amianto							
amianto	N.R.	mg/l		<= 30	DM 06/09/94 GU n° 288 10/12/94, All. 3 (*)		
Costituenti inorganici non metallici							
cianuri	<10	µg/l		<= 50	UNI EN 12457-2:2004 + APAT CNR IRSA 4070 Man 29 2003 (*)		
cloruri	6,5	mg/l		<= 100	UNI EN 12457-2:2004 + APAT CNR IRSA 4020 Man 29 2003 (*)		
fluoruri	0,08	mg/l		<= 1,5	UNI EN 12457-2:2004 + APAT CNR IRSA 4020 Man 29 2003 (*)		
nitrati	2,6	mg/l		<= 50	UNI EN 12457-2:2004 + APAT CNR IRSA 4020 Man 29 2003		
solfati	39	mg/l		<= 250	UNI EN 12457-2:2004 + APAT CNR IRSA 4020 Man 29 2003 (*)		
Costituenti organici							
richiesta chimica di ossigeno (COD espresso come ossigeno)	22	mg/l		<= 30	UNI EN 12457-2:2004 + APAT CNR IRSA 5130 Man 29 2003 (*)		
Elementi metallici e non metallici							
arsenico	3,9	µg/l		<= 50	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
bario	7,0	µg/l		<= 1000	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
berillio	<1,0	µg/l		<= 10	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
cadmio	<1,0	µg/l		<= 5	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
cobalto	<1,0	µg/l		<= 250	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
cromo totale	13	µg/l		<= 50	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
mercurio	<0,1	µg/l		<= 1	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
nicel	6,3	µg/l		<= 10	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
piombo	<1,0	µg/l		<= 50	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
rame	6,9	µg/l		<= 50	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
selenio	<1,0	µg/l		<= 10	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
vanadio	10,8	µg/l		<= 250	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
zinco	<1,0	µg/l		<= 3000	UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (*)		
Parametri chimico-fisici							
ione idrogeno	10,1	pH		5,5 - 12,0	UNI EN 12457-2:2004 + APAT CNR IRSA 2060 Man 29 2003 (*)		

LIMITI: Limiti di legge o di specifica

UM: Unità di misura; LQ: Limite di quantificazione, concentrazione sopra alla quale un analita può essere quantificato; U: Incertezza di misura;

N.R.: Non rilevabile; N.A.: Non Applicabile;

Cemento

Il cemento utilizzato per la realizzazione di tutti i provini è di tipo II/A con classe di resistenza 32.5R secondo normativa EN 197-1.



Figura 110: cemento utilizzato

In All. 10 sono contenute le schede tecniche, la relativa DOP e il certificato di controllo della produzione.

Additivi e disarmanti

Poiché le formulazioni utilizzate per le prime prove erano riferite agli aggregati naturali, il maggior assorbimento d'acqua determinato dall'utilizzo degli aggregati riciclati ha reso necessaria l'aggiunta dell'additivo super fluidificante Mapei DYNAMON SP1 per rendere l'impasto più lavorabile e colabile. Questo per ciò che riguarda i primi due set di provini. In All. 11 e 11.2 sono contenute la scheda tecnica e la DOP.

Dal terzo set di provini si prevedeva di utilizzare l'additivo FLUIBETON 950 (Figura 111), la cui scheda tecnica è contenuta in All. 15, e un disarmante per casseri in legno, Disarmwood (Figura 112), la cui scheda tecnica è in All. 17. Essendo un disarmante specifico per casseri in legno era stata preventivamente effettuata una prova spennellando una soluzione acquosa di tale liquido su un pezzo di polistirolo, in proporzione 1:5 (1 parte di Disarmwood e 5 di acqua), in modo da osservarne gli effetti. Dopo 8 ore, non si è osservata nessuna degradazione del materiale.

I relativi quantitativi utilizzati saranno illustrati successivamente in ogni prova.



Figura 111: fluidificante FLUIBETON 950



Figura 112: disarmante Disarmwood

Acqua

L'acqua utilizzata è acqua potabile proveniente dall'acquedotto di Torino, le cui caratteristiche chimiche sono state desunte dal sito SMAT e sono relative ai valori medi del secondo semestre 2019:

Tabella 49: caratteristiche di qualità acqua

PARAMETRO	PH (CONCENTRAZIONE IONI IDROGENO)	RESIDUO SECCO A 180°C	DUREZZA TOTALE	CONDUCIBILITÀ ELETTR. SPEC. 20°C	CALCIO	MAGNESIO	AMMONIO	CLORURI	SOLFATI	POTASSIO	SODIO	ARSE
TORINO	7,5	314	23	418	68	14	<0,05	21	43	2	10	<1

8.3 Metodo di mix design

Premessa

Il Mix-design è il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili (cemento, inerti, additivi).

Come anticipato per la realizzazione dei primi tre set di provini è stato utilizzato il metodo tradizionale di mix design che si basa su alcune correlazioni sperimentali che verranno descritte meglio nel seguito. Queste formulazioni sono state ricavate sperimentalmente misurando i diversi parametri di miscele di calcestruzzo costituite da aggregati naturali.

Poiché l'RCA ha un assorbimento d'acqua molto maggiore del corrispondente NCA, è necessario trovare delle nuove correlazioni che tengano conto di questa peculiarità.

Perciò successivamente si è deciso di passare al metodo di mix design proposto nel Paragrafo 7.6, appositamente studiato per gli RCA.

Descrizione del mix design tradizionale

Il Mix-design è il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili (cemento, inerti, additivi).

Esso si basa su alcune correlazioni sperimentali esistenti tra la composizione del calcestruzzo, da una parte, e le prestazioni del calcestruzzo e le caratteristiche delle materie dall'altra [242].

Le 5 correlazioni fondamentali, illustrate in Figura 113, sono:

- 1) il quantitativo di acqua (w), in kg/m^3 , è funzione della lavorabilità del conglomerato fresco, del tipo di aggregato (tondeggiate o frantumato), della sua dimensione (D_{max}), e dalla presenza di additivi.
A parità di slump la quantità di acqua w , che occorre impiegare per conseguire questa lavorabilità, è inversamente proporzionale alla dimensione dell'aggregato poiché aumentando il D_{max} diminuisce l'area superficiale specifica e di conseguenza l'acqua necessaria per bagnare la superficie.
A parità di D_{max} , la quantità d'acqua che occorre impiegare per confezionare un calcestruzzo con un determinato slump, è maggiore se si utilizza un aggregato frantumato dal contorno irregolare piuttosto che un inerte alluvionale dal contorno tondeggiate: infatti, a parità di dimensione, un aggregato frantumato, rispetto a quello dal contorno tondeggiate, presenta un attrito maggiore nei confronti della matrice cementizia e richiede, quindi, una maggior quantità di acqua per conseguire la stessa lavorabilità.
- 2) il rapporto w/c dipende dalla resistenza meccanica richiesta (R_{ck}), oltre che dal tipo e dalla classe del cemento;
- 3) il rapporto w/c che occorre adottare è anche funzione della durabilità richiesta dal calcestruzzo indurito: tale durabilità è relazionata al grado di aggressione ambientale cui la struttura è esposta (classe di esposizione);
L'attuale normativa (UNI EN 206 [14]) classifica gli ambienti in base al loro carattere aggressivo nei confronti del calcestruzzo e/o dell'armatura metallica (classi di esposizione). Il rapporto w/c da adottare sarà tanto più basso quanto maggiore è il livello di aggressione ambientale, al fine di ottenere un calcestruzzo impermeabile alla penetrazione degli agenti aggressivi.
Quindi, selezionata la classe di esposizione ambientale a cui l'opera sarà sottoposta, e scelta la tipologia strutturale (armata o non), si individua il valore di $(w/c)'$ che non deve essere superato per non mettere a rischio la durabilità dell'opera. Questo valore va confrontato con il rapporto w/c correlato con la R_{ck} (scelta per ragioni di calcolo strutturale). Sono possibili tre situazioni:
 - A. $(w/c)' = (w/c)$; in questo caso non esistono problemi sulla scelta di w/c
 - B. $(w/c)' > (w/c)$; in questo caso, che si verifica solitamente per valori di R_{ck} elevati, si sceglie, per la prosecuzione del mix-design, il valore di w/c derivante dalla R_{ck} il quale soddisfa anche il vincolo imposto da limite massimo derivante dalla durabilità richiesta
 - C. $(w/c)' < (w/c)$; in questo caso, che si verifica quasi sempre per valori di R_{ck} , il valore del rapporto acqua-cemento con cui proseguire il mix-design è quello $(w/c)'$ imposto dalla durabilità, ed il valore di resistenza caratteristica risulterà di fatto più alto (R_{ck}) rispetto a quello previsto originariamente (R_{ck}) sulla base di considerazioni meramente strutturali.

- 4) Noti i valori di w e quello di w/c , si calcola il volume totale di inerte (V_i) per bilancio di volume tra quello del calcestruzzo (V_{cls}) e quelli dei singoli ingredienti:

$$V_i = V_{cls} - V_a - V_c - V'_a$$

dove V_a e V_c , rispettivamente i volumi di acqua e di cemento, sono ottenibile dalle corrispondenti masse volumiche (circa 1 kg/L per l'acqua e circa 3.1 kg/L per il cemento), mentre V'_a è il volume di aria in litri per volume unitario di calcestruzzo, pari a 10 volte la % di aria nel calcestruzzo.

- 5) il volume V_i dell'inerte totale viene ripartito in quello dei singoli aggregati in base alle loro curve granulometriche rispetto alla curva di riferimento prescelta (Fuller, Bolomey, ecc.). I volumi di sabbia (V_s) e di ghiaia (V_g) così ottenuti vengono convertiti nelle corrispondenti masse (s e g) moltiplicando i volumi per le corrispondenti masse volumiche m_s e m_g .

Nella Figura 113 vengono illustrate le cinque correlazioni soprammenzionate.

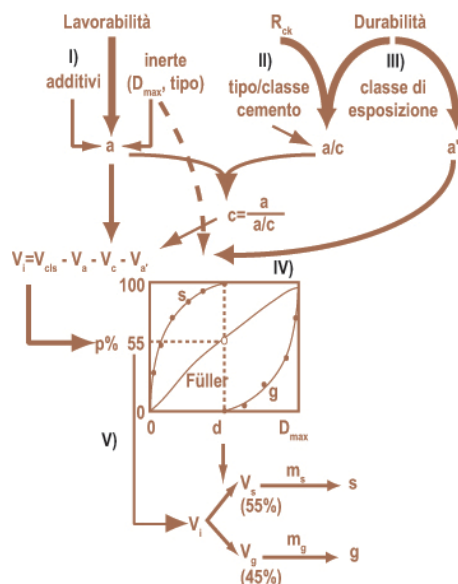


Figura 113: schema mix design [242]

La curva di progetto rappresenta la curva ottenuta dosando una certa percentuale di aggregato fine e la restante di aggregato grosso. Le equazioni che la rappresentano, per ogni singolo passante, sono:

$$\begin{aligned} P_1(d_1)\alpha_1 + P_2(d_1)\alpha_2 + \dots + P_n(d_1)\alpha_n &= P(d_1) \\ P_1(d_2)\alpha_1 + P_2(d_2)\alpha_2 + \dots + P_n(d_2)\alpha_n &= P(d_2) \\ &\dots \\ P_1(d_n)\alpha_1 + P_2(d_n)\alpha_2 + \dots + P_n(d_n)\alpha_n &= P(d_n) \end{aligned}$$

in cui α_i rappresentano le frazioni percentuali degli aggregati utilizzati, P_i sono i passanti al generico setaccio e d_i sono i diametri di tali setacci.

Al fine di avvicinare il più possibile la curva di progetto alla curva di riferimento si opera la minimizzazione degli scarti quadratici:

$$\sum (P_{i,rif} - P_{i,prog})^2 = \min$$

imponendo come vincoli progettuali: $\alpha_i \geq 0$; $\sum \alpha_i = 1$;

8.4 Prove

Prima prova

Inizialmente è stato effettuato un provino cubico di lato 10 cm, costituito interamente da RCA, ovvero sabbietta riciclata e frantumato riciclato 15/30, e con rapporti dei costituenti molto qualitativi, indicati in Tabella 50, con il solo fine di valutare la bontà del cassero in legno realizzato e la facilità delle operazioni di scasseratura.

La miscelazione degli elementi è stata fatta aggiungendo 1/3 dei quantitativi per volta, partendo prima dai fini, ovvero cemento e sabbietta riciclata 0/5.6, poi aggiungendo acqua e mescolando, e infine aggiungendo il frantumato riciclato 15/30, in quanto aggiungendolo prima poteva rendere difficoltosa la miscelazione dell'intero impasto.



Figura 114: preparazione impasto

Il cassero è stato assemblato avvitando dei pezzi di legno di recupero opportunamente sagomati. Questa modalità di costruzione non rendeva le giunzioni sigillate perciò è stato rivestito l'interno con un film plastico.



Figura 115: cassero nudo

La fase di presa e indurimento è iniziata il 23/07 e lo scassero è avvenuto il 02/08.
 È stato da subito osservato che il rivestimento con il telo di plastica creava delle disomogeneità laterali sul provino e una smussatura degli spigoli.



Figura 116: provino con disomogeneità in evidenza

Tabella 50: rapporti quantitativi prima prova

Provino	Massa cemento (g)	Massa acqua (g)	Massa Sabbietta riciclata (g)	Massa Frantumato Riciclato 15/30 (g)	Osservazioni
R1	310	200	750	880	Prima 15/30 poi 0/5.6 poi cemento e mescolo. Aggiungo acqua e mescolo manualmente. Stagionatura ad ambiente esterno da 23/07 – 2/08

Seconda prova

Analizzati i problemi riscontrati durante la formazione del primo provino sono stati creati i 10 provini, di cui 5 composti completamente da aggregati riciclati, aventi come aggregati sabbietta riciclata e frantumato riciclato 15/30, e 5 composti completamente da aggregati naturali, aventi come aggregati sabbia granita e pietrisco 15/30.

I rapporti quantitativi sono indicati in Tabella 56 e in Tabella 58.

Per avere una migliore rappresentazione della variabilità granulometrica degli aggregati si è utilizzata come curva di riferimento quella ottenuta media indicata nei relativi FPC (All. 2, All. 3, All. 4) rappresentante la media delle curve granulometriche di 9 campioni prelevati nel periodo 30/05/2013 – 25/10/2016, ad esclusione della Sabbia Granita la cui curva è stata presa dal relativo DOP (All. 1) e integrata ipotizzando un 100% di passante al setaccio 6 mm, ipotesi ragionevole in quanto la dimensione massima di questa sabbia si aggira attorno ai 5,6 mm.

I pesi specifici sono stati ricavati anch'essi dalle DOP relative all'anno 2018 messe in allegato.

Dai primi impasti è emerso subito che la consistenza degli aggregati riciclati, avendo utilizzato rapporti w/c derivati da correlazioni per aggregati naturali, non era quella che ci si aspettava.

Perciò è stato utilizzato del superfluidificante Mapei SP1 al 4% in peso sul cemento. Per replicare le stesse condizioni sui provini N è stato dosato quest'ultimo all'1% in peso sul cemento poiché la lavorabilità dell'impasto dei provini N era già buona.

I provini sono stati lasciati a riposo nei casseri per un giorno, al fine di permettere il processo di presa, all'interno di un involucro di plastica con un becker d'acqua per mantenere l'aria in condizioni di saturazione. Per facilitare la scasseratura sono stati preventivamente spennellati i casseri con l'olio disarmante.



Figura 117: casseri, provini e becker acqua



Figura 118: scasseratura

Per il successivo periodo di maturazione invece i provini sono stati lasciati in immersione nell'acqua fino al giorno precedente alla prova di resistenza a compressione.

Mix design

Le prime correlazioni usate per il processo di mix design sono state prese dal sito "Enco srl" [242] e il grafico acqua per inerti superiori a 32 mm da letteratura [243]. Il mix design è unico per entrambe le tipologie di mix perciò verrà trattato senza distinzione.

Lavorabilità, acqua, inerte e additivi

Fissata una classe di consistenza S4, combinata a un diametro massimo di 40 mm per i provini R e 31,5 mm per i provini N, si è pervenuto a un quantitativo d'acqua rispettivamente di 205 kg/m³ e 220 kg/m³.

I quantitativi finali sono stati aumentati di 10 kg/m³ poiché tutti gli aggregati sono prodotti da frantumazione, pertanto si perviene a valori di 215 kg/m³ per i mix R e 230 kg/m³ per i mix N (Figura 119).

Tabella 51: slump secondo UNI EN 206 [14] e UNI 11104 [43]

Classe	Consistenza	Abbassamento (mm)
S1	umida	10-40
S2	plastica	50-90
S3	semifluida	100-150
S4	fluida	160-210
S5	superfluida	>= 220

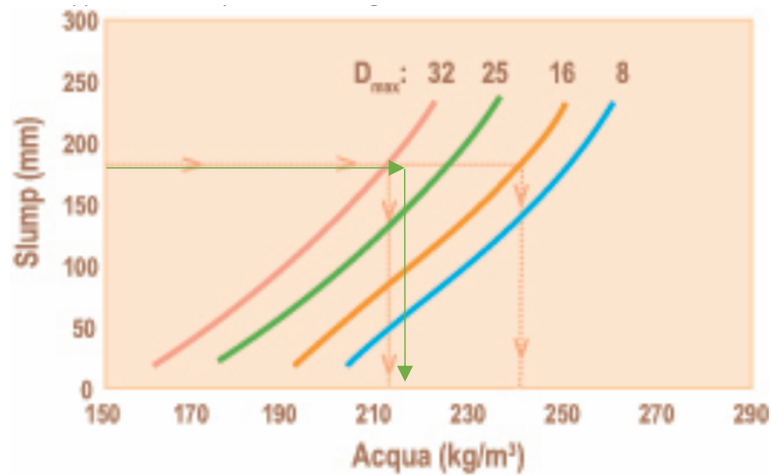
Figura 119: acqua vs D_{max} vs slump [242]

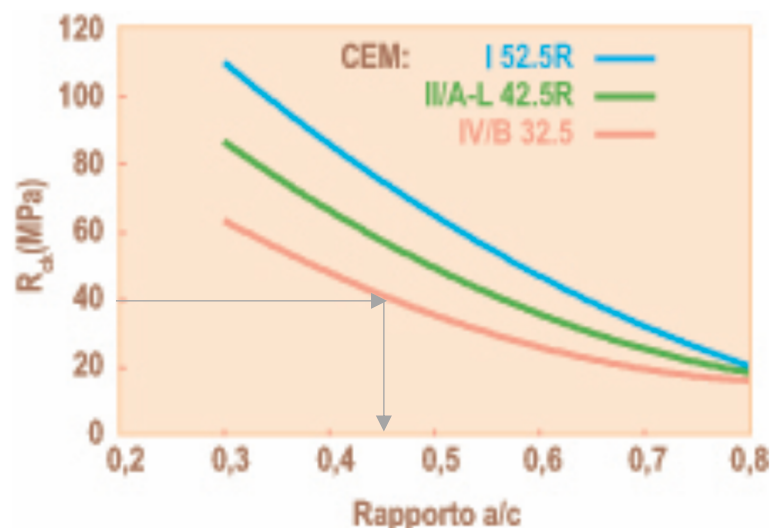
Tabella 52: acqua impasto e aria [243]

Consistenza UNI	Slump mm	Dosaggio d'acqua di impasto (l/m^3) in funzione del D_{max} dell'aggregato (mm)			
		10 mm	16 mm	25 mm	40 mm
Rigida	0	< 180	< 170	< 160	< 150
Umida	10-40	195	180	170	160
Plastica	50-90	215	200	190	180
Semifluida	100-150	230	215	205	195
Fluida	160-200	240	225	215	205
Superfluida	> 210	250	235	225	215
Aria intrappolata (l/m^3)		3	2,5	2	1,5

È stato utilizzato il superfluidificante in quantitativi pari all'1% in peso sul cemento nel calcestruzzo N e in quantità pari al 4% in peso sul cemento nel calcestruzzo R al fine di consentire una migliore colabilità del mix nei casseri.

Resistenza caratteristica, cemento e rapporto w/c

La correlazione 2 è illustrata nella Figura 120 che mostra come la resistenza caratteristica R_{ck} aumenta al diminuire del rapporto w/c.

Figura 120: w/c vs CEM vs R_{ck} [242]

Come resistenza di progetto è stata preso un valore pari alla resistenza media del cemento dopo 28 giorni ricavata dalla scheda tecnica in All. 10, ovvero 40 Mpa (Tabella 53), che combinata con la curva descrivente i cementi 32,5/32,5R restituisce un rapporto w/c di 0,45.

Si noti che essendo la resistenza di progetto la stessa per entrambe le tipologie di mix si ottiene a uno stesso rapporto w/c.

Tabella 53: valori caratteristici cemento

Descrizione	Valori indicativi (Medi) (1)	Limiti caratteristici di norma
Resistenza a compressione dopo stagionatura di 2gg - UNI EN 196/1	19,0 MPa	≥ 10,0 MPa
Resistenza a compressione dopo stagionatura di 28gg - UNI EN 196/1	40,0 MPa	≥ 32,5 MPa ≤ 52,5 MPa

Durabilità, rapporto w/c ed aria inglobata

Come classe ambientale del calcestruzzo è stata scelta una classe ambientale di esposizione XA1, ipotizzando un possibile utilizzo in ambiente industriale.

Tabella 54: classe ambientale

Classe di esposizione	Ambiente	Massimo rapporto (a/c)* per strutture			Minimo* volume di aria	Copri ferro minimo (mm)	
		normali	armate	precomprese		c.a.	c.a.p.
XC1	Asciutto / interni di abitazioni, uffici, ecc.	---	0.65	0.65	---	15	25
XC4	Umido / strutture esterne	0.50	0.50	0.50	---	30	40
XF3	Umido con gelo	0.50	0.50	0.55	4 - 6%	30	40
XF4	Umido con gelo e sali disgelanti	0.45	0.45	0.45	4 - 6%	45	55
XS3	Mare	0.45	0.45	0.45	---	45	55
XD3	Mare con gelo	0.45	0.45	0.45	4 - 6%	45	55
XA1	Agenti chimici debolmente aggressivi (SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺ , ecc.)	0.55	0.55	0.55	---	25	35
XA2	Agenti chimici mediamente aggressivi (SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺ , ecc.)	0.50	0.50	0.50	---	30	40
XA3	Agenti chimici fortemente aggressivi (SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺ , ecc.)	0.45	0.45	0.45	---	40	50

* I valori minimi di aria 4%, 5% e 6% si riferiscono rispettivamente ad inerti con diametro massimo di 32,16 ed 8 mm

Il valore ottenuto dalla Tabella 54 è pari a 0,55 perciò come rapporto a/c può essere utilizzato lo 0,45 trovato dalla precedente correlazione.

Combinazione degli inerti disponibili

Dalla correlazione della Figura 121 è possibile risalire al quantitativo d'aria intrappolato nella miscela. Per l'inerte riciclato, essendo il diametro massimo molto grande si può considerare pressochè nulla l'aria intrappolata, mentre per quello naturale, avendo un diametro massimo di 31,5 mm si può pervenire a un 1,35% in volume di aria intrappolata.

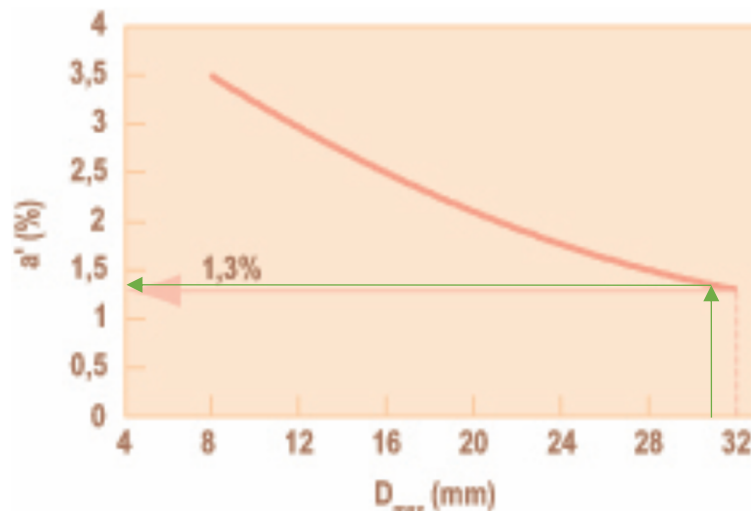


Figura 121: D_{max} vs aria [242]

Il volume totale di inerte (V_i) per le due tipologie di mix è stato ottenuto come bilancio di volume tra quello del calcestruzzo (V_{cls}), da una parte, e quelli dei singoli ingredienti, dall'altra:

$$V_i = V_{cls} - V_a - V_c - V_a'$$

Ponendo V_{cls} pari a 1 m^3 ed esprimendo tutti i volumi in litri la formula diventa:

$$V_i = 1000 - a - \left(\frac{c}{3,1}\right) - 10a'$$

In cui:

- a' è la percentuale in volume di aria presente nel conglomerato, pari a 1,35% nel calcestruzzo confezionato con gli aggregati naturali e 0% per il calcestruzzo gli aggregati riciclati
- a è il volume d'acqua
- c è la massa di cemento, espressa in chilogrammi

Le curve granulometriche sono state ottenute come indicato ad inizio paragrafo e sono state utilizzate come rappresentazione granulometrica dei due aggregati.

La curva di riferimento è stata ottenuta mediante la legge di Bolomey:

$$P = A + (100 - A) * \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$$

In cui A è un coefficiente funzione della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato (alluvionale o frantumato), posto pari a 14, d è il generico diametro dello staccio e D è la dimensione massima dell'aggregato, posto pari al diametro precedente a quello in cui si ha il 100% di passante.

Tabella 55: coefficiente A

Tipo aggregato	Consistenza secondo Abrams	Coefficiente A
alluvionale	S1	4-8
alluvionale	S2-S3-S4	8-10
alluvionale	S5	10-12
frantumazione	S1	6-10
frantumazione	S2-S3-S4	12-14
frantumazione	S5	14-16

Attraverso il risolutore di Excel sono state calcolate le percentuali volumiche teoriche di aggregati da impiegare (Appendice B).

Le percentuali utilizzate sono state leggermente diverse, come evidenziato in Appendice B, perché il foglio di calcolo non era stato ancora messo a punto perfettamente. Tale differenza nelle percentuali ha comportato un deficit, quantificato in circa 100 grammi di riciclato 15/30 per ogni provino R2.X.

Naturali

I rapporti quantitativi sono indicati in Tabella 56.

Le prove di resistenza a compressione non sono state effettuate poiché vedendo i risultati dei provini R si è preferito rifare i provini integrandoli con la frazione granulometrica intermedia come descritto a inizio capitolo.

Tabella 56: rapporti quantitativi provini naturali seconda prova

Provino	Massa cemento (g)	Massa acqua (g)	Massa Sabbia granita (g)	Massa Pietrisco 15/30 (g)	Osservazioni
N2.1	511	232	876	753	1% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante) 5.3
N2.2	511	232	876	750	1% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante) 5.3
N2.3	511	229	876	750	1% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante) 5.0
N2.4	511	232	876	751	1% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante) 5.2
N2.5	511	230	876	747	1% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante) 5.0
<p>Inizio presa: 2.1-2.2 data 07/10/2019 ore 13:00 2.3-2.4-2.5 data 07/10/2019 ore 14:30</p> <p>Scasseratura: 2.1-2.2-2.3-2.4-2.5 data 08/10/2019 ore 16:00</p> <p>Prove: NON EFFETTUATE (04/11/19) Tolti dall'acqua il 05/11/19</p>					

Riciclati

I provini R sono stati estratti dall'acqua la mattina stessa in cui si è effettuata la prova e circa 2 h dopo sono stati messi in forno a 100°C per 60 minuti avendo constatato l'eccessiva umidità dei campioni.



Figura 122: campioni

Nonostante ciò il primo campione dopo rottura ha evidenziato visivamente una quantità di umidità interna residua ancora eccessiva perciò è stato deciso di effettuare le altre prove il giorno successivo alle ore 14, lasciando essiccare fino a quel momento i campioni in forno a 30°C.

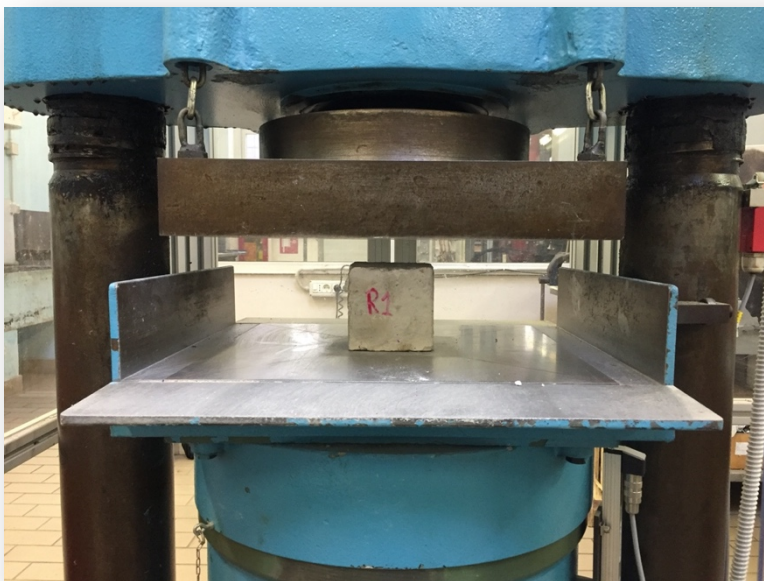


Figura 123: campione pronto per il test



Figura 124: campione a fine prova



Figura 125: residuo del campione

Osservando la Figura 125 si vede come il provino abbia avuto una rottura soddisfacente, come indicato nella UNI EN 12390-3.

Le resistenze ottenute sono illustrate nella seguente tabella:

Tabella 57: risultati prova a compressione

Provino	Data/tempo	a (mm)	b (mm)	h (mm)	S ₀ (mm ²)	m (kg)	ρ (g/cm ³)	F _{max} (kN)	σ _m (N/mm ²)
R2.1	24/10/2019	100,0	95,0	100,0	9500,00	2,015	2,1211	82,69	8,70
R2.2	25/10/2019	100,0	96,0	100,0	9600,00	2,005	2,0885	156,75	16,33
R2.3	25/10/2019	102,0	95,0	100,0	9690,00	1,975	2,0382	126,71	13,08
R2.4	25/10/2019	100,0	92,0	105,0	9200,00	1,97	2,0393	167,24	18,18
R2.5	25/10/2019	100,0	90,0	105,0	9000,00	1,96	2,0741	159,26	17,07

“a” e “b” indicano le dimensioni di base dei provini, “h” indica l’altezza e S₀ l’area di base.

La prova è stata effettuata con una velocità di applicazione del carico di 13,5 kN/s e un precarico dello 0,3%F_{nom}

Da questa seconda prova è emersa una potenziale influenza dell’umidità interna residua sulla resistenza a compressione del materiale. Infatti, il primo provino è l’unico la cui resistenza è all’incirca metà della media degli altri quattro.

Va inoltre osservato come il processo di mix design tradizionale non consenta di arrivare neanche alla metà della resistenza a compressione di progetto, pari a 40 MPa.

Tabella 58: rapporti quantitativi provini riciclati seconda prova

Provino	Massa cemento (g)	Massa acqua (g)	Massa Sabbietta Riciclata (g)	Massa Frantumato Riciclato 15/30 (g)	Osservazioni
R2.1	478	215	800	596	4% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante)
R2.2	478	215	800	597	4% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante)
R2.3	478	215	800	597	4% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante)
R2.4	478	215	800	599	4% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante)
R2.5	478	215	800	597	4% w/w cemento Mapei SP1 (superfluidificante)
<p>Inizio presa: 2.1-2.2 data 26/09/2019 ore 12:11 2.3-2.4-2.5 data 26/09/2019 ore 18:00</p> <p>Scasseratura: 2.1-2.2-2.3-2.4-2.5 data 27/09/2019 ore 18:00</p> <p>Prove: Giovedì 24/10/2019 9:30 (60 minuti a 100°C perché umidi Prima prova sul 1°= Rck circa 8 1 giorno a 30°C e provo gli altri 4)</p> <p>*Osservazione: errore di mescolamento nel 2.3*</p>					

Terza prova

Per questa prova era prevista l'introduzione un terzo aggregato da aggiungere come frazione intermedia nelle due tipologie di mix.

L'aggregato in questione è il pietrisco 5/15 che è stato sottoposto per la prima volta al procedimento di marcatura nell'anno 2019, avvenuto con esito positivo. La relativa DOP è in All. 9.

La curva granulometrica è stata ottenuta dal sottoscritto utilizzando il laboratorio che ha effettuato le prove di controllo sull'aggregato.

Era previsto l'utilizzo di casseri commerciali cubici di spigolo 15 cm, come da normativa, realizzati in polistirolo espanso. Il disarmante da utilizzare era il Disarmwood Index e il fluidificante il Fluibeton 950 dosato, anche in questo caso, per un primo tentativo all'1% in peso sul cemento per i provini N e al 4% in peso sul cemento per i provini R.

I quantitativi dei provini N e R sono indicati rispettivamente in Tabella 59 e Tabella 60 e il relativo foglio di calcolo è in Appendice C.

Tabella 59: rapporti quantitativi provini naturali terza prova

Provino	Massa cemento (g)	Massa acqua (g)	Massa Sabbia granita (g)	Massa Pietrisco 5/15 (g)	Massa Pietrisco 15/30 (g)	Osservazioni
N3.X	1725	776	2839	852	1762	1% w/w cemento FLUIBETON (fluidificante)

Tabella 60: rapporti quantitativi provini riciclati terza prova

Provino	Massa cemento (g)	Massa acqua (g)	Massa Sabbietta Riciclata (g)	Massa Pietrisco 5/15 (g)	Massa Frantumato Riciclato 15/30 (g)	Osservazioni
R3.X	1613	726	2413	0	2534	4% w/w cemento FLUIBETON (fluidificante)

Come si può osservare, la curva granulometrica di progetto dei riciclati permette già di approssimare molto bene la curva di riferimento (Grafico 12), infatti dai calcoli non emerge la necessità di integrare tale mix con il pietrisco 5/15.

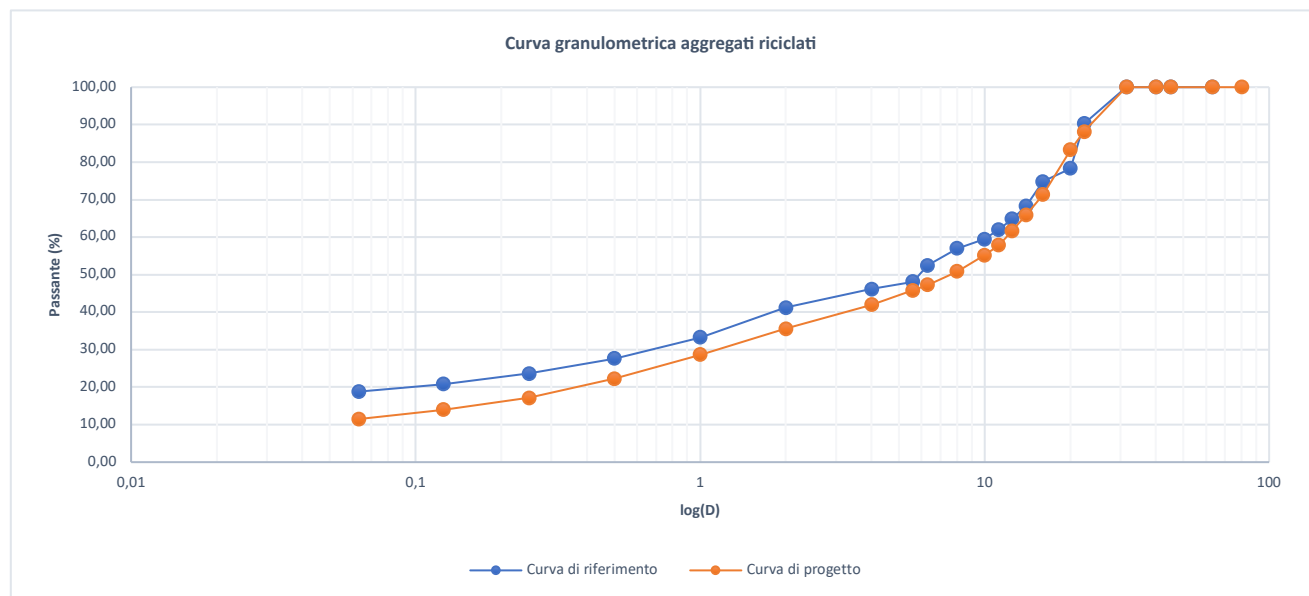


Grafico 12: curve granulometriche e di riferimento del mix con aggregati riciclati

Quarta prova

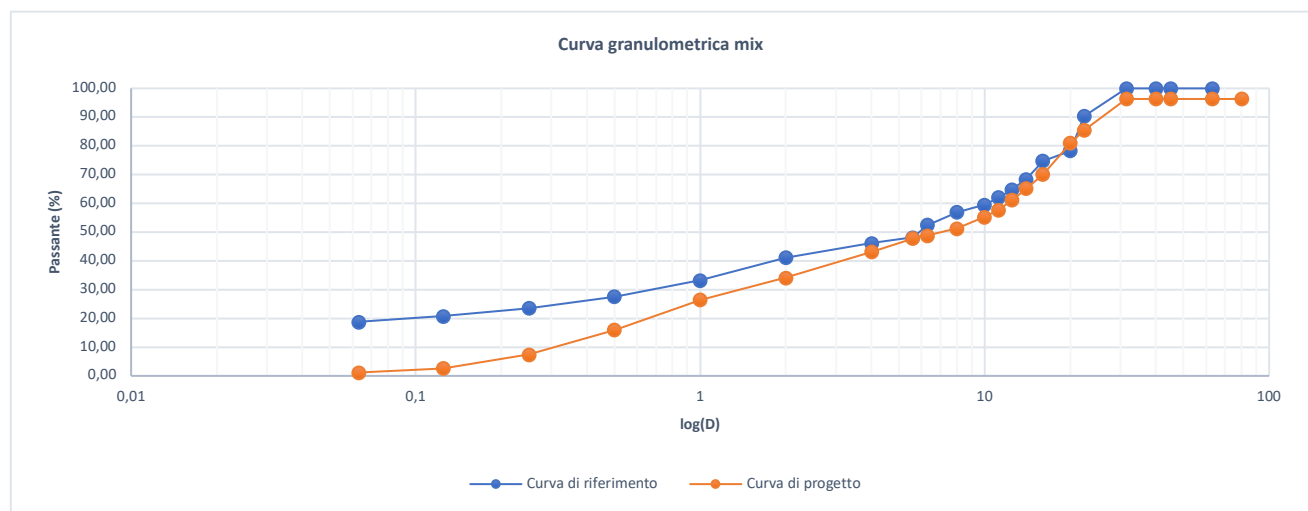
Per la realizzazione di questo set di provini era stata prevista la realizzazione di un mix, utilizzando le correlazioni degli step precedenti, ottenuto partendo da quello dei provini R3.X e sostituendo la sabbietta riciclata con la sabbia granita. Questo avrebbe permesso di valutare l'influenza della sabbietta riciclata sul RAC.

I casseri, il disarmante, il fluidificante e il relativo dosaggio (4% in peso sul cemento) sarebbero rimasti gli stessi della prova precedente.

I quantitativi dei provini sono indicati in Tabella 61 e in Appendice D.

Tabella 61: rapporti quantitativi provini riciclati quarta prova

Provino	Massa cemento (g)	Massa acqua (g)	Massa Sabbietta granita (g)	Massa Pietrisco 5/15 (g)	Massa Frantumato Riciclato 15/30 (g)	Osservazioni
R4.X	1613	726	2566	217	2322	4% w/w cemento FLUIBETON (fluidificante)



Quinta prova

Per la realizzazione di questo set di provini sarebbero stati utilizzati gli aggregati del precedente set, dosati però attraverso l'utilizzo del metodo "Equivalent Mortar Volume" [236].

In questo modo si sarebbe riusciti a valutare l'efficacia dell'utilizzo di un metodo di mix design specifico per gli RCA grossi confrontando le resistenze a compressione ottenute con quelle dei provini del set precedente.

I casseri e il disarmante sarebbero rimasti gli stessi ma il fluidificante non sarebbe stato usato perché l'utilizzo di questo metodo di mix design porta già ad ottenere un impasto con una lavorabilità buona.

9. CONCLUSIONI

Dall'analisi della letteratura e dalle osservazioni sperimentali sugli RCA utilizzati per le prove di laboratorio si può affermare che l'RCA grosso è composto principalmente da calcestruzzo e suoi prodotti, oltre che da aggregati non legati, legati e pietre naturali.

È stato osservato che tale aggregato è scomponibile in due parti: aggregato vergine e malta aderente.

L'aggregato vergine è l'aggregato naturale che è stato utilizzato per la produzione del calcestruzzo la cui demolizione e il cui trattamento hanno permesso di ottenere l'RCA.

La malta aderente è una matrice cementizia la cui alta porosità influisce negativamente sulla durabilità del RAC e sulla sua lavorabilità perché determina un alto assorbimento d'acqua.

Tra l'aggregato vergine presente all'interno dell'RCA e la malta aderente vi è una ITZ che è ricca di microfratture e micropori ed è quella che influenza maggiormente e negativamente le performance meccaniche. La ITZ è costituita da $Ca(OH)_2$, altri prodotti di idratazione (principalmente $C - S - H$ ed ettringite) e particelle di cemento non idratate.

La cinetica di assorbimento dell'acqua è molto veloce nei primi minuti in cui l'RCA è a contatto con l'acqua, per poi diventare più lenta dopo 30 minuti. In particolare, nei primi 5 minuti viene già assorbito l'80-90% dell'acqua.

La lavorabilità è anche influenzata dalla forma, dalla tessitura e dalla granulometria degli aggregati più che dal loro quantitativo totale.

Riguardo l'RCA fine è stato osservato che è composto per la quasi totalità da malta aderente.

La distribuzione granulometrica tra RCA e NCA è simile, tranne che per la frazione fine dove l'RCA si presenta generalmente più fine del corrispondente naturale perché costituito da particelle di malta aderente.

Inoltre, la rugosità degli RCA è generalmente maggiore degli NCA e ciò contribuisce alla perdita di lavorabilità.

L'RCA grosso tuttavia può essere usato nei calcestruzzi in diversi stati che sono riassumibili negli stati OD, AD, SSD e preventivamente inumidito.

- L'utilizzo degli aggregati nello stato AD è quello che permette di ottenere un buon slump senza penalizzare la resistenza a compressione.
- Nello stato OD se si aggiunge acqua alla miscela al fine di saturare gli aggregati, l'incremento di slump iniziale è dovuto all'alta acqua libera presente inizialmente: quest'acqua ha un effetto negativo perché può causare la segregazione del calcestruzzo. L'uso di RCA in questo stato provoca un forte assorbimento d'acqua che ha come conseguente una perdita di slump repentina.
- Nello stato SSD e quando gli RCA sono preventivamente inumiditi l'acqua presente può causare il fenomeno di bleeding. Conseguentemente la resistenza si riduce e il rapporto w/c deve essere adeguato. Questo però permette di avere lavorabilità pari a quelle di un analogo NAC.

Quando poi gli aggregati sono utilizzati con gradi di sostituzione superiori al 50% la miscela diventa meno coesiva e questa lacuna di coesione affligge le proprietà meccaniche e di durabilità. In generale un grado di sostituzione tra il 20 e il 40% è quello ottimale per non avere significative perdite di resistenza.

Un corretto dosaggio di RCA fini e grossi inoltre aiuta ulteriormente a migliorare le performance meccaniche.

Generalmente l'utilizzo di RFA influenza negativamente tali performance.

Ulteriori considerazioni sono:

- Non ci sono correlazioni tra le resistenze a compressione e a trazione indiretta quando si usano gli aggregati riciclati.
- Tra i 28 giorni e i 5 anni di maturazione gli incrementi di resistenze sono maggiori nei RAC. Dopo 5 anni, i RAC hanno minore resistenza a compressione ma maggiore resistenza a trazione indiretta rispetto ai corrispettivi NAC.
- Il ritiro e la deformazione sotto carichi di lunga durata dei RAC sono influenzati negativamente dall'uso di RCA.
- Al crescere del periodo di attacco da nitrato di ammonio decrescono le proprietà meccaniche e quelle dei mix con NCA si mantengono superiori a quelle dei mix con RCA.
- L'uso di RCA influenza le proprietà fisiche, in particolare l'assorbimento d'acqua capillare e la permeabilità ai gas.

È stato osservato inoltre che l'utilizzo di un mix design specifico per gli RCA come l'"Equivalent Mortar Volume" può comportare innumerevoli vantaggi:

- I RAC prodotti con questo metodo hanno maggiori slump, densità (mix fresco e indurito), modulo elastico e resistenza a compressione comparabile con i RAC con lo stesso rapporto w/c ma progettati con il mix design tradizionale.
- Applicando questo metodo il contenuto di cemento e fini nei RAC può essere notevolmente ridotto senza compromettere le proprietà del mix fresco e indurito in comparazione a un equivalente mix composto interamente da NCA.
- Usando materiali aggiuntivi come ceneri volanti e/o bfs il contenuto di cemento può essere ulteriormente ridotto senza alterare le proprietà del calcestruzzo fresco e indurito, ad eccezione di quando vengono utilizzate le ceneri volanti che affliggono la resistenza a compressione a breve termine.
- Usando il metodo EMV possono essere progettati RAC con differenti contenuti di RCA al fine di avere le stesse proprietà meccaniche di un equivalente mix costituito solo da NCA.
- Se utilizzando questo metodo si possono avere le stesse proprietà meccaniche dei NAC, ci si può aspettare che le varie relazioni intercorrenti tra le varie proprietà meccaniche e fisiche possano essere applicate anche ai RAC.
- Se utilizzando questo metodo si ottengono mix con lo stesso TM e la stessa quantità di NCA dell'equivalente NAC, piccole differenze tra la resistenza e la densità della RM e della nuova malta, oltre alla differenza tra l'OVA e l'NCA, non provocano grandi differenze sulle proprietà finali del RAC.

Poiché la malta aderente influenza molto le performance dei RAC è necessario intervenire su quest'ultima rimuovendola o migliorandone le proprietà. In particolare:

- La soluzione di HCl , a concentrazione adeguata, può essere utilizzata per la rimozione della malta aderente e per ottenere di conseguenza un RCA trattato che può essere usato per la produzione di calcestruzzo strutturale.
- L'uso di emulsioni polimeriche sulla superficie dell'RCA ne riduce la porosità, ma il film idrofobo prodotto dalla reazione tra il polimero a base di silicio e il $C - S - H$ non favorisce il legame tra RCA e la nuova pasta cementizia. L'RCA imbevuto di soluzione di PVA è adatto comunque a produrre calcestruzzo strutturale, ma va considerato l'effetto negativo del liquido di scarto che genera.
- L'aggiunta di materiali pozzolanici, come FA, SF, scorie di altoforno e NS, riempiono l'RCA e reagiscono con $Ca(OH)_2$ per formare $C - S - H$ e andare a rivestire la superficie dell'RCA, riducendone la porosità e migliorando l'ITZ. I materiali pozzolanici sono disponibili come sottoprodotti industriali e rispettano l'ambiente.
- Rispetto all'NMA, i diversi metodi di miscelazione migliorati, come TSMA, SEMA, MMA, TM e OTM, pre-miscelano una parte dell'RCA con una parte dei costituenti per formare un rivestimento di cemento a basso rapporto w/c e/o un rivestimento pozzolanico sulla superficie dell'RCA, riempiendo i pori dell'aggregato e della ITZ.
- Il $CaCO_3$ precipitato dai batteri sulla superficie dell'RCA riduce la porosità dell'RCA e migliora la nuova ITZ. La biodeposizione di $CaCO_3$ non è dannosa per l'ambiente ma il trattamento dovrebbe essere ulteriormente studiato.
- L'RCA è di solito trattato in condizioni di carbonatazione accelerata. La CO_2 reagisce con $Ca(OH)_2$ e $C - S - H$ per produrre $CaCO_3$ che riduce la porosità dell'RCA e migliora le ITZ. L'RCA carbonatato è adatto ad essere utilizzato per il calcestruzzo armato e la carbonatazione è benefica per l'ambiente perché può assorbire CO_2 .

I metodi per rimuovere la malta aderente sono adatti solo per gli RCA grossi, poiché la percentuale di malta attaccata che hanno è inferiore a quella degli RFA, i quali sono a loro volta costituiti quasi interamente da malta aderente.

I metodi con le emulsioni polimeriche, la biodeposizione di $CaCO_3$, e il trattamento con CO_2 si prestano attualmente solo al miglioramento della microstruttura degli RCA grossi, mentre i tre metodi con materiali pozzolanici, come SF, FA e scorie, e i diversi metodi di miscelazione e carbonatazione accelerata possono migliorare sia la microstruttura degli RFA che degli RCA grossi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] «D. Lgs. n. 152/2006,» 2006. [Online].
Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/dettaglio/codici/materiaAmbientale>.
- [2] «Decisione 2014/955/CE,» 2014. [Online].
Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32014D0955>.
- [3] «Direttiva 75/442/CEE,» 1975. [Online].
Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:01975L0442-19911223&from=EN>.
- [4] «Direttiva 2008/98/CE,» [Online].
Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0098>.
- [5] «D. Lgs. n. 22/1997,» 1997. [Online].
Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1997/02/15/097G0043/sg>.
- [6] «UNI 10006,» 2002. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-10006-2002>.
- [7] «UNI EN 13242,» 2004. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-13242-2008>.
- [8] «UNI EN 13285,» 2004. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-13285-2018>.
- [9] «UNI EN ISO 14688-1,» 2003. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-iso-14688-1-2018>.
- [10] «UNI EN ISO 14688-2,» 2004. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-iso-14688-2-2018>.
- [11] «Circolare n. 5205/2005,» 2005. [Online].
Available:
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2005-07-25&atto.codiceRedazionale=05A07377&elenco30giorni=false.
- [12] «D.M. n. 203/2003,» 2003. [Online].
Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2003/08/05/003G0228/sg>.
- [13] «UNI EN 12620,» 2008. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-12620-2008>.
- [14] «UNI EN 206,» 2016. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-206-2016>.
- [15] «UNI 11531-1,» 2014. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-11531-1-2014>.
- [16] G. Hera, «Rifiuti: da problema a risorsa,» [Online].
Available: https://www.gruppohera.it/gruppo/com_media/dossier_rifiuti/articoli/pagina48.html. [Consultato il giorno 1 Luglio 2020].
- [17] «Recycling Industry,» [Online].
Available: <https://www.recyclind.it/ita/2677/irifiutimondialiaumenterannodel70entroil2050/>. [Consultato il giorno 10 03 2020].
- [18] P. Europeo. [Online].
Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>.
- [19] «Rapporto Rifiuti Speciali,» 2019.
- [20] «Codice Ateco,» [Online].
Available: <https://www.codiceateco.it/codice-ateco>. [Consultato il giorno 02 08 2020].
- [21] «D.P.R. n. 445/2000,» [Online].
Available: <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/00443dla.htm>.
- [22] «DM n. 145/1998,» [Online].

- Available:
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1998-05-13&atto.codiceRedazionale=098G0187&elenco30giorni=false.
- [23] «Regolamento CE n. 2150/2002,» [Online].
 Available: <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/f8707347-ff46-4c26-bcfa-2a9968a04fdf/language-it>.
- [24] «Decisione 2011/753/UE,» [Online].
 Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32011D0753>.
- [25] «Direttiva 2018/851/UE,» [Online].
 Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>.
- [26] «D.M. 5 febbraio 1998,» [Online].
 Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1998/04/16/098A3052/sg>.
- [27] «D.M. n. 186/2006,» [Online].
 Available:
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-05-19&atto.codiceRedazionale=006G0202&elenco30giorni=false.
- [28] «UNI 10802,» [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-10802-2013>.
- [29] «UNI EN 14899,» [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-14899-2006>.
- [30] «UNI 8520-1,» [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-8520-1-2015>.
- [31] «UNI 8520-2,» [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-8520-2-2016>.
- [32] «UNI/PdR 75,» 2020. [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-pdr-75-2020>.
- [33] «D.Lgs. n. 81/2008 - Testo Unico per la sicurezza sul lavoro,» [Online].
 Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2008/04/30/008G0104/sg>.
- [34] «D. Lgs. n. 4/2008,» [Online].
 Available: <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/08004dl.htm>.
- [35] «Norme Tecniche per le Costruzioni,» 2018. [Online].
 Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>.
- [36] «Regolamento UE n. 305/2011,» [Online].
 Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:IT:PDF>.
- [37] «Direttiva 89/106/CEE,» [Online].
 Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:31989L0106>.
- [38] ANPAR, «Gli aggregati riciclati nelle opere edili pubbliche e private: le opportunità ambientali ed economiche,» [Online].
 Available: <http://anpar.org/wp-content/uploads/2018/10/GLI-AGGREGATI-RICICLATI-Impaginato-def.pdf>.
 [Consultato il giorno 15 Marzo 2020].
- [39] «UNI EN 932-3,» [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-932-3-2004>.
- [40] «UNI EN 933-11,» [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-933-11-2009>.
- [41] «UNI EN 2332,» 1993. [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-2332-1993>.
- [42] «UNI EN 1992-1-2,» 2019. [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-1992-1-2-2019>.
- [43] «UNI 11104,» 2016. [Online].
 Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-11104-2016>.

- [44] Y.-Y. T. T.-P. C. C.-Y. C. Yong-Huang Lin, «An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates», *Cement and Concrete Research*, vol. 34, p. 1373–1380, 2004.
- [45] N. Belavendram, «Quality by Design», 1995.
- [46] G. Taguchi, «Introduction to Quality Engineering», 1986.
- [47] T. P. A. Garcia-Diaz, «Principles of Experimental Design and Analysis», 1995.
- [48] B. G.-F. F. M.-A. D. C.-L. González-Taboada, «Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis», *Materiales de Construcción*, vol. 66, n. 33, p. e089, 2016.
- [49] «UNI EN 933-1», 2012. [Online].
Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-933-1-2012>.
- [50] P. Gonçalves e J. De Brito, «Recycled aggregate concrete (RAC) - comparative analysis of existing specifications», *Mag. Concr. Res.*, vol. 62, n. 5, p. 339–346, 2010.
- [51] BS 8500-2, [Online].
Available: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030371365>.
- [52] DIN 4226-100:2002-2, [Online].
- [53] LNEC E 471, [Online].
- [54] Ot 70085, 2006. [Online].
- [55] RILEM TC 121-DRG, «Specifications for concrete with recycled aggregates», *Materials and Structures*, vol. 27, n. 173, p. 557–559, 1994.
- [56] WBTC No. 12/2002, «Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates», 2002. [Online].
- [57] EHE-08, «Spanish Instruction for Structural Concrete (2008) Ministry of Public Works, August-08 (in Spanish).», [Online].
- [58] D. Pedro, J. De Brito e L. Evangelista, «Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, p. 141–151, 2014.
- [59] M. De Juan e P. Gutiérrez, «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.», *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n. 2, p. 872–877, 2009.
- [60] A. Akbarnezhad, K. Ong, M. Zhang, C. Tam e T. Foo, «Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n. 8, p. 3469–3479, 2011.
- [61] C. T. K. L. V.W. Tam, «Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 50, n. 1, p. 82–101, 2007.
- [62] V. Spaeth e A. Djerbi Tegger, «Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments.», *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 2, p. 43–152, 2013.
- [63] B. González-Fonteboa e F. Martínez-Abella, «Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties.», *Mater. Construcc.*, vol. 55, n. 279, p. 53–66, 2005.
- [64] T. Hansen e H. Narud, «Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate», *Concr. Int.*, vol. 5, n. 1, pp. 79-83, 1983.
- [65] L. Xuping, «Recycling and reuse of waste concrete in china: Part I.», *Material behaviour of recycled aggregate concrete. Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, pp. 36-44, 2008.
- [66] R. Ravindrarajah Sri e C. Tam, «Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate», *Mag. Concr. Res.*, vol. 37, n. 130, pp. 29-38, 1985.
- [67] P. Alaejos, M. Sánchez, E. Vázquez e e. al., «Use of Recycled Aggregate in the Production of Structural Concrete (in Spanish)», *Monograph M-11 ACHE*, 2006.
- [68] V. Tam, K. Wang e C. Tam, «Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis», *J. Hazard Mater.*, pp. 703-714, 2008.
- [69] C. Zega, Y. Villagrán-Zaccardi e A. Di Maio, «Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates», *Mater. Struct.*, vol. 43, p. 195–202, 2010.
- [70] C.-S. P. M. E. Shi-Cong Kou, «Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete», *Cement & Concrete Composites*, vol. 33, p. 286–291, 2011.

- [71] C. M. M. B. S. Manzi, «Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 37, pp. 312-318, 2013.
- [72] N. A. L. M. Layachi Berredjem, «Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 246, pp. 118-421, 2020.
- [73] G. F. F. Dreux, «Nouveau guide du béton et ses constituants,» 2007.
- [74] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas e E. Wirquin, «Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete,» *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.
- [75] P. Saiz-Martínez, M. González-Cortina e F. Fernández-Martínez, «Characterization and influence of fine recycled aggregates on masonry mortars properties,» *Mater. Construcc.*, vol. 65, n. 319, p. e058, 2015.
- [76] S. G. A. S. T. H. M. Nagataki, «Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, n. 6, p. 965-971, 2004.
- [77] M. Chakradhara Rao, S. Bhattacharyya e S. Barai, «Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete,» *Mater. Struct.*, vol. 44, n. 1, p. 205-220, 2011.
- [78] A. Padmini, K. Ramamurthy e M. Mathews, «Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n. 2, p. 829-836, 2009.
- [79] «EN 1097-6,» [Online].
- [80] M. Rühl, «Water Absorption Capacity of Recycled Demolition Rubbish,» 1992.
- [81] P. Belin, G. Habert, M. Thiery e N. Roussel, «Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates,» *Mater. Struct.*, vol. 47, n. 9, p. 1451-1465, 2014.
- [82] A. Djerbi Tegger, «Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, n. 1, p. 112-116, 2012.
- [83] Japanese Standards Association, *JIS A 5021*, Tokyo, 2005.
- [84] Japanese Standards Association, *JIS A 5022*, Tokyo, 2006.
- [85] Japanese Standards Association, *JIS A 5023*, Tokyo, 2007.
- [86] NBR 15.116, Rio de Janeiro, 2005.
- [87] F. D. S. Kenai, «Characterization of the durability of recycled concrete based on fine and coarse aggregates of bricks and crushed concrete,» *Mater. Struct.*, vol. 44, p. 815-824, 2011.
- [88] B. C. S. A. E. H. A. C. M. Quattrone, «Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 123, p. 690-703, 2016.
- [89] M. L. F. A. J. O. J. A. J. M. L. Garach, «sub-base, Improvement of bearing capacity in recycled aggregates suitable for use as unbound road,» *Materials*, vol. 8, n. 12, p. 8804-8816, 2015.
- [90] A. A. J. d. B. J. C. R. S. T. Vieira, «Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware,» *Mater. Des.* 90, p. 767-776, 2016.
- [91] M. De Juan, *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural*, PhD Dissertation, P. U. o. Madrid, A cura di, Madrid, 2005.
- [92] Z. Sánchez-Roldán, M. Martín-Morales, I. Valverde-Palacios, I. Valverde-Espinosa e M. Zamorano, «aggregate, Study of potential advantages of pre-soaking on the properties of pre-cast concrete made with recycled coarse,» *Mater. Construc.*, vol. 66, n. 321, p. e076, 2016.
- [93] N. Bairagi, K. Ravande e V. Pareek, «Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates,» *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 9, n. 1-2, p. 109-126, 1993.
- [94] K. Younis e K. Pilakoutas, «Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, p. 688-701, 2013.
- [95] S. Seara-Paz, B. González-Fonteboa, J. Eiras-López e M. Herrador, «Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete,» *Mater. Struct.*, vol. 47, n. 1-2, p. 323-334, 2014.
- [96] M. Martín-Morales, M. Zamorano, A. Ruiz-Moyano e I. Valverde-Espinosa, «Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish structural concrete code EHE-08,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n. 2, p. 742-748, 2011.

- [97] A. Barbudo, J. De Brito, L. Evangelista, M. Bravo e F. Agrela, «Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete,» *J. Clean. Prod.*, vol. 59, p. 93–98, 2013.
- [98] M. De Oliveira e E. Vázquez, «The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete,» *Waste Manage*, vol. 16, n. 1-3, p. 113–117, 1996.
- [99] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí e M. Barra, «Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.
- [100] N. D. B. J. E. L. Fonseca, «The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp. 637-643, 2011.
- [101] J. Gómez-Soberón, «Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, n. 8, p. 1301– 1311, 2002.
- [102] F. López Gayarre, C. López-Colina Pérez, M. Serrano López e A. Domingo Cabo, «The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, p. 260–266, 2014.
- [103] J. Vieira, J. Correia e J. De Brito, «Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, n. 5, p. 533–541, 2011.
- [104] A. Domingo-Cabo, C. Lázaro, F. López-Gayarre, M. Serrano-López, P. Serna e J. Casta-o-Tabares, «Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n. 7, p. 2545–2553, 2009.
- [105] D. Kong, T. Lei, J. Zheng, C. Ma, J. Jiang e J. Jiang, «Effect and mechanism of surface-coating pozzolanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n. 5, p. 701–708, 2010.
- [106] F. López, *Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas. PhD Dissertation*, University of Oviedo, 2008.
- [107] Y. Haitao e T. Shizhu, «Preparation and properties of high-strength recycled concrete in cold areas,» *Mater. Construcc.*, vol. 65, n. 318, p. e050, 2015.
- [108] O. K. H. O. L. B. N. A. Houria Mefteh, «Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 54, pp. 282-288, 2013.
- [109] B. Z. C. P. D. Xuan, «Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates,» *Cement Con. Comp.*, vol. 84, p. 214–221, 2017.
- [110] J. Kollek, «The determination of the permeability of concrete to oxygen by the cembureau method-A recommendation,» *Mater. Struct.*, vol. 22, p. 225–230, 1989.
- [111] S. C. U. Schneider, «The leaching effect of concrete immersed in ammonium nitrate solution. RILEM TC 211-PAE Final Conference: Concrete in Aggressive Aqueous Environments: Performance, Texting and Modelling».
- [112] «UNI EN 1250-2,» 2019. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-12350-2-2019>.
- [113] Z. S. L. L. H. F. S. K. C.S. Poon, «Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 34, p. 31–36, 2004.
- [114] L. L. C. P. F. Z. Y.L. Wong, «Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interface,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, p. 1905 – 1913, 1999.
- [115] Z. S. S. Y. M. B. E. E. F. B. M. Sérifou, «A study of concrete made with fine and coarse aggregates recycled from fresh concrete waste,» *J. Constr. Eng.*, vol. 5, 2013.
- [116] Z. S. L. L. C.S. Poon, «Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, p. 461–468, 2004.
- [117] W. L. Y. F. X. H. J. Xiao, «An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011),» *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, p. 364–383, 2012.
- [118] NF EN 206-1, [Online].
- [119] M. JC, «The bond between aggregates and hydrated cement paste.,» in *Proc 7th Int congress on the chemistry of cement*, Septima ed. Paris, I:VII 1/3-1/15, 1980.
- [120] Q. X. C. D. Poon CS, «The cause and influence of self-cementing properties of recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base,» *Waste Manage 2006*, vol. 26, p. 1166–72.

- [121] J. L. Q. T. Z. Li, «Method for controlling the absorbed water content of recycled fine aggregates by centrifugation,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, p. 316–325, 2018.
- [122] J. Weerheijm, *Understanding the tensile properties of concrete*, Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [123] A. Djerbi, «Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, p. 1023–1033, 2018.
- [124] N. A., *Properties of concrete*, New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [125] B. ZP, *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*, Chichester: John Wiley & Sons, 1988.
- [126] R. A. I. O. A. F. B. F. S. Fathifazl G, «Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate,» *Cem Concr Comp*, vol. 33, n. 10, p. 1026–37, 2011.
- [127] W. F. Bazant ZP, *Creep and shrinkage in concrete structures*, Chichester: John Wiley & Sons, 1982.
- [128] N. Y. Y. L. Ruijun Wang, «Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review,» *Construction and Building Materials*, vol. 242, 2020.
- [129] Y. L. J. Z. W. L. L. C. Z. X. C. J. Shi, «Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review,» *J. Clean. Prod.*, vol. 112, p. 466–472, 2016.
- [130] D. Montgomery, «Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate, in: *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium Organised by the Concrete Technology Unit*,» p. 287–296, 1998.
- [131] M. H. F. S. K. Yoda, «Field application and advantage of concrete recycled in-situ recycling systems, in: *Recycling and Reuse of Waste Materials*,» p. 437–446, 2003.
- [132] J. Y. H. S. K. M. L. L. J. X. W. M. Shaban, «Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: a review,» *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 17, p. 151–167, 2019.
- [133] T. N. H. Ogawa, «Improving the quality of recycled fine aggregate by selective removal of brittle defects,» *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 10, p. 395–410, 2012.
- [134] Z. H. X. L. F. M. X. W. Ma, «Thermal treatment of waste concrete and the rehydration properties of the dehydrated cement paste,» *J. Qingdao Technol. Univ.*, vol. 30, p. 93–97, 2009.
- [135] C. T. K. L. V. Tam, «Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches,» *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 50, p. 82–101, 2007.
- [136] J. W. X. Q. P. C. Y. X. J. G. L. Wang, «An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, p. 432–441, 2017.
- [137] A. Katz, «Treatments for the improvement of recycled aggregate,» *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 16, n. 6, p. 597–603, 2004.
- [138] H. X. Y. Z. J. Li, «Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009.
- [139] C. L. V. T. C. P. W. D. W. Li, «Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, p. 42–50, 2017.
- [140] C. T. V. W. Tam, «Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA_{sc},» *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, p. 2068–2077, 2008.
- [141] C. P. S. C. Kou, «Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 32, p. 649–654, 2010.
- [142] S. K. C. P. J. D. Q. L. Y. G. Zhu, «Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, p. 32–38, 2013.
- [143] B. V. S. V. J. S. N. B. N. D. J. Wang, «Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates,» *J. Clean. Prod.*, vol. 156, p. 355–366, 2017.
- [144] B. P. Z. M. Z. H. Z. D. Chaofeng Liang, «Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 105, 2020.

- [145 J. W. L. W. Y. X. X. Q. H. M. P. Chen, «Producing vaterite by CO₂ sequestration in the waste solution of chemical treatment of recycled concrete aggregates,» *J. Clean. Prod.*, vol. 149, p. 735–742, 2017.
- [146 B. Z. C. P. D.X. Xuan, «Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 65, p. 67–74, 2016.
- [147 S. M. W. Y. N. Otsuki, «Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete,» *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 15, n. 5, p. 443–451, 2003.
- [148 X. G. C. T. V.W. Tam, «Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.
- [149 X. G. C. T. V.W. Tam, «Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete,» *Mag. Concr. Res.*, vol. 58, n. 7, p. 477–484, 2006.
- [150 C. T. V.W. Tam, «Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach,» *J. Mater. Sci.*, vol. 42, n. 10, p. 3592–3602, 2007.
- [151 C. T. Y. W. V.W. Tam, «Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, n. 10, p. 1928–1939, 2007.
- [152 S. P. S. N. P. Rajhans, «Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, p. 557–570, 2018.
- [153 Z. Y. F. V. Y. X. Y.C. Liang, «Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate,» *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 27, n. 5, 2013.
- [154 S. W. P. Z. L. L. X. C. W. Zhang, «Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, p. 601–607, 2019.
- [155 S. T. F. B. N. L. Y. M. K. Bru, «Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste,» *Int. J. Mineral Process.*, vol. 126, p. 90–98, 2014.
- [156 F. L. L. X. H. Z. Y.Y. Wang, «Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 210, n. 20, p. 540–547, 2019.
- [157 P. D. S. T. H. B. H.K.A. Al-Bayati, «Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, p. 284–298, 2016.
- [158 S. T. H. B. H. A.-B. S. T. H. B. H.K.A. Al-Bayati, «Effect of different treatment methods on the interfacial transition zone microstructure to coarse recycled concrete aggregate,» in *Conference of the Transportation of Canada*, Toronto, 2016.
- [159 C. S. Z. C. M. G. J. Z. B. Lu, «Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete,» *J. Clean. Prod.*, vol. 233, p. 421–428, 2019.
- [160 M. R. S. Ismail, «Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, p. 464–476, 2013.
- [161 M. Z. M. F. Y. W. X. L. G. Pan, «Effect of CO₂ curing on demolition recycled fine aggregates enhanced by calcium hydroxide pre-soaking,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, p. 810–818, 2017.
- [162 H. R. A. H. F. Kazemian, «Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, p. 690–700, 2019.
- [163 A. H. S. K. M. M. C. P. Y. Kim, «Properties enhancement of recycled aggregate concrete through pretreatment of coarse aggregates – Comparative assessment of assorted techniques,» *J. Cleaner Prod.*, vol. 191, p. 339–349, 2018.
- [164 M. R. S. Ismail, «Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, p. 726–739, 2014.
- [165 T. S. K. D. P. Huoth, «Effect of silica fume on recycled aggregate concrete,» in *23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, 2014.
- [166 S. B. B.B. Mukharjee, «Influence of nano-silica on the properties of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 55, p. 29–37, 2014.
- [167 Y. Z. T. M. S. S. H. Zhang, «Surface treatment on recycled coarse aggregates with nanomaterials,» *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, n. 2, p. 1–11, 2016.

- [168 V. C. N. M. H. A. F. Shaikh, «Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete,» *Struct. Concr.*, p. 1–13, 2017.
- [169 J. X. Z. S. S. K. S. S. W.G. Li, «Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, p. 1045–1055, 2012.
- [170 J. Ryu, «Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate,» *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 21, n. 20, p. 1565–1567, 2002.
- [171 M. A. P. S. R. D. S. J. K.K. Sahoo, «Enhancement of properties of recycled coarse aggregate concrete using bacteria,» *Int. J. Smart Nano Mater.*, vol. 7, n. 1, p. 22–38, 2016.
- [172 J. K. D. Z. D. K. A.M. Grabiec, «Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, p. 145–150, 2012.
- [173 D. T. E. Y. J. Qiu, «Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 57, p. 144–150, 2014.
- [174 Y. Z. C. P. Z. F. Z. L. S. S. W. Zeng, «Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled aggregate,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, 2019.
- [175 Y. K. T. Kikuchi, «Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete,» *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 9, p. 115–124, 2011.
- [176 R. R. A. N. J.H. Kim, «Structure and properties of poly(vinyl alcohol)-modified mortar and concrete,» *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, n. 3, p. 407–415, 1998.
- [177 M. D.-O. J. L. V. Spaeth, «Hydration process and microstructure development of integral water repellent cement based materials,» in *5th International conference on water repellent treatment of building materials*, 2008.
- [178 M. Q. V. J. S. A. W.F. Santos, «Roughness, wettability and water absorption of water repellent treated recycled aggregates,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, p. 502–513, 2017.
- [179 C. Peng, «Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling,» *J. Clean. Prod.*, vol. 112, p. 453–465, 2016.
- [180 N. S. S.P. Singh, «Reviewing the carbonation resistance of concrete,» *J. Mater. Eng. Struct.*, vol. 3, p. 35–57, 2016.
- [181 Y. S. S. G. S. Kashef-Haghighi, «Mathematical modeling of CO₂ uptake by concrete during accelerated carbonation curing,» *Cement Concr. Res.*, vol. 67, pp. 1-10, 2015.
- [182 J. C. Y. Fang, «Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 76, p. 360–365, 2015.
- [183 P. U. B. Johannesson, «Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar,» *Cement Concr. Res.*, vol. 31, p. 925–931, 2001.
- [184 H. M. Y. P. Z. M. Z. D. Z. H. C.F. Liang, «Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 218, p. 506–518, 2019.
- [185 J. X. G. Z. L. L. C.H. Wang, «Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, p. 307–320, 2016.
- [186 M. K. A. N. O. Knut, *CO₂ Uptake during the Concrete Life Cycle: the CO₂ Balance of Concrete in a Life Cycle Perspective*, Stockholm: Norden - Nordic Innovation, 2005.
- [187 W. P. H. L. S. Lee, «Life cycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment,» *Energy Build.*, vol. 58, p. 93–102, 2013.
- [188 F. B. J. D. R. Neves, «Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 41, p. 9–15, 2013.
- [189 C. S. Y. L. X. P. C. P. Z. X. J.K. Zhang, «Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, p. 1–7, 2015.
- [190 B. Z. C. P. S.C. Kou, «Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 45, p. 22–28, 2014.
- [191 D. X. S. P. X.L. Fang, «Empirical modelling of CO₂ uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions,» *Mater. Struct.*, vol. 50, p. 200–212, 2017.

- [192] G. H. J. A. K. Y. M. Lim, «Environmental remediation and conversion of carbon dioxide (CO₂) into useful green products by accelerated carbonation technology,» *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 7, p. 203–228, 2010.
- [193] J. L. H. J. M.K. Lim, «Fundamental study on the development of forced carbonization reforming of low-quality recycled aggregates by using a nano-bubble method in Korea,» *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, p. 10094–10101, 2016.
- [194] J. X. D. X. C. P. L. Li, «Effect of carbonation of modeled recycled coarse aggregate on the mechanical properties of modeled recycled aggregate concrete,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 89, p. 169–180, 2018.
- [195] D. X. C. P. B.J. Zhan, «Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO₂ curing coupled with limewater soaking process,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 89, p. 230–237, 2018.
- [196] B. Z. C. P. D.X. Xuan, «Development of a new generation of eco-friendly concrete blocks by accelerated mineral carbonation,» *J. Clean. Prod.*, vol. 133, p. 1235–1241, 2016.
- [197] C. P. Q. L. S. K. C. S. B.J. Zhan, «Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, p. 3–7, 2014.
- [198] G. F. O. I. A. R. B. F. S. F. A. Abbas, «Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 31, p. 555–563, 2009.
- [199] G. P. Y. W. M. F. X. L. M. Zhan, «Effect of presoak-accelerated carbonation factors on enhancing recycled aggregate mortars,» *Mag. Concr. Res.*, vol. 69, p. 838–849, 2017.
- [200] D. X. C. P. C. S. B.J. Zhan, «Effect of curing parameters on CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 71, p. 122–130, 2016.
- [201] L. F. C. A. C. A. M. Castellote, «Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations,» *Mater. Struct.*, vol. 42, p. 515–525, 2009.
- [202] W. T. W. L. Z. D. F. X. H. Cui, «Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, p. 522–527, 2015.
- [203] C. P. M. P. D.J. Anstice, «The pore solution phase of carbonated cement pastes,» *Cement Concr. Res.*, vol. 35, p. 377–383, 2005.
- [204] S. K. W. Tang, «Study on the influence of pressure on the carbon sequestration of recycled aggregate,» *Sichuan. Build. Mater.*, vol. 45, p. 8–10, 2019.
- [205] A. B. K. L. V.W. Tam, «Carbon-conditioned recycled aggregate in concrete production,» *J. Clean. Prod.*, vol. 133, p. 672–680, 2016.
- [206] V. H. B. R. A. P. G. M. J. Vorholz, «Vapor liquid equilibrium of water, carbon dioxide, and the binary system, water carbon dioxide, from molecular simulation,» *Fluid Phase Equilib.*, vol. 170, p. 203–234, 2000.
- [207] L. G. R. S. A. Dadoo, «Carbon implications of end-of-life management of building materials,» *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, p. 276–286, 2009.
- [208] Y. Li, *Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by CO₂ Curing*, Master's Thesis., Changsha: Hunan University, 2014.
- [209] Q. M. J. X. J.W. Ying, «The effect of cumulative aggregate treatment by carbon dioxide levels on properties of concrete,» *J. Build. Mater.*, vol. 20, p. 277–282, 2017.
- [210] Z. Cao, *The Effect of Recycled Aggregate Treated by Carbon Dioxide on Properties of Recycled Concrete*, Master's Thesis, Changsha: Hunan University, 2016.
- [211] C. S. Y. L. X. P. C. P. Z. X. J.K. Zhang, «Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation,» *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 27, n. 11, 2015.
- [212] B. Z. C. P. D.X. Xuan, «Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 84, p. 214–221, 2017.
- [213] C. S. J. Z. J. W. B. Lu, «Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, p. 699–708, 2018.
- [214] S. B. A. M. R. D. S. M. M. Behera, «Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: a review,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, p. 501–516, 2014.
- [215] ASTM C1761-C1761M, 2017. [Online].

- [216 C. P. J. X. D. X. L. Li, «Effect of carbonated recycled coarse aggregate on the dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, p. 52–62, 2017.
- [217 M. M. Y. W. I. P. Y. Z. F. X. S.M.S. Kazmi, «Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: a comparative study,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 104, 2019.
- [218 Y. Z. P. Z. J. F. K. H. J. Wu, «Mechanical properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete using carbonated recycled coarse aggregate,» *Materials Sci. Ed.*, vol. 33, n. 3, p. 648–653, 2018.
- [219 R. H. D. P. R. K. A. Patil, «Comparative study on carbonated and non-carbonated recycled aggregate concrete with glass powder as partial replacement for OPC,» *Int. J. Recent Contrib. Eng. Sci.*, vol. 5, pp. 60-67, 2017.
- [220 Z. M. J. X. F. L. Q. Gao, «Effects of imposed damage on the capillary water absorption of recycled aggregate concrete,» *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018.
- [221 J. Wang, *Effects of Recycled Concrete Aggregate Carbonated Treatments on Permeability and ITZs of Recycled Aggregate Concrete*, Master's thesis, H. University, A cura di, Changsha, 2017.
- [222 F. W. M. V. H. M. T. Z. P. Zhang, «Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete,» *Cement Concr. Res.*, vol. 100, p. 60–67, 2017.
- [223 D. X. W. Z. C. S. B.J. Zhan, «Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete,» *Cement Concr. Compos.*, vol. 104, 2019.
- [224 J. D. F. Y. J.L. Zheng, «Experimental study on the influence of carbonized recycled fine aggregate on the bond properties between recycled aggregate concrete and corroded rebar,» *J. Fuzhou. Univ. Nat. Sci. Edit.*, vol. 47, p. 258–264, 2019.
- [225 J. S. L. C. H. K. J.S. Ha, «Performance evaluation of recycled aggregate concrete made of recycled aggregate modified by carbonation,» *J. Korea Concr. Inst.*, vol. 28, p. 445–454, 2016.
- [226 G. F. B. F. O. I. R. Z. A. R. S. F. A. Abbas, «Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis,» *Mater. Char.*, vol. 60, p. 716–728, 2009.
- [227 Z. G. Y. S. D. Zhang, «Review on carbonation curing of cement-based materials,» *J. CO2 Util.*, vol. 21, p. 119–131, 2017.
- [228 E. M. M. P. a. R. D. T. F. Eduardus A.B. Koenders, «Generalised Mix Design Rules for Concrete with Recycled Aggregates,» *Recent Advances on Green Concrete for Structural Purposes*, vol. Chapter 6, 2017.
- [229 T. F. R. K. E. M. E. Pepe M, « Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 69, p. 124–132, 2014.
- [230 ASTM E1570, 2011. [Online].
- [231 ASTM D4404, 2010. [Online].
- [232 K. E. C. A. Martinelli E, «A numerical recipe for modelling hydration and heat flow in hardening concrete,» *Cem Concr Compos*, vol. 40, p. 48–58, 2013.
- [233 P. M., *A conceptual model for designing recycled aggregate concrete for structural applications*, Berlin: Springer, Springer Theses Series, 2015.
- [234 L. SJ, «Deformation behaviour of concrete influenced by hydration related changes of the microstructure, Internal report nr. 5-99-05,» Delft University of Technology, Netherland, 1999.
- [235 H. TC, «Physical structure of hardened cement paste. A classical approach.,» *Mater Struct*, vol. 19, n. 6, p. 423–436, 1986.
- [236 G. Fathifazi, A. Abbas, A. G. Razaqpur, O. B. Isgor, B. Fournier e a. S. Foo, «New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, n. 10, 2009.
- [237 ACI Committee 211, «Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete,» 1997. [Online].
- [238 ASTM, «Concrete and concrete aggregates,» 2003. [Online].

- [239 A. F. G. B. I. O. R. A. F. B. a. F. S. Abbas, «Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates,» *J. ASTM Int.*, vol. 5, n. 1, 2008.
- [240 C. A. a. M. T. W. _ . Herubin, *Basic construction materials*, N.J.: 3rd Ed., Prentice-Hall, 1987.
- [241 J. F. e. a. Lamond, «Removal and reuse of hardened concrete,» *ACI Mater. J.*, vol. 99, n. 3, p. 300–325, 2002.
- [242 Enco - Engineering Concrete, «Mix design del calcestruzzo,» [Online]. Available: <https://www.encosrl.it/abc-del-calcestruzzo-mix-design-del-calcestruzzo/>.
- [243 P. S. Pierri, «Il mix design: progetto della miscela del calcestruzzo,» [Online]. Available: <http://esercitazioni.depetrinis.altervista.org/wp-content/uploads/2015/11/mix-design-progettazione-del-calcestruzzo.pdf>.
- [244 «Codice Civile,» [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/anteprema/codici/codiceCivile>.
- [245 «D.L. n. 185/2008,» [Online]. Available: <http://www.parlamento.it/parlam/leggi/decreti/08185d.htm>.
- [246 «DPCM 3 dicembre 2013,» [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/03/12/14A02098/sg>.
- [247 «D.Lgs. n. 205/2010,» [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2010/12/10/010G0235/sg>.
- [248 «UNI EN 1744-1,» [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-1744-1-2013>.
- [249 «UNI 8520-22,» [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-8520-22-2017>.
- [250 Japanese Standards Association , *JIS A 5021*, Tokyo.
- [251 C. Jiménez, M. Barra, S. Valls, D. Aponte e E. Vázquez, «Durability of recycled aggregate concrete designed with the Equivalent Mortar Volume (EMV) method: Validation under the Spanish context and its adaptation to Bolomey methodology,» *Mater. Construc.*, vol. 64, n. 313, 2014.
- [252 S. C. U. Schneider, «Behavior of high-performance concrete (HPC) under ammonium nitrate solution and sustained load,» *ACI Mater. J.*, vol. 96, n. 1, p. 47– 51, 1999.

APPENDICE A

Prospetto 1: Valutazione della presenza di parti estranee o pericolose: parte generale [32]

VALUTAZIONE DELLA PRESENZA DI SOSTANZE ESTRANEE E PERICOLOSE: PARTE GENERALE	
1.1	Identificazione univoca di questa documentazione:
1.2	Denominazione del progetto di demolizione selettiva:
1.3	Committente, per conto del quale il progetto di demolizione selettiva è eseguito - Nome e indirizzo:
1.4	C.F. o Partita IVA:
1.5	Demolizione selettiva: Soggetto competente che esegue la rilevazione sulla presenza di sostanze pericolose o estranee - Nome, azienda e indirizzo:
1.6	Precedente uso della(e) struttura(e):
1.7	Presenza di sostanze pericolose o estranee, che sono conosciute o sono prevedibili in funzione del precedente utilizzo:
1.8	Controlli preliminari chimico-analitici (se eseguiti) - definizione, descrizione e risultati:

Prospetto 2: Risultati dell'indagine sulla presenza di materiali pericolosi [32]

RISULTATI DELL'INDAGINE SULLA PRESENZA DI MATERIALI POTENZIALMENTE PERICOLOSI			
	PRESENTI		QUANTITÀ O MASSA
2.1 fibre artificiali vetrose	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
2.2 altri tipi di materiali isolanti diversi da quelli del punto 2.1 del presente prospetto	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
2.3 contenitori per olii minerali o idrocarburi (es. serbatoio)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
2.4 rivelatori di fumo radioattivi	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
2.5 camini o sfianti industriali (per esempio rivestimenti in ceramiche di camini per il riscaldamento o industriali)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
2.6 materiali o componenti isolanti contenenti fluoroclorocarburi (es. elementi interni ai pannelli)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
2.7 scorie (ad esempio come riempimento nelle intercapedini)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	

Prospetto 3: Risultati dell'indagine sulla presenza di elementi che potrebbero ridurre la riciclabilità del materiale da C&D e preferibilmente da avviare singolarmente a recupero [32]

RISULTATI DELL'INDAGINE SULLA PRESENZA DI ELEMENTI CHE POTREBBERO RIDURRE LA RICICLABILITÀ DEL MATERIALE DA C&D E PREFERIBILMENTE DA AVVIARE SINGOLARMENTE A RECUPERO			
	PRESENTI		QUANTITÀ O MASSA
	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
3.1 macchine fisse (es. impianti tecnici domestici) elettrodomestici ed altri suppellettili	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
3.2 strutture del pavimento e costruzioni in doppio pavimento	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
3.3 pavimenti e rivestimenti non minerali (esclusa la carta da parati)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
3.4 controsoffitti	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
3.5 installazioni in plastica sul muro (ad esempio, cavi, canalette per i cavi e tubi per i servizi sanitari)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
3.6 strutture di facciata (ad esempio tende, facciate sospese, facciate di vetro, sistemi di isolamento termico)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
3.7 guarnizioni (ad esempio in cartone catramato, pellicole plastiche)	Sì <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	

Prospetto 4: Informazioni sul sopralluogo e altre informazioni [32]

INFORMAZIONI SUL SOPRALLUOGO E ALTRE INFORMAZIONI	
4.1	Sopralluogo effettuato il:
4.2	Sopralluogo effettuato alla presenza di:
4.3	Parti di edifici che NON sono state oggetto del sopralluogo o che NON erano accessibili:
4.4	Altre informazioni (altre sostanze inquinanti o contaminanti, parti rilevanti per la demolizione selettiva, caratteristiche strutturali, schizzi, ecc.)
Data	Firma del tecnico abilitato

Prospetto 5: informazioni sul progetto di demolizione [32]

INFORMAZIONI SUL PROGETTO DI DEMOLIZIONE	
5.1	Identificativo univoco dell'opera di demolizione:
5.2	Denominazione del progetto di demolizione:
5.3	Committente per conto del quale si esegue il progetto di demolizione Nome e indirizzo: Codice fiscale o partita IVA:
5.4	Persona competente o esperto autorizzato alla demolizione che ha elaborato il concetto di demolizione Nome e indirizzo della società:
5.5	Volume dell'edificio per il quale è prevista la demolizione - metri cubi (m ³):
5.6	Tipologia costruttiva dell'involucro. Si richiama di seguito un esempio delle informazioni minime da fornire per la sezione specifica del progetto di demolizione relativa all'involucro. Descrivere il sistema di involucro, con dettagli inerenti la stratigrafia: <ul style="list-style-type: none"> - la presenza di un isolante termico esterno, interno o nell'intercapedine delle pareti o degli elementi costruttivi stessi; - la tipologia di isolante; - la tipologia costruttiva dell'involucro: costruzione prefabbricata, costruzione tradizionale e a secco; - il sistema di ancoraggio degli isolanti sulla parete (es. collanti o tasselli) e possibili elementi smontabili; - la presenza di impianti a fonti rinnovabili. Altra tipologia costruttiva (descrivere):
5.7	Presenza di impianti nel territorio. Elencare la tipologia di impianti autorizzati distinti per categoria:
	<ul style="list-style-type: none"> - discariche per rifiuti inerti autorizzate ai sensi della normativa vigente e limitatamente ai rifiuti previsti dalla normativa (DM 27/09/2010); - impianti di trattamento autorizzati ai sensi della normativa vigente come impianti R5 o R13 per il trattamento di rifiuti della classe 17; - impianti di trattamento mobili autorizzati ai sensi dell'art. 208 comma 15 del D.Lgs. 152/2006 al trattamento (R5) di rifiuti appartenenti alla classe 17.

Prospetto 6: Massa stimata delle componenti principali da produrre separatamente [32]

MASSA STIMATA DELLE COMPONENTI PRINCIPALI DA PRODURRE SEPARATAMENTE	
Rifiuti derivanti dalla demolizione	Stima della massa (t)
6.1 asfalto (CER 170302 o altro)	
6.2 cemento (CER 170101)	
6.3 materiale di scavo (CER 170504)	
6.4 legno (CER 170201)	
6.5 metallo (CER 170407 o altri)	
6.6 mattoni (CER 170102)	
6.7 inerti (CER 170107 o 170904)	
6.8 (altri codici della classe 17 "rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (compreso il terreno proveniente da siti contaminati)")	
Qui sono inseriti gli altri componenti principali, quali materiali compositi, muratura, vetro, gesso, ecc.	

Prospetto 7: valutazione delle sostanze inquinanti e contaminanti [32]

VALUTAZIONE DELLE SOSTANZE INQUINANTI E CONTAMINANTI	
È stata eseguita la seguente identificazione di potenziali contaminanti e delle potenziali sostanze estranee (documentazione allegata):	
<input type="checkbox"/>	valutazione orientativa della presenza di sostanze contaminanti o estranee
<input type="checkbox"/>	valutazione elaborate secondo ONR 192130 (inserire eventuali altre norme di riferimento possibili)

Prospetto 8: Rimozione delle sostanze estranee e contaminanti [32]

RIMOZIONE DELLE SOSTANZE ESTRANEE E CONTAMINANTI	
8.1	Impresa che ha identificato e rimosso le componenti estranee e contaminanti prima della demolizione meccanica - Nome e indirizzo:
8.2	Informazioni specifiche per la rimozione delle sostanze estranee e contaminanti:

Prospetto 9: demolizione meccanica [32]

DEMOLIZIONE MECCANICA	
La separazione dei componenti principali avviene:	
<input type="checkbox"/>	direttamente sul posto all'atto della demolizione
<input type="checkbox"/>	successivamente in un impianto di selezione - Nome, indirizzo, tipo di struttura

Prospetto 10: altri documenti [32]

ALTRI DOCUMENTI	
A questo format sono allegati i seguenti documenti:	
<ul style="list-style-type: none">- descrizione secondo lo standard B 2251 (oppure inserire altri standard di riferimento o dettagliare gli aspetti minimi della descrizione)- documentazione sulla presenza di sostanze estranee e contaminanti- mappa del sito (se presente)	
Data	Firma della persona competente o l'esperto autorizzato o istituto specializzato per la demolizione

APPENDICE B

AGGREGATI RICICLATI

Sabbietta riciclata (FPC Sabbione Riciclato)											
Diametro stacci (mm)	30/05/13	31/07/13	31/10/13	31/07/14	01/09/14	05/11/14	30/06/15	30/09/15	25/10/16	MEDI A	TIPIC A
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,063	6,2	3,66	4,12	12,55	10,9	15,22	13,36	16,8	14,6	10,82	3,25
0,125	18,6	12,33	10,23	18,44	23,22	24,55	20,45	19	17	18,2	4,01
0,25	24,3	15,44	17,88	22,54	27,82	28,88	25,66	24,33	22	23,21	8,84
0,5	36,7	25,88	33,56	35,66	37,71	35,66	38,41	33,27	34,8	34,63	22,72
1	55,9	52,33	48,74	47,88	54,66	52,33	50,69	47,33	48,7	50,95	45,03
2	73,3	65,44	68,5	65,33	69,42	71,23	65,42	62,4	64,8	67,32	69,85
4	88,3	85,42	85,44	80,45	83,72	80,65	82,12	77,27	81	82,71	87,93
5,6	96,8	95,66	95,66	93,66	94,6	92,55	95,63	93,07	93,3	94,55	97,78
6,3	98,8	97,45	99,78	95,66	97,6	95,66	99,63	96,93	95,4	97,43	99,93
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
11,2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
12,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
22,4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
45	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Frantumato riciclato 15/30 (g2r, FPC Riciclato 15-30)											
Diametro stacci (mm)	30/05/13	31/07/13	31/10/13	31/07/14	01/09/14	05/11/14	30/06/15	30/09/15	25/10/16	MEDI A	TIPIC A
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,063	1,2	1,23	0,88	0,95	0,53	0,56	0,62	0,58	0,79	0,82	0,26
0,125	1,22	1,44	0,88	0,95	0,88	0,56	0,62	0,58	0,94	0,9	0,35
0,25	1,22	1,44	0,88	0,95	1,02	0,56	0,62	0,58	0,99	0,92	0,74
0,5	1,22	1,44	0,88	0,95	1,15	0,56	0,62	0,58	1,02	0,94	1,06
1	1,22	1,44	0,88	0,95	1,25	0,56	0,62	0,58	1,05	0,95	1,33
2	1,22	1,44	0,88	0,98	1,52	0,56	0,62	0,58	1,14	0,99	1,71
4	1,35	2,11	0,88	1,41	1,66	0,56	0,62	0,58	1,44	1,18	2,57
5,6	1,52	2,55	1,44	2,02	1,85	0,85	0,82	0,78	2,64	1,61	3,97
6,3	2,44	3,21	2,22	3,23	2,02	2,12	1,25	0,8	4,88	2,46	5,22
8	6,33	6,32	7,15	5,65	3,44	4,58	2,36	1,28	6,99	4,9	7,84
10	15,45	12,54	11,36	11,47	5,63	10,63	8,45	5	7,86	9,82	15,18
11,2	22,35	20,36	18,77	15,42	8,45	16,87	12,63	8,75	8,7	14,7	22,9

12,5	30,25	28,44	25,44	20,36	15,45	20,36	14,88	15,13	9,69	20	30,93
14	42,32	40,23	36,58	42,36	36,25	42,58	32,69	22,6	17,7	34,81	42,75
16	55,23	56,36	58,77	53,66	51,23	62,33	55,23	37,23	24,8	50,54	52,59
20	78,44	80,41	80,45	82,56	92,33	88,45	78,52	67,25	38,9	76,37	83,67
22,4	94,52	95,55	96,36	94,56	98,42	95,63	95,63	90,23	85,25	94,02	94,85
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100	99,76	99,97	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
45	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Dato	U.M.	Valore	Note
Slump	classe	S4	Consistenza fluida
	mm	185	
D_max	mm	40	
A	-	14	
Acqua	kg/m ³	215	aggiungo 10 kg/m ³ perché frantumato
a/c	-	0,45	
Classe di esposizione	classe	XA1	Perché per fabbricati industriali
	(a/c)'	0,55	
a/c finale	-	0,45	
% aria	%	-	
V_cls	l	1000	
Cemento	kg/m ³	478	
V_acqua	l	215	
V_aria	l	1,5	
V_i	l	629	
Υ_c	kg/l	3,1	da web
Υ_a	kg/l	1	
Υ_s	kg/l	2,5	
Υ_g2r	kg/l	2,2	

			Usati
cemento	g/dm ³	478	478
acqua	g/dm ³	215	215
aria	g/dm ³	-	-
s	g/dm ³	784	802
g2r	g/dm ³	695	595

Curve di progetto e riferimento					
Diametro	Sabbietta riciclata	Frantumato riciclato 15/30	Curva progetto	Curva riferimento	Scarto quadratico
0	0	0	0,00	14,00	196,00
0,063	10,82	0,82	5,80	17,41	134,79
0,125	18,20	0,90	9,52	18,81	86,23
0,25	23,21	0,92	12,03	20,80	76,97
0,5	34,63	0,94	17,73	23,62	34,67
1	50,95	0,95	25,87	27,60	2,99

2	67,32	0,99	34,05	33,23	0,67
4	82,71	1,18	41,81	41,20	0,38
5,6	94,55	1,61	47,93	46,18	3,06
6,3	97,43	2,46	49,80	48,13	2,77
8	100	4,90	52,30	52,46	0,03
10	100	9,82	54,77	57,00	4,99
11,2	100	14,70	57,21	59,51	5,26
12,5	100	20,00	59,87	62,08	4,86
14	100	34,81	67,30	64,88	5,87
16	100	50,54	75,19	68,39	46,21
20	100	76,37	88,15	74,81	177,81
22,4	100	94,02	97,00	78,36	347,53
31,5	100	99,97	99,99	90,32	93,49
40	100	100	100,00	100	0,00
45	100	100	100,00	100	0,00
63	100	100	100,00	100	0,00
80	100	100	100,00	100	0,00

α_s	α_{g2r}	Somma
0,50	0,50	1,00
0,51	0,43	Usato questi

Somma
1224,58

AGGREGATI NATURALI

Sabbia granita (DOP 02 Cava degli Olmi)

Diametro stacci (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Passante	-
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-
0,063	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	-
0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4	-
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,8	-
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54,3	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70,9	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	-
5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99	-
6,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
12,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
22,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
31,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-

63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-

Pietrisco 15/30 (g2n, FPC Ghiaia Naturale 15-30)											
Diametro stacci (mm)	30/05/1 3	31/07/1 3	31/10/1 3	31/07/1 4	01/09/1 4	05/11/1 4	30/06/1 5	30/09/1 5	25/10/1 6	MEDIA	TIPIC A
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,063	1,08	0,22	0,55	0,74	1,1	0,65	0,55	0,48	1,34	0,75	0,48
0,125	1,1	0,35	0,65	0,74	1,25	0,65	0,55	0,48	1,34	0,79	0,43
0,25	1,1	0,35	0,65	0,74	1,25	0,65	0,55	0,48	1,34	0,79	0,53
0,5	1,1	0,35	0,65	0,74	1,25	0,65	0,55	0,48	1,34	0,79	0,68
1	1,1	0,35	0,65	0,74	1,25	0,65	0,55	0,48	1,34	0,79	0,81
2	1,1	1,23	0,88	0,74	1,25	0,65	0,55	0,48	1,34	0,91	1,09
4	1,12	1,55	0,98	1,1	1,25	0,85	0,55	0,48	1,34	1,02	1,23
5,6	1,85	2,25	1,44	1,23	1,25	1,32	0,55	0,48	1,34	1,3	3,04
6,3	3,21	5,55	4,56	2,45	1,33	1,54	1,23	0,48	1,34	2,41	4,98
8	5,44	8,77	9,22	5,23	1,54	3,66	6,32	0,5	1,47	4,68	10,21
10	11,12	14,23	13,65	8,88	3,52	5,52	10,25	1,43	2,54	7,9	15,19
11,2	15,45	18,41	17,41	15,36	5,77	10,23	12,36	3,13	2,69	11,2	19,67
12,5	22,36	25,63	22,36	19,84	12,36	18,44	18,42	9,33	3,55	16,92	27,5
14	33,45	40,21	32,56	25,44	18,45	22,36	20,36	17,65	6,65	24,13	33,97
16	42,35	55,85	58,41	45,74	32,45	38,45	38,52	31,4	15,38	39,84	45,11
20	72,55	74,52	72,41	62,36	55,23	58,78	70,45	72,55	50,88	65,53	70,8
22,4	97,52	96,33	96,33	95,52	86,22	93,66	90,23	88,3	80,06	91,57	94,06
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,85
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
45	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Dato	U.M.	Valore	Note
Slump	classe	S4	Consistenza fluida
	mm	185	
D_max	mm	31,5	
A	-	14	
Acqua	kg/m ³	230	aggiungo 10 kg/m ³ perché frantumato
a/c	-	0,45	
Classe di esposizione	classe	XA1	Perché per fabbricati industriali
	(a/c)'	0,55	
a/c finale	-	0,45	
% aria	%	1,35%	
V_cls	l	1000	
Cemento	kg/m ³	511	
V_acqua	l	230	
V_aria	l	0,1	Percentuale * 10
V_i	l	605	
Y_c	kg/l	3,1	

γ_a	kg/l	1	
γ_s	kg/l	2,6	
γ_{g2n}	kg/l	2,8	

cemento	g/dm ³	511
acqua	g/dm ³	230
aria	g/dm ³	-
s	g/dm ³	876
g2n	g/dm ³	750

Curve di progetto e riferimento					
Diametro	Sabbia granita	Pietrisco 15/30	Curva progetto	Curva riferimento	Scarto quadratico
0	0	0	0,00	14,00	196,00
0,063	0,8	0,75	0,78	17,85	291,32
0,125	3,4	0,79	2,24	19,42	294,93
0,25	13,8	0,79	8,04	21,66	185,63
0,5	32	0,79	18,17	24,83	44,36
1	54,3	0,79	30,60	29,32	1,62
2	70,9	0,91	39,90	35,67	17,86
4	90	1,02	50,58	44,65	35,26
5,6	99	1,3	55,72	50,26	29,81
6,3	100	2,41	56,77	52,46	18,57
8	100	4,68	57,78	57,34	0,19
10	100	7,9	59,20	62,46	10,59
11,2	100	11,2	60,66	65,28	21,32
12,5	100	16,92	63,20	68,17	24,78
14	100	24,13	66,39	71,33	24,43
16	100	39,84	73,35	75,29	3,77
20	100	65,53	84,73	82,53	4,86
22,4	100	91,57	96,27	86,52	94,95
31,5	100	100	100	100	0,00
40	100	100	100	100	0,00
45	100	100	100	100	0,00
63	100	100	100	100	0,00
80	100	100	100	100	0,00

α_s	α_{g2n}	Somma
0,56	0,44	1

Somma
1300,24

APPENDICE C

AGGREGATI RICICLATI

Sabbietta riciclata (s)	
Diametro stacci (mm)	29/01/20
0	0
0,063	23,1
0,125	28
0,25	35
0,5	46
1	60
2	75
4	89
5,6	96
6,3	98
8	100
10	100
11,2	100
12,5	100
14	100
16	100
20	100
22,4	100
31,5	100
40	100
45	100
63	100
80	100

Frantumato riciclato 15/30 (g2r)	
Diametro stacci (mm)	29/01/20
0	0
0,063	1,6
0,125	2
0,25	2
0,5	2
1	2
2	2
4	2
5,6	3
6,3	4
8	9
10	17
11,2	22
12,5	29

14	37
16	47
20	69
22,4	78
31,5	100
40	100
45	100
63	100
80	100

Dato	U.M.	Valore	Note
Slump	classe	S4	Consistenza fluida
	mm	185	
D_max	mm	40	
A	-	14	
Acqua	kg/m ³	215	aggiungo 10 kg/m ³ perché frantumato
a/c	-	0,45	
Classe di esposizione	classe	XA1	Perché per fabbricati industriali
	(a/c)'	0,55	
a/c finale	-	0,45	
% aria	%	-	
V_cls	l	1000	
Cemento	kg/m ³	478	
V_acqua	l	215	
V_aria	l	1,5	
V_i	l	632	
Y_c	kg/l	3,15	
Y_a	kg/l	1	
Y_s	kg/l	2,46	
Y_g1n	kg/l	2,77	da Rapporto di Prova 29/01/20
Y_g2r	kg/l	2,2	

			Per un provino (l=15 cm)	Totale per 5 provini (kg)
cemento	g/dm ³	478	1613	8,06
acqua	g/dm ³	215	726	3,63
aria	g/dm ³	-	-	-
s	g/dm ³	715	2413	12,06
g1n	g/dm ⁴	0	0	0,00
g2r	g/dm ³	751	2534	12,67

Curve di progetto e riferimento						
Diametro	Sabbietta riciclata	Pietrisco 5/15	Frantumato riciclato 15/30	Curva progetto	Curva riferimento	Scarto quadratico
0	0	0	0	0,00	14,00	196,00
0,063	23,1	1	1,6	11,49	17,41	35,09
0,125	28	1	2	13,96	18,81	23,51
0,25	35	1	2	17,18	20,80	13,11
0,5	46	1	2	22,24	23,62	1,90
1	60	1	2	28,68	27,60	1,17
2	75	1	2	35,58	33,23	5,51
4	89	1	2	42,02	41,20	0,67
5,6	96	1	3	45,78	46,18	0,16
6,3	98	2	4	47,24	48,13	0,80
8	100	9	9	50,86	52,46	2,58
10	100	34	17	55,18	57,00	3,33
11,2	100	56	22	57,88	59,51	2,66
12,5	100	73	29	61,66	62,08	0,18
14	100	97	37	65,98	64,88	1,21
16	100	100	47	71,38	68,39	8,92
20	100	100	69	83,26	74,81	71,36
22,4	100	100	78	88,12	78,36	95,31
31,5	100	100	100	100,00	90,32	93,75
40	100	100	100	100,00	100,00	0,00
45	100	100	100	100,00	100,00	0,00
63	100	100	100	100,00	100,00	0,00
80	100	100	100	100,00	100,00	0,00

α_s	α_{g1n}	α_{g2r}	Somma
0,46	0,00	0,54	1,00

Somma
557,19

AGGREGATI NATURALI

Sabbia granita (DOP 02 Cava degli Olmi)						
Diametro stacci (mm)					DOP	-
0					0	-
0,063					0,8	-
0,125					3,4	-
0,25					13,8	-
0,5					32	-
1					54,3	-
2					70,9	-
4					90	-
5,6					99	-
6,3					100	ipotizzato
8					100	-
10					100	-
11,2					100	-

12,5					100	-
14					100	-
16					100	-
20					100	-
22,4					100	-
31,5					100	-
40					100	-
45					100	-
63					100	-
80					100	-

Pietrisco 5/15 (g1n)						
Diametro stacci (mm)	Trattenuto (gr.)	Trattenuto	-	-	29/01/20	
0	0	1,00	Peso campione secco (gr.)	2865	0	
0,063	2830	0,99	Residuo sul fondo (gr.)	22	1	
0,125	2830	0,99	Data prova	19/12/19	1	
0,25	2830	0,99	-	-	1	
0,5	2830	0,99	-	-	1	
1	2830	0,99	-	-	1	
2	2830	0,99	-	-	1	
4	2830	0,99	-	-	1	
5,6	2826	0,99	-	-	1	
6,3	2813	0,98	-	-	2	
8	2610	0,91	-	-	9	
10	1880	0,66	-	-	34	
11,2	1261	0,44	-	-	56	
12,5	764	0,27	-	-	73	
14	89	0,03	-	-	97	
16	7	0,00	-	-	100	
20	0	0,00	-	-	100	
22,4	0	0,00	-	-	100	
31,5	0	0,00	-	-	100	
40	0	0,00	-	-	100	
45	0	0,00	-	-	100	
63	0	0,00	-	-	100	
80	0	0,00	-	-	100	

Pietrisco 15/30 (g2n)						
Diametro stacci (mm)					29/01/20	
0					0,1	
0,063					0	
0,125					0	
0,25					0	
0,5					0	
1					0	
2					0	
4					0	

5,6				0	
6,3				0	
8				0	
10				0	
11,2				1	
12,5				3	
14				10	
16				27	
20				61	
22,4				83	
31,5				100	
40				100	
45				100	
63				100	
80				100	

Dato	U.M.	Valore	Note
Slump	classe	S4	Consistenza fluida
	mm	185	
D_max	mm	31,5	
A	-	14	
Acqua	kg/m ³	230	aggiungo 10 kg/m ³ perché frantumato
a/c	-	0,45	
Classe di esposizione	classe	XA1	Perché per fabbricati industriali
	(a/c)'	0,55	
a/c finale	-	0,45	
% aria	%	1,35%	
V_cls	l	1000	
Cemento	kg/m ³	511	
V_acqua	l	230	
V_aria	l	0,1	Percentuale * 10
V_i	l	608	
Y_c	kg/l	3,15	
Y_a	kg/l	1	
Y_s	kg/l	2,57	
Y_g1n	kg/l	2,77	da Rapporto di Prova 29/01/20
Y_g2n	kg/l	2,76	

			Per un provino (l=15 cm)	Totale per 5 provini (kg)
cemento	g/dm ³	511	1725	8,63
acqua	g/dm ³	230	776	3,88
aria	g/dm ³	-	-	-
s	g/dm ³	841	2839	14,20
g1n	g/dm ²	252	852	4,26
g2n	g/dm ³	522	1762	8,81

Curve di progetto e riferimento						
Diametro	Sabbia granita	Pietrisco 5/15	Pietrisco 15/30	Curva progetto	Curva riferimento	Scarto quadratico
0	0	0	0,1	0,03	14,00	195,13
0,063	0,8	1	0	0,61	17,85	296,94
0,125	3,4	1	0	2,01	19,42	302,85
0,25	13,8	1	0	7,62	21,66	197,24
0,5	32	1	0	17,42	24,83	54,96
1	54,3	1	0	29,43	29,32	0,01
2	70,9	1	0	38,38	35,67	7,33
4	90	1	0	48,67	44,65	16,16
5,6	99	1	0	53,54	50,26	10,72
6,3	100	2	0	54,14	52,46	2,83
8	100	9	0	55,20	57,34	4,56
10	100	34	0	59,03	62,46	11,77
11,2	100	56	1	62,58	65,28	7,31
12,5	100	73	3	65,80	68,17	5,64
14	100	97	10	71,51	71,33	0,03
16	100	100	27	77,23	75,29	3,77
20	100	100	61	87,86	82,53	28,42
22,4	100	100	83	94,71	86,52	67,00
31,5	100	100	100	100,00	100,00	0,00
40	100	100	100	100,00	100,00	0,00
45	100	100	100	100,00	100,00	0,00
63	100	100	100	100,00	100,00	0,00
80	100	100	100	100,00	100,00	0,00

α_s	α_{g1n}	α_{g2n}	Somma
0,54	0,15	0,31	1,00

Somma
1212,68

APPENDICE D

MIX 4

Sabbia granita (DOP 02 Cava degli Olmi)	
Diametro stacci (mm)	DOP
0	0
0,063	0,8
0,125	3,4
0,25	13,8
0,5	32
1	54,3
2	70,9
4	90
5,6	99
6,3	100
8	100
10	100
11,2	100
12,5	100
14	100
16	100
20	100
22,4	100
31,5	100
40	100
45	100
63	100
80	100

Pietrisco 5/15 (g1n)	
Diametro stacci (mm)	29/01/20
0	0
0,063	1
0,125	1
0,25	1
0,5	1
1	1
2	1
4	1
5,6	1
6,3	2
8	9
10	34
11,2	56
12,5	73

14	97
16	100
20	100
22,4	100
31,5	100
40	100
45	100
63	100
80	100

Frantumato riciclato 15/30 (g2r)	
Diametro stacci (mm)	29/01/20
0	0
0,063	1,6
0,125	2
0,25	2
0,5	2
1	2
2	2
4	2
5,6	3
6,3	4
8	9
10	17
11,2	22
12,5	29
14	37
16	47
20	69
22,4	78
31,5	100
40	100
45	100
63	100
80	100

Dato	U.M.	Valore	Note
Slump	classe	S4	Consistenza fluida
	mm	185	
D_max	mm	40	
A	-	14	
Acqua	kg/m ³	215	aggiungo 10 kg/m ³ perché frantumato
a/c	-	0,45	
Classe di esposizione	classe	XA1	Perché per fabbricati industriali
	(a/c)'	0,55	
a/c finale	-	0,45	
% aria	%	-	

V_cls	l	1000	
Cemento	kg/m ³	478	
V_acqua	l	215	
V_aria	l	1,5	
V_i	l	632	
γ_c	kg/l	3,15	
γ_a	kg/l	1	
γ_s	kg/l	2,57	
γ_g1n	kg/l	2,77	da Rapporto di Prova 29/01/20
γ_g2r	kg/l	2,2	

			Per un provino (l=15 cm)	Totale per 5 provini (kg)
cemento	g/dm ³	478	1613	8,06
acqua	g/dm ³	215	726	3,63
aria	g/dm ³	-	-	-
s	g/dm ³	760	2566	12,83
g1n	g/dm ⁴	64	217	1,09
g2r	g/dm ³	688	2322	11,61

Curve di progetto e riferimento						
Diametro	Sabbia granita	Pietrisco 5/15	Frantumato riciclato 15/30	Curva progetto	Curva riferimento	Scarto quadratico
0	0	0	0	0,00	14,00	196,00
0,063	0,8	0	1,6	1,17	17,41	263,95
0,125	3,4	0	2	2,58	18,81	263,27
0,25	13,8	0	2	7,45	20,80	178,14
0,5	32	0	2	15,97	23,62	58,38
1	54,3	0	2	26,42	27,60	1,39
2	70,9	0	2	34,19	33,23	0,92
4	90	0	2	43,13	41,20	3,76
5,6	99	0	3	47,84	46,18	2,77
6,3	100	0	4	48,81	48,13	0,46
8	100	0	9	51,28	52,46	1,39
10	100	0	17	55,24	57,00	3,09
11,2	100	0	22	57,72	59,51	3,21
12,5	100	0	29	61,18	62,08	0,80
14	100	0	37	65,14	64,88	0,07
16	100	0	47	70,09	68,39	2,88
20	100	0	69	80,98	74,81	38,02
22,4	100	0	78	85,43	78,36	50,06
31,5	100	0	100	96,32	90,32	36,03
40	100	0	100	96,32	100,00	13,54
45	100	0	100	96,32	100,00	13,54
63	100	0	100	96,32	100,00	13,54
80	100	0	100	96,32	100,00	13,54

α_s	α_{g1n}	α_{g2r}	Somma
0,47	0,04	0,49	1,00

Somma
1158,76