



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BRESCIA

## **UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA**

DICATAM – DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,  
ARCHITETTURA, TERRITORIO, AMBIENTE E DI MATEMATICA

### **Rapporto Finale**

**Collaborazione tra l'Associazione Regionale dei Costruttori Edili Lombardi  
(ANCE Lombardia) e l'Università degli Studi di Brescia**

## **Indicazioni e criteri per l'utilizzo degli aggregati riciclati nel settore edile, stradale e ambientale**

Gruppo di lavoro

Carlo Collivignarelli, Giovanni Plizzari, Sabrina Sorlini, Luca Cominoli

Estensori: Alessandra Diotti e Simone Baronio

Giugno 2018

## Sommario

Introduzione.....	1
1. Produzione e recupero dei rifiuti da Costruzione e Demolizione in Italia .....	2
1.1. Le problematiche del recupero dei rifiuti inerti.....	5
2. Normativa di riferimento .....	6
2.1. Normativa ambientale .....	6
2.1.1 D.lgs. n. 152/2006 (s.m.i.) “Norme in materia ambientale” .....	6
2.1.2 D.M. 5/02/1998 “Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n. 22” (e s.m.i. con D.M. 186/2006) .....	9
2.2. Green Public Procurement (GPP).....	11
2.2.1. Evoluzione della normativa relativa al GPP in Italia.....	11
2.3. Criteri ambientali minimi (CAM) .....	19
2.3.1. Nozione .....	19
2.3.2. Rilevanza nel D.Lgs 50/2016 “Codice dei contratti pubblici” e s.m.i. ....	19
2.3.3. Decreto Ministeriale 24 Dicembre 2015 “Adozione dei criteri ambientali minimi” e s.m.i.....	20
2.4. Certificazione del materiale granulare: <i>Marcatura CE</i> .....	26
2.4.1. Norma UNI EN 12620 e Norma UNI 8520 .....	27
2.4.2. Norma UNI EN 13242 .....	35
2.4.3. Norma UNI EN 13043 .....	38
2.5. Prestazioni tecniche del prodotto finito .....	40
2.5.1. Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018 .....	40
2.6. Le eco-etichette.....	42
2.6.1. Life Cycle Assessment (LCA) .....	43
3. Analisi delle linee guida italiane ed europee .....	46
3.1. Linee guida in Italia.....	46
3.1.1. Corretta gestione dei rifiuti C&D a fronte dell’analisi delle linee guida nazionali .....	46
3.1.2. Linee guida della Provincia autonoma di Trento.....	50
3.1.3. Considerazioni e strategie operative per la promozione del recupero e dell’utilizzo dei materiali riciclati.....	51
3.2. Linee guida europee.....	52
3.2.1. Protocollo europeo per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione.....	52
3.2.2. Criteri End of Waste dei paesi nordici.....	55
4. Caratteristiche degli aggregati riciclati e stato dell’arte sull’utilizzo nei calcestruzzi e nelle applicazioni stradali e geotecniche .....	57
4.1. Aggregati riciclati.....	58

4.1.1.	Rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) .....	58
4.1.2.	Origine degli aggregati di riciclo (AR) .....	58
4.1.3.	Il processo di demolizione.....	61
4.2.	Caratteristiche chimiche degli aggregati riciclati (AR) .....	69
4.2.1.	Composizione chimica.....	69
4.2.2.	Test di cessione .....	73
4.3.	Produzione di calcestruzzo e manufatti cementizi con aggregati riciclati .....	83
4.3.1.	Aspetti chimici.....	83
4.3.2.	Prestazioni tecniche .....	88
4.3.3.	Esperienze bibliografiche .....	92
❖	Applicazioni in scala reale degli aggregati riciclati .....	109
4.4.	Utilizzo degli aggregati riciclati per opere stradali ed altre applicazioni geotecniche.....	120
4.4.1.	Esperienze bibliografiche .....	120
4.4.2.	Aspetti ambientali .....	120
4.4.3.	Prestazioni tecniche .....	125
5.	Esperienze .....	130
5.1.	Impianto di trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) .....	130
5.1.1.	Descrizione dell'esperienza .....	130
5.1.2.	Dati forniti durante la visita .....	131
5.2.	Raccordo A35-A4.....	134
5.2.1.	Descrizione dell'esperienza.....	134
5.2.2.	Dati tecnici e prescrizioni del Capitolato Speciale d'appalto .....	135
5.3.	Cantiere con destinazione produttiva.....	139
5.4.	Cantiere Garibaldi (Milano).....	139
6.	Conclusioni e sviluppi futuri .....	140
6.1.	Caratteristiche dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) e degli aggregati riciclati (AR).....	140
6.1.1.	Rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) .....	140
6.1.2.	Aggregati riciclati (AR).....	141
6.1.2.1.	Composizione chimica.....	142
6.1.2.2.	Rilascio di inquinanti mediante test di cessione .....	143
6.2.	Indicazioni tecniche per la produzione dell'aggregato riciclato (AR).....	145
6.2.1.	Pretrattamenti.....	145
6.2.1.1.	Procedura di demolizione selettiva.....	145
6.2.1.2.	Selezione di frazioni specifiche .....	146
6.2.2.	Trattamenti .....	146
6.2.2.1.	Procedura di doppia frantumazione del rifiuto da C&D.....	146

6.2.2.2.	Trattamento di pulizia del rifiuto C&D .....	147
6.3.	Indicazioni tecniche per l'utilizzo dell'aggregato riciclato (AR).....	148
6.3.1.	Calcestruzzo e manufatti cementizi .....	148
6.3.1.1.	Aspetti chimici .....	148
6.3.1.2.	Condizioni operative ottimali .....	149
6.3.1.3.	Durabilità.....	151
6.3.2.	Opere stradali e geotecniche .....	152
6.3.2.1.	Aspetti ambientali .....	152
6.3.2.2.	Condizioni operative ottimali .....	153
6.3.2.3.	Durabilità .....	154
6.4.	Certificazione dell'aggregato (AR).....	155
6.5.	Linee guida italiane ed estere per la corretta gestione dei rifiuti C&D.....	156
6.6.	Fattibilità del recupero.....	156
6.6.1.	Fattibilità <b>ambientale</b> .....	156
6.6.2.	Fattibilità <b>tecnica</b> .....	157
6.6.3.	Fattibilità <b>economica</b> .....	157
6.7.	Proposte future .....	159
	Riferimenti Bibliografici.....	161
	<b>ALLEGATI</b> .....	166
A)	LINEE GUIDA ANALIZZATE .....	166
B)	ESPERIENZE BIBLIOGRAFICHE SUL RECUPERO NEL CALCESTRUZZO .....	202

## Introduzione

Nel mese di Maggio 2017 il Dipartimento DICATAM ha stipulato un accordo di ricerca con l'Associazione Regionale dei Costruttori Edili Lombardi, di seguito denominata ANCE Lombardia (data della firma 29/05/2017). Tale accordo prevede le seguenti fasi:

- **Inquadramento delle normative** di settore riguardanti il recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) e la caratterizzazione tecnica dei prodotti e **analisi delle linee guida** nazionali e internazionali sull'utilizzo di aggregati riciclati (*punto A della convenzione*);
- **Review bibliografica** (*punto B della convenzione*) sulle diverse esperienze, anche a livello internazionale, di utilizzo degli aggregati riciclati nei seguenti campi:
  - produzione di calcestruzzo e manufatti cementizi,
  - costruzione di strade,
  - opere di ripristino ambientale.
- **Analisi delle applicazioni reali di recupero** di rifiuti da C&D (*punto C della convenzione*) ed utilizzo di aggregati riciclati nei settori edile, stradale ed ambientale a livello nazionale;
- Elaborazione di un documento contenente **indicazioni e criteri migliorativi per il recupero** dei rifiuti derivanti da attività da costruzione e demolizione e l'utilizzo degli aggregati riciclati nel settore edile (calcestruzzo), stradale e ambientale (*punto D della convenzione*).

## 1. Produzione e recupero dei rifiuti da Costruzione e Demolizione in Italia

Secondo il Rapporto Rifiuti Speciali di ISPRA (2017), nel 2015 sono stati prodotti in Italia 132,4 milioni di tonnellate di rifiuti speciali. Il dato complessivo tiene conto sia dei quantitativi derivanti dalle elaborazioni delle banche dati MUD che di quelli stimati da ISPRA mediante l'applicazione di specifiche metodologie. Il ricorso alle procedure di stima si rende necessario per alcuni settori produttivi che, ai sensi della normativa vigente, risultano interamente o parzialmente esentati dall'obbligo di dichiarazione, come quello delle costruzioni e demolizioni. A riguardo, il dato di produzione è stato desunto dai dati dichiarati nel MUD relativi alle operazioni di gestione dei rifiuti di cui al capitolo 17 dell'Elenco Europeo dei rifiuti, effettuate dai soggetti obbligati ai sensi dell'art.189, comma 3 del D.Lgs.152/2006. Tutte le elaborazioni sono state condotte a livello di singolo codice EER.

Ai fini, poi, del calcolo del tasso di recupero/riciclaggio, si assume che la quantità di rifiuti da costruzione e demolizione avviati a recupero, ad esclusione delle quantità di rifiuti sottoposti ad operazioni intermedie di gestione (operazioni di trattamento preliminare, quali il trattamento chimico, fisico, biologico e il ricondizionamento) sia da rapportare alla produzione annuale di rifiuti non pericolosi da costruzione e demolizione (denominatore della formula prevista nella metodologia di calcolo indicata nella decisione 2011/753/CE).

Tasso di recupero dei rifiuti da costruzioni e demolizioni, in % =

$$\frac{\text{Quantità recuperata di rifiuti da costruzioni e demolizioni}}{\text{Quantità totale di rifiuti prodotti da costruzioni e demolizioni}}$$

*Figura 1: Formula per il calcolo del tasso di recupero dei rifiuti da C&D (Decisione 2011/753/CE).*

Nelle Figure seguenti vengono riportati i quantitativi di rifiuti da costruzione e demolizione prodotti nel triennio 2013-2015 e quelli inerenti alla preparazione per il riutilizzo, riciclaggio e altre forme di recupero di materia, secondo la codifica del Regolamento (CE) n. 2150/2002 relativo alle statistiche sui rifiuti.

Per chiarezza, si riportano le definizioni di cui all'Art. 1 della Direttiva 2008/98/CE, riconfermate anche dalla nuova Direttiva 851/2018, ovvero:

- **Riutilizzo:** qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti;
- **Recupero:** 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. L'Allegato II riporta un elenco non esaustivo di operazioni di recupero;
- **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.

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		
		2013	2014	2015
Voce	Descrizione	(tonnellate)		
6.1	Rifiuti metallici ferrosi	3.949.077	3.589.808	3.457.164
6.2	Rifiuti metallici non ferrosi	332.572	396.677	398.922
6.3	Rifiuti metallici misti, ferrosi e non ferrosi	152.975	151.012	143.314
7.1	Rifiuti in vetro	59.226	71.896	77.354
7.4	Rifiuti in plastica	25.873	24.845	36.908
7.5	Rifiuti in legno	132.589	151.670	152.560
12.1	Rifiuti minerali della costruzione e della demolizione	30.802.013	34.017.822	34.492.850
<b>Totale nazionale</b>		<b>35.454.323</b>	<b>38.403.730</b>	<b>38.759.072</b>

Figura 2: Produzione dei rifiuti da C&D secondo la codifica del Regolamento (CE) n.2150/2002.

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		
		2013	2014	2015
Voce	Descrizione	(tonnellate)		
6.1	Rifiuti metallici ferrosi	3.374.712	3.046.070	2.949.921
6.2	Rifiuti metallici non ferrosi	211.779	279.915	283.820
6.3	Rifiuti metallici misti, ferrosi e non ferrosi	119.060	101.754	103.566
7.1	Rifiuti in vetro	47.284	60.098	67.077
7.4	Rifiuti in plastica	12.741	11.537	21.980
7.5	Rifiuti in legno	101.024	113.260	119.110
12.1	Rifiuti minerali della costruzione e della demolizione	22.903.844	24.933.991	25.932.340
<b>Totale nazionale</b>		<b>26.770.444<sup>a,b</sup></b>	<b>28.546.625<sup>a,b</sup></b>	<b>29.477.814<sup>a,b</sup></b>

a) Incluse 600.000 tonnellate avviate a copertura di discarica nel 2013, 457.0000 tonnellate avviate a copertura di discarica nel 2014 e 348.000 tonnellate avviate a copertura di discarica nel 2015.

b) Comprese le esportazioni pari a circa 89.000 tonnellate sia nel 2013 sia nel 2014 e 90.000 tonnellate nel 2015.

Figura 3: Preparazione per il riutilizzo, riciclaggio e altre forme di recupero di materia dei rifiuti da C&D secondo la codifica del Regolamento (CE) n.2150/2002.

Nella voce "Rifiuti minerali della costruzione e della demolizione" sono compresi rifiuti di cemento, mattoni e gesso (non pericolosi), rifiuti di materiale per la bitumatura delle strade contenente idrocarburi (non pericolosi) e rifiuti misti della costruzione, in accordo con i codici del Regolamento (CE) n.2150/2002.

Sulla base dei dati di produzione e gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione, si riportano le percentuali di preparazione per il riutilizzo, riciclaggio e altre forme di recupero di materia relative al periodo 2013-2015.

Anno 2013	Anno 2014	Anno 2015
75,5%	74,3%	76,1%

Figura 4: Tassi di recupero di materia dei rifiuti da C&D.

E' possibile, inoltre, fornire un inquadramento della situazione regionale lombarda in cui, rispetto al livello nazionale, risulta esserci la produzione più alta di rifiuti C&D.

Dal Rapporto "Rifiuti Speciali" redatto da ISPRA nel 2017 è stato, infatti, possibile verificare che nel 2015 la Lombardia ha prodotto 28,4 milioni di tonnellate di *rifiuti speciali*, pari al 21,4% del totale nazionale.

I *rifiuti prodotti dalle operazioni di costruzione e demolizione* rappresentano il 39,2% di tale produzione regionale ed ammontano a circa 11,2 milioni di tonnellate. Di questi, 11,1 milioni di tonnellate sono *non pericolosi*, ovvero il 20,5% di quanto prodotto su scala nazionale (54,1 milioni di tonnellate).

Un'ulteriore analisi, molto accurata, sui flussi dei rifiuti da C&D in Lombardia è stata recentemente eseguita dal Politecnico di Milano (Rigamonti et al.,2017), in collaborazione con Regione Lombardia. Tale analisi, strutturata rispetto a specifici codici EER del capitolo 17 e ai relativi dati MUD 2014, ha riguardato:

- analisi quantitativa dei rifiuti prodotti in regione;
- analisi quantità importate;
- analisi quantità esportate;
- analisi quantità trattate;
- analisi sul tipo di trattamento subito dai rifiuti.

Dall'inquadramento quantitativo, sintetizzato nelle Tabelle 1, 2 e 3, emerge che in Lombardia il conferimento dei rifiuti da C&D ad impianti di recupero è ormai una pratica consolidata, e raggiunge valori oltre il 90% della produzione totale.

EER	PRODUZIONE [t]	Importati [t]	TRATTATI in Regione [t]	Export diretti fuori Regione [t]	Export negli impianti [t]
17 01	804.625	47.075	763.950	31.487	9.189
17 03 02	1.018.580	174.389	971.656	45.259	1.665
17 08 02	31.405	4.419	20.988	5.547	4.870
17 09 04	5.851.639	382.931	5.625.978	187.512	38.149

Tabella 1: Flussi di rifiuti C&D in Lombardia.

EER	Recupero [%]	Stoccaggio [%]	Discarica [%]	Altre operazioni di smaltimento [%]
17 01	92,20	6,00	1,80	0,04
17 03 02	91,90	7,05	0,95	0,10
17 08 02	84,80	14,10	0,30	0,80
17 09 04	91,00	5,40	3,50	0,10

Tabella 2: Quantitativi rifiuti relativi alle diverse operazioni di trattamento.

Impianti di recupero	Impianti con struttura fissa	Impianto mobile cingolato	Impianto mobile cingolato con cernita
Rifiuti C&D destinati a trattamento [%]	14	58	28

Tabella 3: Percentuali rifiuti trattati in base tipologia impianto.

## 1.1. Le problematiche del recupero dei rifiuti inerti

Si riportano, di seguito, una serie di problematiche evidenziate nel rapporto “L’Italia del Riciclo” (2017) inerenti al recupero dei rifiuti inerti prodotti settore edile (chiaramente non riconducibili in modo univoco alle diverse situazioni regionali), tali da rappresentare degli ostacoli al raggiungimento degli obiettivi dell’economia circolare. Esse riguardano:

- Diffidenza nell’utilizzo di prodotti derivati dai rifiuti;
- Mancanza di dati certi sulla produzione dei rifiuti inerti (soprattutto sui rifiuti da C&D);
- Assenza di strumenti tecnici aggiornati (es. Capitolati speciali d’appalto);
- Assenza della voce «aggregati riciclati» in molti dei prezziari delle opere edili;
- Scarsa separazione alla fonte dei rifiuti e impiego di pratiche di demolizione selettiva;
- Mancanza di (adeguata) tassazione dell’attività estrattiva;
- Mancanza di divieto o obbligo di contributo per il conferimento in discarica dei rifiuti inerti.

Il documento pone, altresì, l’attenzione sul fatto che, in altri casi, è invece la normativa ambientale stessa ad ostacolare il mercato dei rifiuti e lo sviluppo del settore, e cita in particolare:

- Test di cessione previsto dall’All.3 del D.M. 186/06 (modalità di esecuzione del test di cessione e limiti da rispettare per l’eluato poco adatti per valutare la compatibilità ambientale degli aggregati riciclati);
- Obbligo di effettuazione delle analisi per i rifiuti avviati a recupero/riciclo;
- Adozione dei criteri End of Waste;
- Marcatura CE (utilizzo di aggregati riciclati accompagnati con la dovuta documentazione – etichettatura e DOP);
- Il Green Public Procurement (applicazione dei CAM).

## 2. Normativa di riferimento

Nel presente capitolo viene trattata la normativa di riferimento per la gestione e recupero dei rifiuti da C&D, e l'utilizzo degli aggregati riciclati. Per cui, nel primo sottocapitolo viene presentata la normativa inerente al recupero dei rifiuti, mentre nel secondo si affronta l'evoluzione del Green Public Procurement fornendo la spiegazione di alcuni strumenti, introdotti con normative più recenti, in esso incardinati.

### 2.1. Normativa ambientale

Il riferimento principale, dal punto di vista normativo, in tema di rifiuti è rappresentato dal Decreto Legislativo 152/2006 e s.m.i (il cosiddetto Testo unico ambientale) Parte IV.

Di seguito verrà anche introdotto il Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998 e s.m.i per ciò che riguarda le procedure per il recupero dei rifiuti e l'esecuzione del test di cessione.

#### 2.1.1 D.lgs. n. 152/2006 (s.m.i.) "Norme in materia ambientale"

La Parte IV "Norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati" del decreto in oggetto contiene le disposizioni di riferimento nazionale in materia di gestione dei rifiuti (TITOLO I).

Si presentano, di seguito, gli articoli ritenuti più significativi ai fini dell'inquadramento della tematica oggetto della ricerca.

Art. 179 "Criteri di priorità nella gestione dei rifiuti": il comma 1 elenca la gerarchia secondo cui devono essere prioritariamente gestiti i rifiuti, privilegiando, quindi, le iniziative dirette a favorire la prevenzione e la riduzione della produzione degli stessi.

- a) prevenzione;
- b) preparazione per il riutilizzo;
- c) riciclaggio;
- d) recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia;
- e) smaltimento.

Il comma 2 precisa che nel rispetto di tale gerarchia dovranno essere adottate le misure volte a incoraggiare le opzioni che garantiscono, il miglior risultato ambientale complessivo, tenendo conto degli impatti sanitari, sociali ed economici, ivi compresa la fattibilità tecnica e la praticabilità economica.

Art. 181 "Riciclaggio e recupero dei rifiuti": fornisce alcune indicazioni per il conseguimento degli obiettivi di riciclaggio e recupero al 2020, tra i quali quello indicato al comma 1, lettera b) "entro il 2020 la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale, incluse operazioni di colmatazione che utilizzano i rifiuti in sostituzione di altri materiali, di rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi, escluso il materiale allo stato naturale definito alla voce 17 05 04 dell'elenco dei rifiuti, sarà aumentata almeno al 70 per cento in termini di peso".

Art. 183 "Definizioni": riporta la definizione di numerosi termini presenti nel decreto, tra cui:

a) “rifiuto”: qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi;

[...]

r) “riutilizzo”: qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti;

[...]

t) “recupero”: 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. L'Allegato C della parte IV del presente decreto riporta un elenco non esaustivo di operazioni di recupero;

[...]

u) “riciclaggio”: qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i rifiuti sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il trattamento di materiale organico ma non il recupero di energia ne' il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento;

[...]

Art. 184-bis “Sottoprodotto”: tale definizione rappresenta un'importante novità introdotta dall'Art. 12 del D.Lgs. n. 205/2010, per cui è da considerarsi sottoprodotto qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfa tutte le seguenti condizioni, di cui al comma 1:

a) la sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;

b) è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;

c) la sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;

d) l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.

Art. 184-ter “Cessazione della qualifica di rifiuto”: l'Art. 181-bis del D.Lgs. n. 4/2008, che introduceva la definizione di “Materia, sostanze e prodotti secondari”, è stato abrogato dall'Art. 39, comma 3, del D.Lgs n. 205/2010, ed è stato sostituito dal concetto di “end of waste”. Per definire questo nuovo concetto (introdotta dall'Art. 12 del D.Lgs. n. 205/2010) l'art. 184-ter, comma 1, fornisce le condizioni per la cessazione della qualifica di rifiuto e indica quali sono le operazioni che rientrano nelle attività di recupero. Secondo tale articolo, un rifiuto cessa di essere tale quando è stato sottoposto a un'operazione di recupero e rispetta tutte le seguenti condizioni:

a) la sostanza o l'oggetto è comunemente utilizzato per scopi specifici;

b) esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;

c) la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;

d) l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

Il comma 2 spiega, poi, che l'operazione di recupero può consistere semplicemente nel controllare i rifiuti per verificare se soddisfano i criteri elaborati conformemente alle predette condizioni.

In merito alle operazioni di recupero, l'Allegato C alla Parte IV del decreto riporta la seguente classificazione:

**R1** Utilizzazione principalmente come combustibile o come altro mezzo per produrre energia

**R2** Rigenerazione/recupero di solventi

**R3** Riciclaggio/recupero delle sostanze organiche non utilizzate come solventi (comprese le operazioni di compostaggio e altre trasformazioni biologiche)

**R4** Riciclaggio /recupero dei metalli e dei composti metallici

**R5** Riciclaggio/recupero di altre sostanze inorganiche

**R6** Rigenerazione degli acidi o delle basi

**R7** Recupero dei prodotti che servono a ridurre l'inquinamento

**R8** Recupero dei prodotti provenienti dai catalizzatori

**R9** Rigenerazione o altri reimpieghi degli oli

**R10** Trattamento in ambiente terrestre a beneficio dell'agricoltura o dell'ecologia

**R11** Utilizzazione di rifiuti ottenuti da una delle operazioni indicate da R1 a R10

**R12** Scambio di rifiuti per sottoporli a una delle operazioni indicate da R1 a R11

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

Si precisa che le operazioni di recupero a cui sono sottoposti i rifiuti da C&D consistono principalmente nelle operazioni R5 e R13.

Il D.Lgs. 152/2006 prevede, altresì, un doppio regime autorizzatorio per l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti:

- REGIME ORDINARIO, normato dall'Art.208 "Autorizzazione unica per i nuovi impianti di smaltimento e di recupero dei rifiuti";
- REGIME SEMPLIFICATO, normato dall'Art. 216 "Operazioni di recupero". Le attività in regime semplificato sono ulteriormente disciplinate dal D.M. 5/02/1998 e s.m.i. (per i rifiuti non pericolosi).

### 2.1.2 D.M. 5/02/1998 “Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n. 22” (e s.m.i. con D.M. 186/2006)

Il presente decreto stabilisce le attività, i procedimenti e i metodi di recupero di ciascuna delle tipologie di rifiuti individuate e descritte nel documento.

In materia di recupero dei rifiuti, gli Articoli 3 e 5 sono fondamentali per avere una indicazione chiara di quali sono le attività che ricadono, rispettivamente, all'interno del concetto di “recupero di materia” e “recupero ambientale”.

L'Art. 3 indica che le attività di riciclaggio e recupero di materia, individuate nell'Allegato 1, “devono garantire l'ottenimento di prodotti o di materie prime o di materie prime secondarie con caratteristiche merceologiche conformi alla normativa tecnica di settore o, comunque, nelle forme usualmente commercializzate. In particolare, i prodotti, le materie prime e le materie prime secondarie ottenuti dal riciclaggio e dal recupero dei rifiuti individuati dal presente decreto non devono presentare caratteristiche di pericolo superiori a quelle dei prodotti e delle materie ottenuti dalla lavorazione di materie prime vergini”.

Nell'ambito del “recupero ambientale” (Art. 5) ricadono tutte quelle attività, individuate nell'Allegato 1, che “consistono nella restituzione di aree degradate ad usi produttivi o sociali attraverso rimodellamenti morfologici”. In ogni caso, il contenuto dei contaminanti deve essere “conforme a quanto previsto dalla legislazione vigente in materia di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati, in funzione della specifica destinazione d'uso del sito”.

Le indicazioni per il campionamento e per lo svolgimento delle analisi relative al test di cessione sono descritte negli articoli 8 e 9.

L'art.8 “Campionamento e analisi” riporta che il campionamento dei rifiuti va effettuato sul rifiuto tal quale, in modo tale da ottenere un campione rappresentativo secondo le norme UNI 10802, “Rifiuti liquidi, granulari, pastosi e fanghi — Campionamento manuale e preparazione ed analisi degli eluati”.

L'art. 9 “Test di cessione” dice, invece, che ai fini dell'effettuazione del test di cessione il campionamento dei rifiuti va effettuato in modo da ottenere un campione rappresentativo secondo le norme Uni 10802, “Rifiuti liquidi, granulari, pastosi e fanghi — Campionamento manuale e preparazione ed analisi degli eluati”. Inoltre, il test va effettuato almeno ad ogni inizio di attività e, successivamente, ogni 12 mesi salvo diverse prescrizioni dell'autorità competente e, comunque, ogni volta che intervengano modifiche sostanziali nel processo di recupero. Le attività di recupero che richiedono specificatamente l'esecuzione del test di cessione sono riportate nel SubAllegato 1 all'Allegato 1.

Nell'Allegato 3 “Criteri per la determinazione del test di cessione” vengono definiti i valori limite con cui confrontare i risultati delle determinazioni analitiche, mostrati in Tabella 4.

Parametri	U.M.	Concentrazione limite
Nitrati	mg/L	50
Fluoruri	mg/L	1,5
Solfati	mg/L	250

Cloruri	mg/L	100
Cianuri	µg/L	50
Bario	mg/L	1
Rame	mg/L	0,05
Zinco	mg/L	3
Berillio	µg/L	10
Cobalto	µg/L	250
Nichel	µg/L	10
Vanadio	µg/L	250
Arsenico	µg/L	50
Cadmio	µg/L	5
Cromo totale	µg/L	50
Piombo	µg/L	50
Selenio	µg/L	10
Mercurio	µg/L	1
Amianto	mg/L	30
COD	mg/L	30
pH	-	5,5-12

*Tabella 4: Limiti del test di cessione in Allegato 3 al D.M.186/2006.*

Il capitolo di riferimento per i rifiuti da C&D nel SubAllegato 1 all'Allegato 1 è il 7 "Rifiuti ceramici e inerti" e, nello specifico, il 7.1 "Tipologia: 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 [101311], [170101], [170102] [170103], [170802], [170107], [170904], [200301]" ed il 7.6 "Tipologia: conglomerato bituminoso, frammenti di piattelli per il tiro al volo [170302] [200301]".

## 2.2. Green Public Procurement (GPP)

Con la pubblicazione nel 1996 del Libro Verde “Gli appalti pubblici nell’Unione Europea”, la Commissione Europea ha aumentato la sua attenzione verso lo strumento del Green Public Procurement (GPP) o Acquisti Verdi.

Il GPP è uno strumento di politica ambientale volontario che ha l’obiettivo di favorire lo sviluppo di un mercato di prodotti e servizi a ridotto impatto ambientale per mezzo della leva della domanda pubblica. Le pubbliche amministrazioni, adoperando con l’approccio del GPP, integrano i criteri ambientali in tutte le fasi di un processo di acquisto, incoraggiando la diffusione di tecnologie ambientali e lo sviluppo di prodotti “ambientalmente preferibili”, attraverso la ricerca e la scelta dei risultati e delle soluzioni che hanno il minore impatto sull’ambiente lungo l’intero ciclo di vita.

I prodotti “ambientalmente preferibili” sono, per esempio, quelli che vengono prodotti con bassi consumi energetici, che sono costituiti da materiale riciclato, privi di sostanze pericolose e di facile riciclabilità.

A partire dal 2003 il GPP è stato riconosciuto dalla Commissione Europea come uno strumento cardine della “Politica Integrata dei Prodotti” (IPP) nell’ambito della relativa Comunicazione COM 2003/302; in tale comunicazione venivano invitati gli stati membri ad adottare dei Piani d’azione nazionali (PAN) sul GPP per assicurarne la massima diffusione. La politica integrata dei prodotti rientra nella strategia comunitaria per lo sviluppo sostenibile e ha come obiettivo quello di ridurre l’impatto ambientale dei prodotti lungo l’intero ciclo di vita, ricorrendo ad un approccio orientato verso la competitività del mercato economico.

La definizione più diffusa di sviluppo sostenibile è quella contenuta nel rapporto Brundtland, elaborato nel 1987 dalla Commissione mondiale sull’ambiente e lo sviluppo: “Lo sviluppo sostenibile, lungi dall’essere una definitiva condizione di armonia, è piuttosto un processo di cambiamento tale per cui lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l’orientamento dello sviluppo tecnologico e i cambiamenti istituzionali siano resi coerenti con i bisogni futuri oltre che con gli attuali” (Commissione Mondiale per l’Ambiente e lo sviluppo, 1987)

L’IPP mira, quindi, ad attivare una combinazione di meccanismi e di strumenti tecnici da mettere a punto, come ad esempio: tasse ecologiche, marchi ed etichette ecologiche, responsabilità estesa dei produttori, appalti ed acquisti pubblici “verdi”, incentivi, ecodesign e banche dati. Tra essi la Valutazione del Ciclo di Vita dei prodotti (Life Cycle Assessment, LCA) assume un ruolo di particolare rilievo, rappresentando la metodologia ideale per valutazioni quantitative sul ciclo di vita, negli strumenti di gestione ambientale.

### 2.2.1. Evoluzione della normativa relativa al GPP in Italia

In Italia, con l’introduzione del **Decreto Ministeriale 203/2003** “*Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo*” si è cercato di incentivare le amministrazioni pubbliche a compiere “acquisti verdi”, in linea con le disposizioni del GPP.

Questo decreto introduce la definizione di **materiale riciclato** quale “*materiale realizzato utilizzando rifiuti da post-consumo, nei limiti in peso imposti dalle tecnologie impiegate per la*

*produzione del medesimo materiale”* (Art. 2, comma 1, lettera a). Questa definizione esclude, però, dei materiali che derivano da particolari lavorazioni che non rientrano nella definizione di “rifiuti post-consumo”, quali ad esempio gli scarti e gli sfridi di lavorazione (es. da piastrelle ceramiche) che, pur essendo analoghi a certi rifiuti che ricadono nella suddetta definizione, non possono essere ritenuti tali perché non sono mai stati immessi sul mercato e quindi utilizzati (Bressi, 2005).

Al fine di gestire un elenco di prodotti e materiali che rispondano ai requisiti imposti dal decreto, viene istituito il Repertorio del riciclaggio (Art. 4, comma 1) che contiene l’elenco dei materiali riciclati, di manufatti e beni in materiale riciclato, e ne indica l’offerta, la disponibilità e la congruità di prezzo.

La **Circolare del Ministero dell’Ambiente del 15 luglio 2005 n. 5205** *“Indicazioni per l’operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del Decreto Ministeriale 8 Maggio 2003, n. 203”* rappresenta l’emanazione del D.M. 203/2003 in cui assume maggior spessore e concretezza il settore del riciclaggio dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione (C&D). Da questo emerge la chiara definizione di materiale riciclato, ovvero un materiale realizzato utilizzando rifiuti post-consumo da costruzione e demolizione.

La Circolare specifica che il materiale riciclato deve essere necessariamente iscritto al Repertorio del Riciclaggio e deve rispettare i seguenti limiti in peso:

*La tecnologia impiegata per la produzione dell’aggregato riciclato non impone particolari limiti. Il limite massimo di rifiuti inerti è pertanto del 100%. Il limite minimo di rifiuti inerti negli aggregati riciclati è del 60%.*

*La tecnologia impiegata per la produzione del conglomerato bituminoso riciclato impone il limite minimo del 20% di rifiuto inerte da scarifica.*

*L’entità effettiva di rifiuti dovrà essere dichiarata nell’ambito della domanda compilata in base allo schema di cui all’Allegato A per i conglomerati bituminosi e all’Allegato B per gli aggregati riciclati, e della perizia giurata di cui all’art. 6, comma 2, lettera b) del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n.203.*

Il documento precisa, inoltre, che l’obbligo di copertura del 30% del fabbisogno annuale di aggregati riciclati per le pubbliche amministrazioni, di cui al DM 203/2003, si genera nel momento in cui i prodotti iscritti al Repertorio del Riciclaggio presentino contestualmente: medesimo uso, ancorché con aspetto, caratteristiche o ciclo produttivo diversi, e prestazioni conformi all’utilizzo cui sono destinati rispetto a quelli realizzati a partire da materiali vergini.

La congruità del prezzo degli aggregati riciclati iscrivibili al Repertorio del riciclaggio è da ritenersi rispettata se tale valore non risulta superiore a quello relativo ai corrispondenti materiali che si vanno a sostituire.

Sono ascrivibili, a titolo di esempio e in maniera non esaustiva, nel Repertorio del Riciclaggio:

- A. Aggregato riciclato risultante dal trattamento di rifiuti inorganici post-consumo derivanti dalla demolizione e dalla manutenzione, anche parziale, di opere edili ed infrastrutturali;
- B. Conglomerato bituminoso riciclato confezionato con rifiuti post-consumo derivanti dalla scarifica della sovrastruttura stradale.

L'Allegato C della Circolare descrive le caratteristiche prestazionali degli aggregati riciclati (necessarie per l'iscrizione al Repertorio del Riciclaggio) in relazione alla tipologia di opera da realizzare:

- A.1 Aggregato riciclato per la realizzazione del corpo dei rilevati di opere in terra dell'ingegneria civile;
- A.2 Aggregato riciclato per la realizzazione di sottofondi stradali, ferroviari, aeroportuali e di piazzali civili ed industriali;
- A.3 Aggregato riciclato per la realizzazione di strati di fondazione delle infrastrutture di trasporto e di piazzali civili ed industriali;
- A.4 Aggregato riciclato per la realizzazione di recuperi ambientali, riempimenti e colmate;
- A.5 Aggregato riciclato per la realizzazione di strati accessori (aventi funzione anticapillare, antigelo, drenante);
- A.6 Aggregato riciclato conforme alla norma armonizzata UNI EN 12620 per il confezionamento di calcestruzzi con resistenza  $\leq 15$  MPa (C12/15), secondo le indicazioni della norma UNI 8520-2.

Tali caratteristiche sono in gran parte riprese da quelle presenti nell'Appendice A della norma UNI 10006:2002, e riguardano:

- **composizione:** viene limitato il contenuto di materiali deperibili e/o plastici cavi (circa lo 0,1% in massa per tutti i tipi di utilizzi) perché a causa della degradazione delle sostanze organiche e dell'evaporazione dei liquidi contenuti nei materiali, si creano dei vuoti che potrebbero provocare dei cedimenti nel tempo;
- **resistenza:** sono fissati dei limiti della perdita in peso per abrasione, calcolata tramite prova Los Angeles, in misura inferiore o uguale al 45% per i sottofondi stradali, e inferiore o uguale al 30% per gli strati di fondazione;
- **forma:** la forma degli aggregati può influenzare il grado di costipamento della miscela e quindi ridurre la portanza (si precisa che in molti capitolati è presente la specifica che nelle miscele non sia elevata la presenza di grani appiattiti o allungati, pur non essendo presenti normative relative alle forme degli aggregati naturali per lo strato di sottofondo e per quello delle fondazioni);
- **caratteristiche granulometriche:** viene indicato che un eccessivo contenuto di materiali fini nella miscela potrebbe comportare il superamento del parametro "equivalente in sabbia";
- **ecocompatibilità:** si rimanda alle normative relative al riutilizzo di rifiuti inerti e al test di cessione previsto dal D.M. 5 febbraio 1998 e s.m.i.

La Circolare prevede, altresì, che i rifiuti derivanti dal post-consumo possano essere miscelati con altri di diversa origine ed il limite minimo di rifiuti inerti negli aggregati riciclati è del 60%.

Il materiale riciclato, per essere considerato idoneo all'impiego, deve essere marcato CE.



Figura 5: Schema esemplificativo della funzione dei due testi.

ALLEGATO -C-  
**CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DEGLI AGGREGATI RICICLATI**

Allegato C1 CORPO DEI RILEVATI		
PARAMETRO	MODALITÀ DI PROVA	LIMITE
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 (caratterizzate secondo EN 13242).	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio 8 mm (rif. UNI EN 13285:2004)	> 70% in massa
Vetro e scorie vetrose	Idem	≤ 15% in massa
Conglomerati binuminosi	Idem	≤ 25% in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nel corpo stradale ai sensi della legislazione vigente	Idem	≤ 15% in totale e ≤ 5% per ciascuna tipologia
Materiali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume; Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie in plastica, etc.	Idem	≤ 0,1% in massa
Altri materiali (metalli, gesso*, guaine, gomme, lana di roccia o di vetro, etc.)	Idem	≤ 0,6% in massa
Passante al setaccio da 63 mm	UNI EN 933/1 (**)	85 - 100%
Passante al setaccio da 4 mm	UNI EN 933/1 (**)	≤ 60%
Passante al setaccio da 0,063 mm	UNI EN 933/1 (**)	≤ 15%
Equivalente in Sabbia	UNI EN 933-8	> 20
Dimensione massima D <sub>max</sub>	UNI EN 933/1	= 125 mm
Ecocompatibilità	Test di cessione di cui all'Al. 3 DM 05/02/1998	Il materiale dovrà risultare conforme al test di cessione previsto dal DM 5 febbraio 1998

(\*) Il gesso deve essere riconosciuto mediante l'osservazione del cromatismo, la valutazione della durezza, la presenza di effervescenza a contatto con gocce di soluzione costituita da una parte di HCl e quattro parti di H<sub>2</sub>O.  
(\*\*) La serie di setacci deve essere composta al minimo dai seguenti setacci delle serie ISO 3310-1, ISO 3310-2: aperture 63, 31,5, 16, 8, 4, 2, 0,5, 0,063 mm.  
Nota 1: La preparazione del campione da sottoporre ad analisi granulometrica va eseguita, se necessario, in stufa ventilata a 50-60° (secondo UNI EN 10975).  
Nota 2: I costituenti della frazione trattenuta al setaccio da 63 mm devono essere compatti e privi di vuoti interni (blocchi di roccia, mattoni pieni, calcestruzzo sovrato di armatura sporgente) non possono essere accettati mattoni forati, blocchi forati e simili, se non frantumati fino a risultare passati al setaccio da 63 mm.  
Nota 3 (Frequenza delle Prove): gli aggregati riciclati per miscelo non legate e legate idraulicamente destinati a lavori stradali e altri lavori di ingegneria civile devono essere caratterizzati conformemente a quanto indicato nella Norma Armonizzata UNI EN 13242:2004. Al fine di prevenire disomogeneità dovute alla variabilità dei materiali costituenti il materiale va caratterizzato per lotti. Tali lotti possono rappresentare la produzione di un periodo di una settimana a frequenza minima allegato C UNI EN 13242:2004) e devono comunque avere dimensione massima pari a 3000 m<sup>3</sup>. Possono essere impiegati esclusivamente lotti precedentemente caratterizzati e tale caratterizzazione è da intendersi valida esclusivamente per il lotto cui si riferisce.

Tabella 5: Allegato C1, aggregati riciclati nel corpo dei rilevati.

Allegato C2 SOTTOFONDI STRADALI

PARAMETRO	MODALITÀ DI PROVA	LIMITE
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 (caratterizzate secondo EN 13242).	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio 8 mm (rif. UNI EN 13285:2004)	> 80% in massa
Vetro e scorie vetrose	Idem	≤ 10% in massa
Conglomerati bituminosi	Idem	≤ 15% in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nei sottofondi stradali ai sensi della legislazione vigente	Idem	≤ 15% in totale e ≤ 5% per ciascuna tipologia
Materiali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume; Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie in plastica, etc.	Idem	≤ 0,1% in massa
Altri materiali (metalli, gesso*, guaine, gomme, lana di roccia o di vetro, etc.)	Idem	≤ 0,4% in massa
Equivalente in Sabbia	UNI EN 933-8	> 30
Perdita in peso per abrasione con apparecchio "Los Angeles"	(UNI EN 1097/2)	≤ 45
Passante al setaccio da 63 mm	UNI EN 933/1(**)	= 100%
Passante al setaccio da 4 mm	UNI EN 933/1(**)	≤ 60%
Rapporto tra il Passante al setaccio da 0,5 mm ed il Passante al setaccio da 0,063 mm	UNI EN 933/1(**)	> 3/2
Passante al setaccio 0,063 mm	UNI EN 933/1(**)	≤ 15%
Indice di forma (frazione > 4 mm)	(UNI EN 933/4)	≤ 40
Indice di appiattimento (frazione > 4 mm)	(UNI EN 933/3)	≤ 35
Ecocompatibilità	Test di cessione di cui all'Al. 3 DM 05/02/1998	Il materiale dovrà risultare conforme al test di cessione previsto dal DM 5 febbraio 1998

(\*) Il gesso deve essere riconosciuto mediante l'osservazione del cromatino, la valutazione della durezza, la presenza di effervescenza a contatto con gocce di soluzione costituita da una parte di HCl e due parti di H<sub>2</sub>O.

(\*\*) La serie di setacci deve essere composta al minimo dai seguenti setacci delle serie ISO 3310-1, ISO 3310-2: aperture 63, 31,5, 16,8, 4,2, 0,5, 0,063 mm. La preparazione del campione da sottoporre ad analisi granulometrica va eseguita, se necessario, in stufa ventilata a 50-60° (secondo UNI EN 1097/5).

Nota 3 (Frequenza delle Prove): gli aggregati riciclati per miscele non legate e legate idraulicamente destinati a lavori stradali e altri lavori di ingegneria civile devono essere caratterizzati conformemente a quanto indicato nella Norma Armonizzata UNI EN 13242:2004. Al fine di prevenire disomogeneità dovute alla variabilità dei materiali costituenti il materiale va caratterizzato per lotti. Tali lotti possono rappresentare la produzione di un periodo di una settimana (frequenza minima allegato C UNI EN 13242:2004) e devono comunque avere dimensione massima pari a 3000 m<sup>3</sup>. Possono essere impiegati esclusivamente lotti precedentemente caratterizzati e tale caratterizzazione è da intendersi valida esclusivamente per il lotto cui si riferisce.

Tabella 6: Allegato C2, aggregati riciclati nei sottofondi stradali.

Allegato C3 STRATI DI FONDAZIONE

PARAMETRO	MODALITÀ DI PROVA	LIMITE
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 (caratterizzate secondo EN 13242).	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio 8 mm (rif. UNI EN 13285)	> 90% in massa
Vetro e scorie vetrose	Idem	≤ 5% in massa
Conglomerati bituminosi	Idem	≤ 3% in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero in sottofondi o fondazioni stradali ai sensi della legislazione vigente	Idem	≤ 5% per ciascuna tipologia
Materiali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume; Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie in plastica, etc.	Idem	≤ 0,1% in massa
Altri materiali (metalli, guaine, gomme, lana di roccia o di vetro, etc.)	Idem	≤ 0,4% in massa
Passante al setaccio da 40 mm	UNI EN 933/1(*)	100%
Passante al setaccio da 20mm	UNI EN 933/1(*)	>61%; <79%
Passante al setaccio da 10mm	UNI EN 933/1(*)	>41%; <64%
Passante al setaccio da 4 mm	UNI EN 933/1(*)	>31%; <49%
Passante al setaccio da 2 mm	UNI EN 933/1(*)	>22%; <36%
Passante al setaccio da 1 mm	UNI EN 933/1(*)	>13%; <30%
Passante al setaccio da 0,5 mm	UNI EN 933/1(*)	>10%; <20%
Passante allo staccio da 0,063 mm	UNI EN 933/1(*)	≤ 10%
Rapporto tra il Passante al setaccio da 0,5 mm ed il Passante al setaccio da 0,063 mm	UNI EN 933/1(*)	> 3/2
Equivalente in Sabbia	UNI EN 933-8	>30
Perdita in peso per abrasione con apparecchio "Los Angeles"	UNI EN 1097/2	≤ 30
Indice di forma (frazione > 4 mm)	UNI EN 933/4	≤ 40
Indice di appiattimento (frazione > 4 mm)	UNI EN 933/3	≤ 35
Ecocompatibilità	Test di cessione di cui all'Al. 3 DM 05/02/1998	Il materiale dovrà risultare conforme al test di cessione previsto dal DM 5 febbraio 1998

(\*) La preparazione del campione da sottoporre ad analisi granulometrica va eseguita, se necessario, in stufa ventilata a 50-60° (secondo UNI EN 1097/5).

Nota 1: L'indice portante CBR della miscela, determinato in laboratorio (secondo la CNR UNI 10009 (prEN 13286/47)) su campioni costigati al 94% della massa volumica max AAS (IT0 Mod. con umidità compresa entro il ± 2% del valore ottimo, dovrà avere, sia immediatamente dopo il compattamento, sia dopo 1 giorno di imbibizione in acqua, un valore non inferiore a 30.

Nota 3 (Frequenza delle Prove): gli aggregati riciclati per miscele non legate e legate idraulicamente destinati a lavori stradali e altri lavori di ingegneria civile devono essere caratterizzati conformemente a quanto indicato nella Norma Armonizzata UNI EN 13242:2004. Al fine di prevenire disomogeneità dovute alla variabilità dei materiali costituenti il materiale va caratterizzato per lotti. Tali lotti possono rappresentare la produzione di un periodo di una settimana (frequenza minima allegato C UNI EN 13242:2004) e devono comunque avere dimensione massima pari a 3000 m<sup>3</sup>. Possono essere impiegati esclusivamente lotti precedentemente caratterizzati e tale caratterizzazione è da intendersi valida esclusivamente per il lotto cui si riferisce.

Tabella 7: Allegato C3, aggregati riciclati negli strati di fondazione.

Allegato C4 RECUPERI AMBIENTALI, RIEMPIMENTI E COLMATE

PARAMETRO	MODALITÀ DI PROVA	LIMITE
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 (caratterizzate secondo EN 13242).	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio 8 mm (rif. UNI EN 13285)	≥ 70% in massa
Vetro e scorie vetrose	Idem	≤ 15% in massa
Conglomerati bituminosi	Idem	≤ 25% in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nel corpo stradale ai sensi della legislazione vigente	Idem	≤ 15% in totale e ≤ 5% per ciascuna tipologia
Materiali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume; Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie in plastica, etc.	Idem	≤ 0,1% in massa
Altri materiali (metalli, gesso*, guaine, gomme, lana di roccia o di vetro, etc.)	Idem	≤ 0,6 % in massa
Passante al setaccio da 63 mm	UNI EN 933/1 (**)	85 - 100%
Passante al setaccio da 0,063 mm	UNI EN 933/1 (**)	≤ 15%
Ecocompatibilità	Test di cessione di cui all' All. 3 DM 05/02/1998	Il materiale dovrà risultare conforme al test di cessione previsto dal DM 5 febbraio 1998

(\*) Il gesso deve essere riconosciuto mediante l'osservazione del cronometro, la valutazione della durezza, la presenza di effervescenza a contatto con gocce di soluzione costituita da una parte di HCl e due parti di H<sub>2</sub>O.  
(\*\*) La serie di setacci deve essere composta al minimo dai seguenti setacci delle serie: ISO 3310-1, ISO 3310-2 aperture 63, 31,5, 16, 8, 4, 2, 0,5, 0,063 mm.  
Nota 1. La preparazione del campione da sottoporre ad analisi granulometrica va eseguita, se necessario, in stufa ventilata a 50-60° (secondo UNI EN 1097/5).  
Nota 2. I costituenti della frazione trattenuta al setaccio da 63 mm devono essere compatti e privi di vuoti interni (blocchi di roccia, mattoni pieni, calcestruzzo scuro di armatura sporgente): non possono essere accettati mattoni forati, blocchi forati e simili, se non frantumati fino a risultare passanti al setaccio da 63 mm.  
Nota 3 (Frequenza delle Prove): gli aggregati riciclati per miscele non legate e legate idraulicamente destinati a lavori stradali e altri lavori di ingegneria civile devono essere caratterizzati conformemente a quanto indicato nella Norma Armonizzata UNI EN 13242:2004. Al fine di prevenire disomogeneità dovute alla variabilità dei materiali costituenti il materiale va caratterizzato per lotti. Tali lotti possono rappresentare la produzione di un periodo di una settimana (frequenza minima allegato C UNI EN 13242:2004) e devono comunque avere dimensione massima pari a 3000 m<sup>3</sup>. Possono essere impiegati esclusivamente lotti precedentemente caratterizzati e tale caratterizzazione è da intendersi valida esclusivamente per il lotto cui si riferisce.

Tabella 8: Allegato C4, aggregati riciclati nei recuperi ambientali, riempimenti e colmate.

Allegato C5

STRATI ACCESSORI AVENTI FUNZIONE ANTIGELO, ANTICAPILLARE, DRENANTE, ETC.

Possono essere costituiti da materiale riciclato se considerato idoneo allo scopo. Tale materiale deve rispettare le prescrizioni relative alla composizione valide per gli strati di sottofondo.

PARAMETRO	MODALITÀ DI PROVA	LIMITE
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 (caratterizzate secondo EN 13242).	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio 8 mm	> 80% in massa
Vetro e scorie vetrose	Idem	≤ 10% in massa
Conglomerati bituminosi	Idem	≤ 15% in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nei sottofondi stradali ai sensi della legislazione vigente	Idem	≤ 15% in totale e ≤ 5% per ciascuna tipologia
Materiali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume; Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie in plastica, etc.	Idem	≤ 0,1% in massa
Altri materiali (metalli, gesso**, guaine, gomme, lana di roccia o di vetro, etc.)	Idem	≤ 0,4 % in massa
Ecocompatibilità	Test di cessione di cui all' All. 3 DM 05/02/1998	Il materiale dovrà risultare conforme al test di cessione previsto dal DM 5 febbraio 1998

Nota (Frequenza delle Prove): gli aggregati riciclati per miscele non legate e legate idraulicamente destinati a lavori stradali e altri lavori di ingegneria civile devono essere caratterizzati conformemente a quanto indicato nella Norma Armonizzata UNI EN 13242:2004. Al fine di prevenire disomogeneità dovute alla variabilità dei materiali costituenti il materiale va caratterizzato per lotti. Tali lotti possono rappresentare la produzione di un periodo di una settimana (frequenza minima allegato C UNI EN 13242:2004) e devono comunque avere dimensione massima pari a 3000 m<sup>3</sup>. Possono essere impiegati esclusivamente lotti precedentemente caratterizzati e tale caratterizzazione è da intendersi valida esclusivamente per il lotto cui si riferisce.

Tabella 9: Allegato C5, aggregati riciclati negli strati accessori.

A fronte di questo, è possibile affermare quindi come il DM 203/03 abbia effettivamente introdotto l'obbligo di utilizzo dei materiali riciclati da parte della pubblica amministrazione, ma di fatto non ha mai trovato applicazione per mancanza di una reale volontà politica, tant'è che il Repertorio del riciclaggio non è più operativo.

Il Ministero dell'Ambiente ha, di conseguenza, preferito trasformare l'obbligo di impiego in un invito alle stazioni appaltanti pubbliche ad adottare strumenti volontari (Green Public

Procurement - GPP, o cosiddetti acquisti verdi) atti a favorire, nell'attribuzione degli appalti, le imprese che impieghino materiali rispondenti ai criteri ambientali minimi.

Sulla base dell'indicazione contenuta nella comunicazione della Commissione Europea (COM 2003/302), è stato pertanto elaborato un "Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica amministrazione" (PAN GPP), adottato con il Decreto Interministeriale dell'11 aprile 2008 (G.U. n. 107 dell'8 maggio 2008) e aggiornato con Decreto 10 aprile 2013 (G.U. n. 102 del 3 maggio 2013), per promuovere concretamente l'impiego dei materiali riciclati.

Il PAN GPP fornisce un quadro generale sul Green Public Procurement, definisce degli obiettivi nazionali, identifica le categorie di beni, servizi e lavori di intervento prioritarie per gli impatti ambientali e i volumi di spesa, su cui definire i 'Criteri Ambientali Minimi' (CAM).

Con l'emanazione del Decreto Interministeriale di approvazione del Piano d'azione nazionale sul GPP, è stato quindi delineato a livello nazionale un quadro di riferimento complessivo utile a facilitare l'adozione e l'implementazione di pratiche di GPP sia dal punto di vista tecnico che metodologico.

La Legge n. 221 del 28 dicembre 2015 "Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali" è la prima legge effettivamente organica in materia di green economy, che prevede un approccio innovativo e che punta ad un nuovo metodo di prevenzione e gestione dei rifiuti.

La *Green Economy* consiste in un nuovo approccio allo sviluppo economico che ha lo scopo di superare i limiti di quello tradizionale, che si è da sempre basato sullo sfruttamento delle risorse naturali e sulla scarsa attenzione agli impatti che le attività antropiche hanno su ambiente, società e qualità della vita. In questo la green economy risulta innovativa: oltre a riconoscere i limiti del pianeta, li rimarca come confini all'interno dei quali si deve muovere il nuovo modello economico. Questo nuovo modello si basa su un uso sostenibile delle risorse e su una riduzione drastica degli impatti ambientali e sociali, per ottenere un miglioramento generalizzato della qualità della vita (Moncuso & Morabito, 2012). All'interno di questa legge si trattano diverse tematiche: il capitale naturale, la mobilità sostenibile, la difesa del suolo, la bonifica, la difesa delle risorse idriche e le nuove procedure in materia di valutazione d'impatto ambientale e sanitario. L'approvazione di questa legge segna, dunque, un importante cambiamento nell'economia che punta sempre di più sulla sostenibilità ambientale.

Nel merito, gli Art. 16, 17 e 18 si occupano di specificare i dettagli e le procedure inerenti agli appalti verdi, ai marchi EMAS ed Ecolabel e ai criteri ambientali minimi (CAM), in modo da incentivare la green economy e contenere l'uso delle risorse naturali.

Un'altra importante innovazione apportata da questa legge, con l'art. 21, è l'introduzione dello Schema nazionale volontario per la valutazione e la comunicazione dell'impronta ambientale (Made Green in Italy). Questo schema ha lo scopo di promuovere la competitività del sistema produttivo italiano nei mercati internazionali.

Il **Decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50** "Codice dei contratti pubblici"(recentemente aggiornato con Decreto Legislativo 19 aprile 2017), recependo le nuove Direttive comunitarie, ha fornito input ancor più vigorosi di quelli di matrice comunitaria e costituisce anche un'importante svolta verso l'economia verde in quanto l'Italia diventa il primo Paese che impone l'obbligo di applicazione dei GPP per le stazioni appaltanti, ampliando l'importanza

che gli “acquisti sostenibili” rivestono come strumento strategico per favorire il passaggio verso un’economia più sostenibile.

Ciò significa che le Amministrazioni, nel momento in cui vorranno acquistare lavori, forniture o servizi, dovranno inserire nei bandi di gara le specifiche tecniche e le clausole contrattuali contenute nei documenti inerenti i cosiddetti “Criteri Ambientali Minimi” (CAM) per la specifica categoria.

## 2.3. Criteri ambientali minimi (CAM)

### 2.3.1. Nozione

I “Criteri Ambientali Minimi” o CAM rappresentano le misure volte all’integrazione delle esigenze di sostenibilità ambientale nelle procedure d’acquisto di beni e servizi da parte delle amministrazioni pubbliche.

Tali criteri si definiscono “minimi” in quanto devono, tendenzialmente, permettere di dare un’indicazione omogenea agli operatori economici in modo da garantire, da un lato, un’adeguata risposta da parte del mercato alle richieste formulate dalla pubblica amministrazione e, dall’altro, di rispondere agli obiettivi ambientali che la Pubblica Amministrazione intende raggiungere tramite gli appalti pubblici al fine di qualificare le gare come “verdi” ai sensi del PAN GPP.

Rispetto al settore edile di riferimento, essi hanno lo scopo di ridurre l’impatto ambientale sulle risorse naturali, di aumentare l’uso di materiali riciclati e conseguentemente incentivare il recupero dei rifiuti, con particolare riguardo ai rifiuti da demolizione e costruzione (coerentemente con l’obiettivo di recuperare e riciclare entro il 2020 almeno il 70% dei rifiuti non pericolosi da costruzione e demolizione). Tali criteri si identificano, pertanto, come indicazioni di carattere tecnico a supporto degli acquisti, da parte delle PA, di lavori, forniture e servizi che producano il minor impatto ambientale possibili.

Essi rappresentano sia un chiaro segnale del crescente interesse che si sta sviluppando attorno al tema della sostenibilità ambientale, che un forte messaggio da parte del settore pubblico all’incentivazione dell’utilizzo degli aggregati riciclati (messaggio che in futuro potrebbe interessare direttamente anche il settore privato).

La normativa di riferimento è rappresentata dal D.Lgs. 50/2016 s.m.i. e dal D.M. 24 dicembre 2015 s.m.i.

### 2.3.2. Rilevanza nel D.Lgs 50/2016 “Codice dei contratti pubblici” e s.m.i.

Secondo il D.Lgs. 50/2016 le stazioni appaltanti hanno l’obbligo di inserire nei bandi di gara le specifiche tecniche e le clausole contrattuali contenute nei documenti sui CAM.

L’art. 34 “Criteri di sostenibilità energetica e ambientale” specifica come le stazioni appaltanti contribuiscano al conseguimento degli obiettivi ambientali previsti dal Piano d’azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione attraverso l’inserimento, nella documentazione progettuale e di gara, almeno delle specifiche tecniche e delle clausole contrattuali contenute nei criteri ambientali minimi adottati con decreto del Ministro dell’ambiente e della tutela del territorio e del mare.

L’articolo precisa anche che, nel caso di contratti relativi alle categorie di appalto riferite agli interventi di ristrutturazione, inclusi quelli comportanti demolizione e ricostruzione, i CAM devono essere tenuti in considerazione, per quanto possibile, in funzione della tipologia di intervento e della localizzazione delle opere da realizzare, sempre sulla base dei criteri definiti dal MATTM.

L'Art. 69 dispone, inoltre, che le Amministrazioni, nel momento in cui vogliono acquistare lavori, forniture o servizi, possono imporre la richiesta di un'etichettatura specifica come prova che tutto corrisponda alle caratteristiche richieste.

Per le Pubbliche Amministrazioni le certificazioni ambientali servono come garanzia di conformità del prodotto ai requisiti ambientali fissati nei CAM, mentre per le aziende sono degli strumenti che le sollevano dall'onere di provare con dettagliata documentazione il rispetto dei requisiti minimi richiesti (MATTM, 2017).

Il Codice dei contratti pubblici fissa, dunque, dei precisi requisiti di ammissibilità delle certificazioni ambientali, sia dal punto di vista delle caratteristiche che le certificazioni devono possedere (Art. 69), che dal punto di vista delle qualifiche del soggetto che le rilascia (Art. 82).

### 2.3.3. Decreto Ministeriale 24 Dicembre 2015 "Adozione dei criteri ambientali minimi" e s.m.i.

*"Adozione dei criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici e per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione e criteri ambientali minimi per le forniture di ausili per l'incontinenza"*

Il Decreto in oggetto descrive i "Criteri Ambientali Minimi" da utilizzare per gli appalti di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici e per la gestione dei cantieri. Tali tipologie di affidamento rientrano nella categoria "Edilizia" prevista dal PAN GPP.

Il documento riporta alcune indicazioni di carattere generale che consistono in richiami alla normativa di riferimento e in ulteriori indicazioni proposte alle stazioni appaltanti in relazione all'espletamento della relativa gara d'appalto e all'esecuzione del contratto.

I "criteri ambientali minimi" sono definiti per le diverse fasi della procedura di gara e hanno l'obiettivo di migliorare il servizio o il lavoro prestato, assicurando prestazioni ambientali al di sopra della media del settore.

Essi si suddividono in criteri ambientali "di base" e "premianti". Nel merito, si precisa che un appalto può essere definito "verde", ai sensi del PAN GPP, solo se include almeno i criteri di base.

Dei due allegati di cui si compone il Decreto, quello di nostro interesse è il primo: Allegato 1 – "Affidamento del servizio progettazione per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici e per la progettazione e gestione del cantiere."

#### **Allegato 1 - Affidamento del servizio progettazione per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici e per la progettazione e gestione del cantiere**

##### **Criteri comuni a tutti i componenti edilizi**

Il capitolo 2.4.1 "Criteri comuni a tutti i componenti edilizi" dell'Allegato 1 indica, in linea generale, che allo scopo di ridurre l'impatto ambientale sulle risorse naturali, di aumentare l'uso di materiali riciclati aumentando così il recupero dei rifiuti (con particolare riguardo ai rifiuti da demolizione e costruzione) fermo restando il rispetto di tutte le norme vigenti e di

quanto previsto dalle specifiche norme tecniche di prodotto, il progetto di un edificio (nel caso di ristrutturazioni si intende l'applicazione ai nuovi materiali che vengono usati per l'intervento o che vanno a sostituire materiali già esistenti nella costruzione) deve prevedere il rispetto dei criteri riportati nell'Allegato, quali ad esempio:

1. Il contenuto di materia prima seconda recuperata o riciclata nei materiali utilizzati per l'edificio, anche considerando diverse percentuali per ogni materiale, deve essere pari ad almeno il 15% in peso valutato sul totale di tutti i materiali utilizzati. Di tale percentuale, almeno il 5% deve essere costituita da materiali non strutturali.
2. Almeno il 50% dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati (calcolato in rapporto sia al volume sia al peso dell'intero edificio) deve essere sottoponibile, a fine vita, a demolizione selettiva ed essere riciclabili o riutilizzabili. Di tale percentuale, almeno il 15% deve essere costituita da materiali non strutturali;
3. Non è consentito l'utilizzo di prodotti contenenti sostanze ritenute dannose per lo strato d'ozono;
4. Non devono essere utilizzati materiali contenenti sostanze elencate nella Candidate List.

Il progettista deve compiere scelte tecniche di progetto, specificare le informazioni ambientali dei prodotti scelti, fornire la documentazione tecnica che consenta di soddisfare tali criteri e prescrivere che in fase di approvvigionamento sarà compito dell'appaltatore accertarsi della rispondenza ai CAM tramite la documentazione indicata nella verifica di ogni criterio. Tale documentazione dovrà essere presentata alla stazione appaltante in fase di esecuzione dei lavori, nelle modalità indicate nel capitolato.

#### **Quantitativi minimi di aggregato riciclato per ogni materiale**

Si elencano di seguito i quantitativi minimi di aggregato riciclato per ogni materiale definiti al capitolo 2.4.2 "Criteri specifici per i componenti edilizi".

<b>Componente</b>		<b>Contenuto minimo materiali riciclati [% in peso]</b>
Calcestruzzi (e relativi materiali componenti) confezionati in cantiere, preconfezionati e prefabbricati		5
Laterizi	Per muratura e solai	10
	Per coperture, pavimenti e muratura faccia vista	5
Ghisa, ferro, acciaio	Acciaio da forno elettrico	70
	Acciaio da ciclo integrale	10
Materie plastiche (sul totale di tutti i componenti in materia plastica utilizzati)		30
Murature in pietrame e miste		Solo materiale di recupero (pietrame e blocchetti)
Tamponature, tramezzature e controsoffitti (prodotti in gesso)		5

*Tabella 10: tabella riassuntiva delle percentuali minime di aggregato riciclato in ogni materiale.*

I calcestruzzi usati per il progetto devono essere prodotti con un contenuto minimo di materia riciclata di almeno il 5% in peso. Tale contenuto deve essere inteso come la somma

delle percentuali di materia riciclata presente nei singoli componenti (cemento, aggregati, aggiunte, additivi) e deve essere compatibile con i limiti imposti dalle specifiche norme tecniche.

I laterizi utilizzati per la realizzazione di muratura e solai devono avere un contenuto di materiale riciclato per almeno il 10% in peso. Al contrario, i laterizi per coperture, pavimenti e murature faccia vista devono presentare un contenuto di almeno il 5% in peso.

Per quanto riguarda gli usi strutturali, il progettista deve prescrivere l'utilizzo di acciaio prodotto con un contenuto minimo di materiale riciclato, di seguito specificato, in base al tipo di processo industriale, ovvero:

- Acciaio da forno elettrico: contenuto minimo di materiale riciclato pari al 70%.
- Acciaio da ciclo integrale: contenuto minimo di materiale riciclato pari al 10%.

Il materiale deve essere prodotto in modo tale da escludere che nelle materie prime siano presenti accumuli di metalli pesanti pericolosi in concentrazione superiore allo 0,025% (fatta eccezione per i componenti di lega).

Le materie plastiche devono prevedere un contenuto di materiale riciclato pari almeno al 30% in peso valutato sul totale di tutti i componenti in materia plastica utilizzati. Il suddetto requisito può essere derogato nel caso in cui il componente impiegato rientri contemporaneamente nelle due casistiche sotto riportate:

- 1) abbia una specifica funzione di protezione dell'edificio da agenti esterni quali ad esempio acque meteoriche (membrane per impermeabilizzazione);
- 2) sussistano obblighi di legge specifici relativi a garanzie minime di durabilità legate alla suddetta funzione.

Per le murature, per opere di fondazione ed opere in elevazione il progettista deve prescrivere l'uso di solo materiale di recupero (pietrame e blocchetti).

I prodotti in gesso, denominati lastre di cartongesso, destinati alla posa in opera di sistemi a secco, come ad esempio tamponature, tramezzature e controsoffitti, devono:

- essere accompagnati dalle informazioni sul loro profilo ambientale;
- avere un contenuto di almeno il 5% in peso di materie riciclate.

	Isolante in forma di pannello	Isolante stipato, a spruzzo/insufflato	Isolante in materassini
Cellulosa		80%	
Lana di vetro	60%	60%	60%
Lana di roccia	15%	15%	15%
Perlite espansa	30%	40%	8%-10%
Fibre in poliestere	60-80%		60 – 80%
Polistirene espanso	dal 10% al 60% in funzione della tecnologia adottata per la produzione.	dal 10% al 60% in funzione della tecnologia adottata per la produzione.	
Polistirene estruso	dal 5 al 45% in funzione della tipologia del prodotto e della tecnologia adottata per la produzione.		
Poliuretano espanso	1-10% in funzione della tipologia del prodotto e della tecnologia adottata per la produzione.	1-10% in funzione della tipologia del prodotto e della tecnologia adottata per la produzione.	
Isolante riflettente in alluminio			15%

Tabella 11: Quantitativo minimo di materiale riciclato per materiali isolanti

Gli isolanti devono rispettare i seguenti criteri:

- Non devono essere prodotti utilizzando ritardanti di fiamma che siano oggetto di restrizioni o proibizioni previste da normative nazionali o comunitarie applicabili;
- Non devono essere prodotti con agenti espandenti con un potenziale di riduzione dell'ozono superiore a zero;
- Non devono essere prodotti o formulati utilizzando catalizzatori al piombo quando spruzzati o nella formazione della schiuma di plastica;
- Se prodotti da una resina di polistirene espandibile gli agenti espandenti devono essere inferiori al 6% del peso del prodotto finito;
- Il prodotto finito deve contenere le seguenti quantità minime di materiale riciclato (calcolate come somma di pre e post consumo), misurato sul peso del prodotto finito.

#### **Allegato 1. Par. 2.5 “Specifiche tecniche del cantiere”**

Nell'ambito del paragrafo 2.5.1 viene indicato che le demolizioni e le rimozioni di materiali devono essere eseguite in modo da favorire il trattamento e recupero delle varie frazioni di materiali. A tal fine il progetto dell'edificio deve prevedere che:

1. Nei casi di ristrutturazione, manutenzione e demolizione, almeno il 70% in peso dei rifiuti non pericolosi generati durante la demolizione e rimozione di edifici, parti di edifici, manufatti di qualsiasi genere presente in cantiere, ed escludendo gli scavi, deve essere avviato a operazioni di preparazione per il riutilizzo, recupero o riciclaggio;
2. Il contraente deve effettuare una verifica di pre-demolizione per determinare ciò che può essere riutilizzato, riciclato o recuperato. Tali operazioni includono:

- individuazione e valutazione dei rischi di rifiuti pericolosi che possono richiedere un trattamento o trattamento specialistico, o emissioni che possono sorgere durante la demolizione;
- una stima delle quantità con una ripartizione dei diversi materiali da costruzione;
- una stima della percentuale di riutilizzo e il potenziale di riciclaggio sulla base di proposte di sistemi di selezione durante il processo di demolizione;
- una stima della percentuale potenziale raggiungibile con altre forme di recupero del processo di demolizione.

Il paragrafo 2.5.3 “Prestazioni ambientali” dispone che le attività di cantiere devono garantire le seguenti prescrizioni:

- per tutte le attività di cantiere e trasporto dei materiali devono essere utilizzati mezzi che rientrano almeno nelle categorie EEV (veicolo ecologico migliorato);
- gli impatti sul clima non minimizzabili (con mezzi ibridi, elettrici a metano o a GPL) che derivano dalle emissioni dei gas climalteranti dovute a mezzi di trasporto e mezzi di cantiere, devono essere compensati con lo sviluppo di progetti CDM (Clean Development Mechanism) e/o JI (Joint Implementation), ovvero eventuale partecipazione a un carbon fund.

Inoltre, al fine di ridurre i rischi ambientali, la relazione tecnica deve contenere anche l'individuazione puntuale delle possibili criticità legate all'impatto ambientale delle singole tipologie di lavorazione in cantiere.

Nel paragrafo 2.6.3 “Materiali rinnovabili” viene proposta l’attribuzione di un punteggio premiante, deciso dalla stazione appaltante, per l’utilizzo di materiali da costruzione derivati da materie prime rinnovabili per almeno il 10% in peso sul totale dell’edificio, escluse le strutture portanti. Il punteggio è di tipo progressivo e prevede almeno tre diverse soglie correlate alla percentuale in peso uguale o superiore al 10%.

Anche nel paragrafo 2.6.4 “Distanza di approvvigionamento dei prodotti da costruzione” viene proposta l’attribuzione di un punteggio premiante per l’utilizzo di prodotti costituiti per almeno il 25% in peso da materiali estratti, raccolti o recuperati, nonché lavorati (processo di fabbricazione) ad una distanza massima di 350 km dal cantiere di utilizzo. Per distanza massima si intende la sommatoria di tutte le fasi di trasporto incluse nella filiera produttiva. Qualora alcune fasi del trasporto avvengano via ferrovia o mare, per il calcolo di tali distanze si dovrà utilizzare un fattore moltiplicativo di 0.25.

Si evidenzia, infine, che nel **Decreto Ministeriale 11 ottobre 2017**, che aggiorna il D.M. 24 dicembre 2015 viene precisato, come l’aggregato costituito da materiale riciclato, materiale recuperato, sottoprodotto, sia un materiale utile per i produttori di componenti edilizi che devono rispettare gli specifici requisiti richiesti dai CAM (calcestruzzi, prefabbricati in calcestruzzo, ecc.).

I CAM non richiedono al produttore di aggregato di dare evidenza del contenuto di riciclato mediante una delle opzioni indicate (EPD, certificazione di prodotto, ecc.), ma sarà il produttore del componente edilizio, soggetto al rispetto dei CAM, che dovendo fare uso di AR, potrà richiedere al proprio fornitore delle evidenze in merito al valore di contenuto di

riciclato/recuperato/sottoprodotto del prodotto fornito (a garanzia del valore dichiarato per il prodotto, per i quali egli si assume diretta responsabilità). A riguardo, le possibili evidenze utili risultano essere:

- Certificato di marcatura CE per il contenuto di riciclato (garanzia di base obbligatoria);
- Autodichiarazione da parte del produttore (Asserzione ambientale autodichiarata conforme alla ISO 14021) per il contenuto di recuperato e/o sottoprodotto (forma di garanzia maggiore);
- Convalida dell'asserzione ambientale autodichiarata, Certificazione di prodotto del contenuto di riciclato/recuperato/sottoprodotto, EPD (garanzia di terza parte).

## 2.4. Certificazione del materiale granulare: *Marcatura CE*

Ad oggi l'industria delle costruzioni rappresenta uno dei settori fondamentali dell'economia per la maggior parte dei paesi europei; ciò premesso, per superare le barriere alla libera circolazione e commercializzazione dei prodotti edili sorte anche a causa delle diverse normative di settore vigenti in ciascun paese della comunità europea, l'UE ha dato inizio ad un'azione di armonizzazione.

Nasce, quindi, La direttiva europea 89/106/CEE "Prodotti da costruzione" (CPD) che definisce i criteri e le prescrizioni per poter commercializzare i materiali da costruzione in Europa, sulla base della marcatura CE.

Secondo la direttiva è da considerarsi materiale da costruzione qualsiasi prodotto fabbricato al fine di essere permanentemente incorporato in opere di costruzione, le quali comprendono gli edifici e le opere d'ingegneria civile.

La marcatura CE è un'attività che responsabilizza fortemente il produttore, in quanto ha l'obbligo di assicurare che il prodotto sia progettato, realizzato e verificato in conformità ai requisiti essenziali di sicurezza (Bressi & Pagani, 2004).

La marcatura serve, infatti, a garantire la conformità del prodotto affinché possa essere immesso nel mercato dei paesi nell'Unione Europea.

L'applicazione del marchio CE presenta due vantaggi: certifica il percorso di produzione come preciso e controllato e dimostra che l'azienda applica un processo di produzione in continuo monitoraggio.

In Italia questa direttiva è stata recepita con il D.P.R. 21/04/1993 n. 246, riguardante i prodotti da costruzione, ed è stata applicata tramite il Decreto del Ministro delle Infrastrutture 11 aprile 2007. Gli allegati di tale Decreto riguardano: Allegato 1 "individuazione di prodotti e relative norme armonizzate di riferimento", Allegato 2 "descrizione di metodi di attestazione della conformità degli aggregati", Allegato 3 "definizione di tutte le caratteristiche tecniche che il produttore deve dichiarare in funzione dell'uso previsto per gli aggregati".

Il Parlamento europeo e del Consiglio ha introdotto il 9 marzo 2011 il Regolamento n. 305/2011 che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e che abroga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio. Questo nuovo regolamento ha cercato di semplificare e chiarire la direttiva precedente e anche di superare alcune limitazioni che aveva mostrato durante la sua applicazione.

Tra le novità più significative apportate da questo nuovo Regolamento c'è l'introduzione di un requisito di base delle opere di costruzione, riportato al punto 7 nell'Allegato 1, in cui si cita per la prima volta l'uso sostenibile delle risorse naturali.

Per cui, le opere di costruzione devono essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare quanto segue:

- a) il riutilizzo o la riciclabilità delle opere di costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione;
- b) la durabilità delle opere di costruzione;
- c) l'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.

Questa innovazione è un sintomo positivo ad un approccio più sostenibile e attento alle risorse naturali che si sta riscontrando nel settore delle costruzioni.

Per quanto riguarda la marcatura CE dei prodotti da costruzione, da un punto di vista strettamente tecnico, sono presenti norme di settore specifiche (UNI) che riportano l'elenco e le relative metodiche dei requisiti che un aggregato deve avere per essere recuperato nei vari settori.

Per il settore delle costruzioni, le normative tecniche per la marcatura CE di aggregati riciclati sono:

- UNI EN 12620:2008 "Aggregati per calcestruzzo";
- UNI EN 13139:2003 "Aggregati per malta";
- UNI EN 13043:2004 "Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico";
- UNI EN 13055:2016 "Aggregati leggeri";
- UNI EN 13242:2008 "Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade";
- UNI EN 13450:2003 "Aggregati per massicciate ferroviarie";
- UNI EN 13383-1:2016 "Aggregati per opere di protezione (armourstone)";
- UNI 11531-1:2014 "Costruzione e manutenzione delle opere civili delle infrastrutture - Criteri per l'impiego dei materiali - Parte 1: Terre e miscele di aggregati non legati".

Segue un approfondimento delle principali norme UNI di interesse ai fini della presente ricerca, tra cui quelle riguardanti il confezionamento di calcestruzzi, e le opere stradali e geotecniche.

#### 2.4.1. Norma UNI EN 12620 e Norma UNI 8520

##### *"Aggregati per calcestruzzo"*

Nell'Aprile del 1998 il Comitato Europeo per la Normalizzazione (CEN) ha ricevuto il Mandato M/125 per la stesura di una norma per la classificazione e determinazione delle caratteristiche prestazionali degli aggregati, che devono essere oggetto di specifiche norme europee armonizzate. Nel settembre 2002 il Comitato tecnico 154 del CEN ha emesso la norma "EN 12620: Aggregati per il calcestruzzo" in risposta alla direttiva CDP 89/106 CEE<sup>1</sup> sui prodotti da costruzione.

La norma è applicabile ad aggregati naturali, artificiali e riciclati, il cui uso è previsto per la realizzazione dei calcestruzzi. Tale norma è stata recepita in Italia inizialmente con la UNI EN 12620:2003, aggiornata in seguito con la UNI EN 12620:2008 "Aggregati per il calcestruzzo" e

---

<sup>1</sup> DIRETTIVA DEL CONSIGLIO del 21 dicembre 1988 relativa al ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari e amministrative degli Stati membri concernenti i prodotti da costruzione (89/106/CEE).

segna in un certo senso una svolta, in quanto per la prima volta in Italia, insieme alla circolare 5205/2005, si fa riferimento agli aggregati riciclati (Figura 6).

<b>1</b>	<p><b>SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE</b></p> <p>La presente norma europea specifica le proprietà di aggregati e filler ottenuti mediante la lavorazione di materiali naturali, industriali o riciclati e miscele di detti aggregati per la confezione di calcestruzzo. Si applica ad aggregati aventi massa volumica dopo essiccazione in stufa maggiore di 2,00 Mg/m<sup>3</sup> (2 000 kg/m<sup>3</sup>) per tutti i calcestruzzi, compreso il calcestruzzo in conformità alla EN 206-1 e il calcestruzzo utilizzato in strade o altre pavimentazioni e per l'utilizzo in prodotti prefabbricati di calcestruzzo.</p> <p>Essa specifica inoltre le caratteristiche relative a un sistema di gestione della produzione degli aggregati e alla valutazione della conformità dei prodotti alla presente norma europea.</p> <p>La presente norma non riguarda i filler da utilizzare come costituenti del cemento, o diversi dai filler inerti per calcestruzzo.</p>
----------	---

Figura 6: Scopo e campi di applicazione UNI EN 12620:2008.

Nel 2005 sono state emanate le istruzioni complementari per l'applicazione della UNI EN 12620:

- UNI 8520-1 "Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 – Parte 1: Designazione dei criteri di conformità", aggiornata all'anno 2015;
- UNI 8520-2 "Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 – Parte 2: Requisiti", aggiornata all'anno 2016.

Le versioni emanate nel 2005 sostituiscono rispettivamente quelle del 1999 e del 2002.

La UNI 8520-1 definisce le caratteristiche che devono essere dichiarate e garantite dal produttore di aggregati (per ciascuna caratteristica deve essere indicato il riferimento normativo e la frequenza minima di prova). La norma specifica, inoltre, i due Sistemi di Attestazione della conformità previsti per gli aggregati e quali indicazioni debbano fornire.

<b>NORMA ITALIANA</b>	<p><b>Aggregati per calcestruzzo</b>  <b>Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620</b>  <b>Parte 1: Designazione e criteri di conformità</b></p>	<b>UNI 8520-1</b>
		OTTOBRE 2015
<b>1</b>	<p><b>SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE</b>  <i>(riferimento al punto 1 della UNI EN 12620:2008)</i></p> <p>La presente norma volontaria non sostituisce la norma europea armonizzata EN 12620 ma fornisce istruzioni utili per la sua applicazione in Italia, ragguagli sulla designazione degli aggregati e sui criteri di conformità e sulle frequenze di prova.</p>	

Figura 7: Scopo e campi di applicazione UNI 8520-1.

La UNI 8520-2 specifica, invece, i requisiti degli aggregati e le loro caratteristiche, definendoli e classificandoli in conformità alla UNI EN 12620, destinati al confezionamento di calcestruzzi di adeguata resistenza e durabilità in funzione della destinazione d'uso (Figure 8 e 9).

Nel punto 4.2, viene fatto esplicito richiamo agli aggregati riciclati e ai suoi possibili utilizzi:

- l'utilizzo totale o parziale di aggregato di riciclo proveniente da demolizione non selettiva (macerie tout-venant), cioè comprendente macerie di diversi materiali per il confezionamento di calcestruzzi non strutturali con classe di resistenza  $\leq C12/15$ ;
- l'utilizzo totale o parziale di aggregato di riciclo proveniente da demolizione selettiva, cioè di solo calcestruzzo, per il confezionamento di calcestruzzi strutturali con classe di resistenza  $\leq C20/25$ .

NORMA ITALIANA	<b>Aggregati per calcestruzzo</b> <b>Istruzioni complementari per l'applicazione della</b> <b>EN 12620</b> <b>Requisiti</b>	UNI 8520-2
		SETTEMBRE 2005
<b>SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE</b>		
(riferimento UNI EN 12620 punto 1)		
<p>La presente norma specifica le <u>caratteristiche e i requisiti degli aggregati</u>, definiti e classificati in conformità della UNI EN 12620, <u>destinati alla confezione di calcestruzzi</u>. La presente norma è finalizzata alla scelta delle categorie di aggregati previsti nella UNI EN 12620 al fine di ottenere calcestruzzi di adeguata resistenza e durabilità in funzione della destinazione d'uso.</p>		

Figura 8: Scopo e campi di applicazione UNI 8520-2.

#### 4.2

##### Origine degli aggregati ed aggregati di riciclo

(riferimento UNI EN 12620 appendice H punto H.3.3)

Gli aggregati destinati alla produzione di calcestruzzo possono provenire da: giacimenti naturali, rocce frantumate, idonee scorie siderurgiche, materiali di riciclo, da demolizione e artificiale, ottenuto mediante specifiche lavorazioni.

Per gli aggregati di riciclo in attesa di una regolamentazione europea è permesso:

- l'utilizzo totale o parziale di aggregati di riciclo provenienti da demolizioni di edifici (macerie) solo per calcestruzzi con classe di resistenza  $\leq C12/15$ ;
- l'utilizzo parziale o totale degli aggregati provenienti da frantumazione di solo calcestruzzo per calcestruzzi aventi classe di resistenza  $\leq C20/25$ .

La miscela di aggregati di riciclo con aggregati ordinari, ad esclusione della caratterizzazione delle specie mineralogiche, deve soddisfare i requisiti specificati nel proseguo.

Nota Aggregati fino a 5% di materiale da demolizione (macerie) o 10% di calcestruzzo frantumato possono essere utilizzate anche per il confezionamento di calcestruzzi con classe di resistenza maggiore di C20/25.

Figura 9: Origine degli aggregati ed aggregati di riciclo paragrafo 4.2 UNI 8520-2.

Molto importante è anche la nota dove vengono specificate le quantità massime di aggregato utilizzabile a seconda della tipologia:

- max 5% in caso di aggregato da demolizione (macerie);
- max 10% in caso di aggregato ottenuto da calcestruzzo frantumato.

Tali limiti sono stati modificati con l'aggiornamento del maggio 2016 (Figura 10).

NORMA ITALIANA	<b>Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti</b>	UNI 8520-2
		MAGGIO 2016
Aggregates for concrete - Additional provisions for the application of EN 12620 - Part 2: Requirements		
<p>La norma contiene le istruzioni complementari per l'applicazione in Italia della EN 12620. Specifica le caratteristiche e i requisiti degli aggregati e filler, definiti e classificati in conformità della UNI EN 12620, destinati alla confezione di calcestruzzi di adeguata resistenza e durabilità, in funzione della destinazione d'uso.</p>		

Figura 10: Scopo e campi di applicazione UNI 8520-2 (agg. 2016).

Relativamente all'origine degli aggregati, come si evince dall'estratto della norma indicato in Figura 11, viene fatto esplicito rimando agli aggregati di origine naturale, alle scorie siderurgiche e agli aggregati riciclati da materiali da costruzione e demolizione. Inoltre, si fa riferimento agli aggregati riciclati di pezzatura grossa con prescrizioni più dettagliate in funzione della composizione degli aggregati stessi.

#### Origine degli aggregati

(riferimento al punto H.3.3 della UNI EN 12620:2008)

Gli aggregati destinati alla produzione di calcestruzzo possono provenire da: giacimenti naturali, rocce frantumate, scorie siderurgiche, processi industriali, riciclo di materiali da costruzione e demolizione.

In appendice A sono trattate le principali tipologie di aggregati di origine industriale con storicità d'uso.

Sono ritenuti idonei per l'uso in calcestruzzo conforme alla UNI EN 206 gli aggregati grossi riciclati, classificati secondo il prospetto 20 della UNI EN 12620:2008, appartenenti alle seguenti tipologie:

**Tipo A** : Rc<sub>90</sub>, Rcu<sub>95</sub>, Rb<sub>10</sub>, Ra<sub>1</sub>, FL<sub>2</sub>, XRG<sub>1</sub>.

**Tipo B** : Rc<sub>50</sub>, Rcu<sub>70</sub>, Rb<sub>30</sub>, Ra<sub>5</sub>, FL<sub>2</sub>, XRG<sub>2</sub>.

Le regole di utilizzo sono riportate nella UNI 11104.

Figura 11: Origine degli aggregati ed aggregati di riciclo capitolo 4.2 UNI 8520-2.

Sfruttando le Tabelle seguenti si è in grado di identificare le diverse tipologie di aggregato di riciclo in base al loro costituente principale.

COSTITUENTE	DESCRIZIONE
Rc	Calcestruzzo, prodotti di calcestruzzo, malte Mattoni in calcestruzzo
Ru	Aggregati non legati, aggregati naturali Aggregati legati con leganti idraulici
Rb	Frammenti di mattoni in argilla (i.e. mattoni e tegole) Frammenti di mattoni silicei Calcestruzzo aerato non galleggiante
Ra	Materiali bituminosi
FL	Materiale lapideo galleggiante (in volume)
X	Altri materiali: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiali coesivi (i.e. argilla e terre)</li> <li>• Materiali vari: metalli (ferrosi e non ferrosi),</li> <li>• Legno non galleggiante, plastica e sughero</li> <li>• Cartongesso</li> </ul>
Rg	Vetro

Tabella 12: Classificazione dei costituenti degli aggregati di riciclo grossolani.

Tipologie di aggregato		Classe di resistenza	% massima di sostituzione														
			Classe di esposizione														
			X0	XC1 XC2 XC3	XC4	XS1	XS2 XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2 XF3 XF4	XA1	XA2	XA3		
Tipo A	R <sub>c90</sub> , R <sub>cu95</sub> , R <sub>b10</sub> , R <sub>a1</sub> , FL <sub>2</sub> , Rg <sub>1</sub>	≥C12/15 ≤C20/25	60%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		≤ C30/37	30%	30%	-	-	-	20%	-	-	-	20%	20%	-	-		
		≤ C45/55	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%		
Tipologie di aggregato		Classe di resistenza	% massima di sostituzione														
Tipo A			Classe di esposizione non applicabile														
Tipo B		CB/10	≤ 100%														
Rc: calcestruzzo, prodotti di calcestruzzo e malta; Ru: aggregati non legati, aggregati naturali, aggregati legati con leganti idraulici; Rb: frammenti di mattoni o tegole in argilla, frammenti di mattoni silicei, frammenti di calcestruzzo aerato non galleggiante; Ra: materiali bituminosi; Rg: vetro; FL: materiale lapideo galleggiante (in volume). X: altri materiali: coesivi (argilla e terra), metalli ferrosi e non ferrosi, gesso, plastica e gomma, legno non galleggiante.																	

Tabella 13: Massima percentuale di sostituzione dell'aggregato grosso con aggregato grosso riciclato in funzione della tipologia di aggregato, della classe di resistenza e della classe di esposizione.

Dalla Tabella 13 si può notare come siano definite con precisione le quantità di aggregato grossolano naturale sostituibili con aggregato grossolano riciclato in funzione della tipologia di aggregato, della classe di resistenza e della classe di esposizione. Accanto ad ognuna di queste sigle (R<sub>c90</sub>, R<sub>cu95</sub>, R<sub>b90</sub> ecc..) sono indicati un numero o delle lettere, illustrate nella Tabella 14, che si riferiscono alla percentuale di costituente principale racchiuso nell'aggregato di riciclo.

Constituent	Content Percentage by mass	Category
Rc	≥ 90	Rc <sub>90</sub>
	≥ 80	Rc <sub>80</sub>
	≥ 70	Rc <sub>70</sub>
	≥ 50	Rc <sub>50</sub>
	< 50	Rc <sub>Declared</sub>
	No requirement	Rc <sub>NR</sub>
Rc + Ru	≥ 95	RCU <sub>95</sub>
	≥ 90	RCU <sub>90</sub>
	≥ 70	RCU <sub>70</sub>
	≥ 50	RCU <sub>50</sub>
	< 50	RCU <sub>Declared</sub>
	No requirement	RCU <sub>NR</sub>
Rb	≤ 10	Rb <sub>10-</sub>
	≤ 30	Rb <sub>30-</sub>
	≤ 50	Rb <sub>50-</sub>
	> 50	Rb <sub>Declared</sub>
		No requirement
Ra	≤ 1	Ra <sub>1-</sub>
	≤ 5	Ra <sub>5-</sub>
	≤ 10	Ra <sub>10-</sub>
X + Rg	≤ 0,5	XRg <sub>0,5-</sub>
	≤ 1	XRg <sub>1-</sub>
	≤ 2	XRg <sub>2-</sub>
	<b>Content</b> cm <sup>3</sup> /Kg	
FL	≤ 0,2 <sup>a</sup>	FL <sub>0,2-</sub>
	≤ 2	FL <sub>2-</sub>
	≤ 5	FL <sub>5-</sub>

<sup>a</sup> The ≤ 0,2 category is intended only for special applications requiring high quality surface finish.

Tabella 14: Categorie dei costituenti degli aggregati di riciclo grossolani.

## 1 Scope

This European Standard specifies the properties of aggregates and filler aggregates obtained by processing natural, manufactured or recycled materials and mixtures of these aggregates for use in concrete. It covers aggregates having an oven dried particle density greater than 2,00 Mg/m<sup>3</sup> (2 000 kg/m<sup>3</sup>) for all concrete, including concrete in conformity with EN 206-1 and concrete used in roads and other pavements and for use in precast concrete products. <sup>(A)</sup> It also covers recycled aggregate with densities between 1,50 Mg/m<sup>3</sup> (1 500 kg/m<sup>3</sup>) and 2,00 Mg/m<sup>3</sup> (2 000 kg/m<sup>3</sup>) with appropriate caveats and recycled fine aggregate (4 mm) with appropriate caveats. <sup>(A)</sup>

It also specifies that a quality control system is in place for use in factory production control and it provides for the evaluation of conformity of the products to this European Standard.

This standard does not cover filler aggregates to be used as a constituent in cement or as other than inert filler aggregates for concrete.

<sup>(A)</sup> NOTE 1 Aggregates used in construction should comply with all the requirements of this European Standard. As well as familiar and traditional natural and manufactured aggregates Mandate M/125 "Aggregates" included recycled aggregates and some materials from new or unfamiliar sources. Recycled aggregates are included in the standards and new test methods for them are at an advanced stage of preparation. For unfamiliar materials from secondary sources, however, the work on standardisation has only started recently and more time is needed to define clearly the origins and characteristics of these materials. In the meantime such unfamiliar materials when placed on the market as aggregates must comply fully with this standard and national regulations for dangerous substances (see Annex ZA of the standard) depending upon their intended use. Additional characteristics and requirements may be specified on a case by case basis depending upon experience of use of the product, and defined in specific contractual documents. <sup>(A)</sup>

NOTE 2 Properties for lightweight aggregates are specified in <sup>(A)</sup> EN 13055-1:2002 <sup>(A)</sup>.

Figura 12: Scopo e campi di applicazione UNI EN 12620:2008.

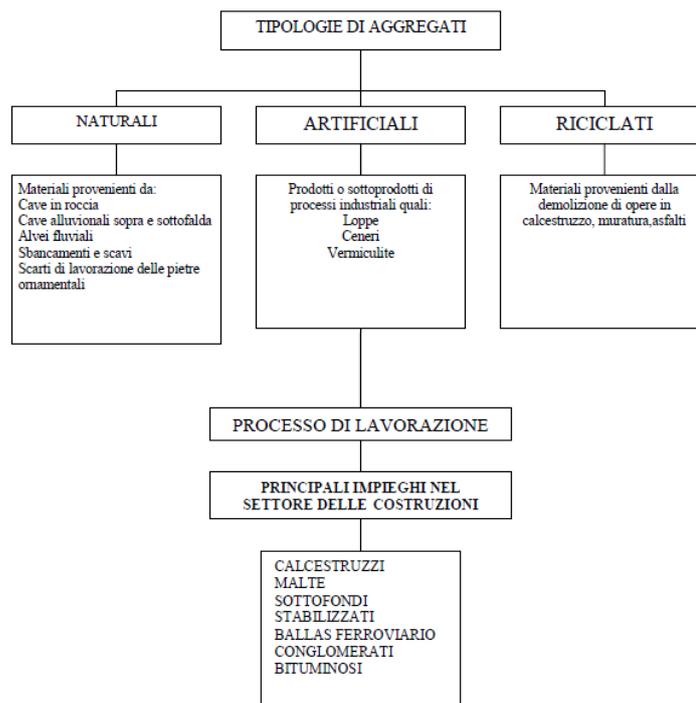


Figura 13: Classificazione degli aggregati secondo la Norma EN 12620.

Le norme UNI 8520-1 e 8520-2 chiariscono, quindi, alcuni dettagli della UNI EN 12620 rendendola applicabile in Italia e consentono l'utilizzo di aggregati di riciclo anche nel confezionamento di calcestruzzi strutturali, di estremo interesse per la presente ricerca. Per questa specifica tipologia di aggregati non vengono specificati metodi di prova specifici, in quanto vengono applicati gli stessi criteri utilizzati per i naturali.

Nella Figura 14 è riportato un esempio dei requisiti geometrici, fisici e chimici richiesti per la marcatura CE degli aggregati. Alcuni parametri presenti nella scheda di marcatura riguardano:

- l'indice di forma: rappresenta la percentuale di particelle di forma allungata nell'aggregato, definite dalla norma come "non cubiche", sul totale della massa della porzione di prova;
- l'indice riferito alla granulometria: espresso in termini di rapporto  $d/D$ , dove  $d$  rappresenta la dimensione minima dei grani presenti nell'aggregato, mentre  $D$  indica la dimensione massima;
- la resistenza alla frammentazione dell'aggregato grossolano: ottenuta mediante il test "Los Angeles" che consiste nel valutare quanta frazione fine viene prodotta ponendo l'aggregato a contatto con una carica di sfere di acciaio;
- la durabilità al gelo-disgelo: è l'indice che deriva da una prova che consiste nel sottoporre l'aggregato a dieci cicli di gelo-disgelo terminati i quali si analizzano gli effetti sui granuli, in relazione soprattutto alla nascita di fessurazioni o eventuali perdite di massa.

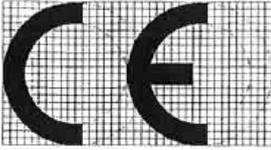
 01234			Marcatura di conformità CE, consistente nel simbolo "CE" riportato nella Direttiva 93/68/CEE
Any Co Ltd, PO Box 21, B-1050  02  0123-CPD-0456			Numero di identificazione dell'ente di ispezione  Nome o marchio identificativo e indirizzo registrato del produttore  Ultime due cifre dell'anno in cui è stata applicata la marcatura  Numero del certificato CE
EN 12620  <b>Aggregati per calcestruzzo</b>			N° della norma europea  Descrizione del prodotto e
<b>Forma dei granuli</b> <b>Granulometria</b> <b>Massa volumica dei granuli</b> <b>Pulizia</b> Qualità delle polveri  Contenuto di conchiglie <b>Resistenza alla frammentazione/frantumazione</b> <b>Resistenza alla levigabilità</b> <b>Resistenza all'abrasione</b> <b>Resistenza all'usura</b> <b>Composizione/contenuto</b> Cloruri Solfati solubili in acido Zolfo totale  Costituenti che alterano la velocità di presa e di indurimento del calcestruzzo Contenuto di carbonato <b>Stabilità di volume</b> Ritiro per essiccamento  Costituenti che influenzano la stabilità di volume della scoria d'altolorno raffreddata in aria Contenuto di carbonato <b>Assorbimento di acqua</b> <b>Emissione di radioattività</b>  <b>Rilascio di metalli pesanti</b> <b>Rilascio di idrocarburi poliaromatici</b> <b>Rilascio di altre sostanze pericolose</b> <b>Durabilità al gelo/disgelo</b> <b>Durabilità alla reazione alcali-silice</b>	Valore dichiarato Designazione Valore dichiarato  Passa/non passa rispetto al valore di soglia Categoria Categoria Categoria  Valore dichiarato Categoria Passa/non passa rispetto al valore di soglia  Passa/non passa rispetto al valore di soglia Valore dichiarato  Passa/non passa rispetto al valore di soglia Valore dichiarato  Valore dichiarato Valore dichiarato Valori dichiarati come richiesto  Valori di soglia validi sul posto di impiego  per esempio Sostanza X: 0,2 µm³ Valore dichiarato Valore dichiarato come richiesto	(F) (dD) (Mg/m³)  (%)  (MB, SE) (per esempio SC <sub>10</sub> ) (LA <sub>15</sub> )  (PSV <sub>56</sub> ) (AAV <sub>10</sub> , A <sub>N</sub> 30) (M <sub>DE</sub> 20)  (% C) (per esempio AS <sub>0,2</sub> ) (% S)  (Tempo di presa in minuti e resistenza a compressione S%) (% CO <sub>2</sub> )  (% WS)  (Aspetto)  (% CO <sub>2</sub> ) (% WA)  (Fo MS)	informazione sul prodotto e sulle caratteristiche regolamentate

Figura 14: Esempio di scheda per la marcatura "CE".

## 2.4.2. Norma UNI EN 13242

*“Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade”*

La presente norma 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. Fornisce, inoltre, i criteri di classificazione del materiale secondo caratteristiche geometriche, fisiche e chimiche e prescrive un sistema di controllo della produzione per la marcatura CE.

Il materiale deve essere descritto innanzitutto in termini di dimensione dell'aggregato tramite designazione del rapporto tra dimensione dello staccio inferiore e superiore ( $d/D$ ) e deve soddisfare tutti i requisiti granulometrici specificati nella Tabella sottostante.

Aggregato	Dimensione mm	Percentuale in massa del passante					Categoria <i>G</i>
		2 $D^{a)}$	1,4 $D^{b)c)}$	$D^{d)}$	$d^{e)}$	$d/2^{b)c)}$	
Grosso	$d \geq 1$ e $D > 2$	100	da 98 a 100	da 85 a 99	da 0 a 15	da 0 a 5	$G_C$ 85-15
		100	da 98 a 100	da 80 a 99	da 0 a 20	da 0 a 5	$G_C$ 80-20
Fine	$d = 0$ e $D \leq 6,3$	100	da 98 a 100	da 85 a 99	-	-	$G_F$ 85
		100	da 98 a 100	da 80 a 99	-	-	$G_F$ 80
In frazione unica	$d = 0$ e $D > 6,3$	-	100	da 85 a 99	-	-	$G_A$ 85
		100	da 98 a 100	da 80 a 99	-	-	$G_A$ 80
		100	-	da 75 a 99	-	-	$G_A$ 75

a) Per dimensioni degli aggregati dove  $D$  è maggiore di 63 mm (per esempio 80 mm e 90 mm) si applicano solo i requisiti di sopravaglio relativi allo staccio 1,4  $D$ , poiché non c'è nessuno staccio indicato nella serie della ISO 565/R20 maggiore di 125 mm.  
b) Qualora gli stacci calcolati come 1,4  $D$  e  $d/2$  non siano quelli delle dimensioni esatte indicate nella serie della ISO 565/R20, si deve adottare la dimensione di staccio più prossima successiva.  
c) Per impieghi speciali possono essere specificati requisiti aggiuntivi.  
d) La percentuale del passante  $D$  può essere maggiore del 99%, ma in tali casi il produttore deve documentare e dichiarare la granulometria tipica, compresi gli stacci  $D$ ,  $d/2$  e gli stacci indicati nel gruppo base più gruppo 1 o nel gruppo base più gruppo 2 intermedi tra  $d$  e  $D$ . Gli stacci con un rapporto minore di 1,4 volte lo staccio minore successivo possono essere esclusi.  
e) I limiti per la percentuale di passante  $d$  possono essere modificati da 1 a 15 per  $G_C$  85-15 e da 1 a 20 per  $G_C$  80-20, se necessario per assicurare un aggregato ben vagliato.

Tabella 15: Requisiti generali granulometrici.

La norma propone, poi, un'ulteriore distinzione tra aggregati grossolani e fini elencando le categorie di limiti e tolleranze generali, in particolare per quanto riguarda la frazione grossolana quando il rapporto  $D/d \geq 2$ .

**Categorie di limiti e tolleranze generali per l'aggregato grosso agli stacci di medie dimensioni**

$D/d$	Staccio di medie dimensioni mm	Limiti e tolleranze generali agli stacci di medie dimensioni (Percentuale in massa del passante) dove $D/d \geq 2$		Categoria <i>GT</i>
		Limiti generali	Scostamenti limite sulla granulometria tipica dichiarata dal produttore	
<4	$D/1,4$	da 25 a 80	$\pm 15$	$GT_C$ 25/15
		da 20 a 70	$\pm 15$	$GT_C$ 20/15
$\geq 4$	$D/2$	da 20 a 70	$\pm 17,5$	$GT_C$ 20/17,5
Nessun requisito				$GT_{NR}$

Qualora gli stacci di medie dimensioni calcolati in precedenza non siano quelli delle dimensioni esatte indicate nella serie della ISO 565/R20, allora si deve utilizzare lo staccio più prossimo nella serie.

Tabella 16: Limiti e tolleranze per l'aggregato grosso con  $D/d > 2$ .

**Categorie di tolleranze per la granulometria tipica dichiarata dal produttore per aggregati fini e in frazione unica**

Scostamenti limite Percentuale in massa di passante			Categoria	
Staccio $D$	Staccio $D/2$	Staccio da 0,063 mm	Aggregato fine $GT_F$	Aggregato in frazione unica $GT_A$
$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 3^{a)}$	$GT_F10$	$GT_A10$
$\pm 5$	$\pm 20$	$\pm 4^{b)}$	$GT_F20$	$GT_A20$
$\pm 7,5$	$\pm 25$	$\pm 5^{c)}$	$GT_F25$	$GT_A25$
Nessun requisito			$GT_FNR$	$GT_ANR$
Qualora lo staccio di medie dimensioni calcolato in precedenza non è quello delle dimensioni esatte indicate nella serie della ISO 565/R20, allora si deve utilizzare lo staccio più prossimo nella serie.				
Nota Gli scostamenti limite degli stacci $D$ sono ulteriormente limitati dai requisiti del prospetto 2.				
a) Eccetto la categoria $f_3$ (vedere prospetto 8).				
b) Eccetto le categorie $f_5$ e $f_7$ per gli aggregati fini e $f_3$ , $f_5$ e $f_7$ per gli aggregati in frazione unica (vedere prospetto 8).				
c) Eccetto le categorie $f_5$ e $f_7$ per gli aggregati fini e $f_3$ , $f_5$ , $f_7$ e $f_9$ per gli aggregati in frazione unica (vedere prospetto 8).				

Tabella 17: Tolleranze per aggregati fini e in frazione unica.

Il contenuto di fini per aggregato grosso, fine e in frazione unica deve essere, invece, dichiarato facendo riferimento alla seguente Tabella.

**Categorie dei valori massimi del contenuto di fini**

Aggregato	Frazione in massa di passante allo staccio da 0,063 mm %	Categoria $f$
Grosso	$\leq 2$	$f_2$
	$\leq 4$	$f_4$
	$> 4$	$f_{\text{Dichiarato}}$
	Nessun requisito	$f_{NR}$
Fine	$\leq 3$	$f_3$
	$\leq 7$	$f_7$
	$\leq 10$	$f_{10}$
	$\leq 16$	$f_{16}$
	$\leq 22$	$f_{22}$
	$> 22$	$f_{\text{Dichiarato}}$
	Nessun requisito	$f_{NR}$
In frazione unica	$\leq 3$	$f_3$
	$\leq 5$	$f_5$
	$\leq 7$	$f_7$
	$\leq 9$	$f_9$
	$\leq 12$	$f_{12}$
	$\leq 15$	$f_{15}$
	$> 15$	$f_{\text{Dichiarato}}$
	Nessun requisito	$f_{NR}$

Tabella 18: Valori massimi del contenuto di fini in riferimento alla tipologia di aggregato.

Oltre a ciò, in base alla specifica applicazione, destinazione d'uso o origine dell'aggregato, nasce la necessità di sottoporre a prova e dichiarare tutte le proprietà dell'aggregato rispetto ai requisiti chimici stabiliti dalla norma stessa, quali il contenuto di solfato solubile in acido e di zolfo totale.

La durabilità dev'essere valutata considerando differenti variabili:

- nei casi in cui si rilevano segni di "Sonnenbrand", tipologia di decadimento della roccia che si manifesta sotto l'influenza delle condizioni atmosferiche, devono essere determinate la perdita di massa e la resistenza alla frammentazione;

- la resistenza al gelo-disgelo, sulla base della suscettibilità dell'aggregato determinata attraverso esame petrografico ed assorbimento d'acqua. Se quest'ultimo, determinato in conformità alla EN 1097-6:2000, non risulta maggiore di un valore 0,5% si deve presumere che l'aggregato sia resistente al gelo/disgelo.

#### Categorie dei valori massimi di assorbimento di acqua

Assorbimento di acqua Percentuale in massa %	Categoria $WA_{24}$
$\leq 0,5$	$WA_{24} 0,5$
$> 0,5$	$WA_{24}$ Dichiarato
Nessun requisito	$WA_{24}$ NR
Nota La prova di assorbimento di acqua sotto forma di prova di screening non si applica per le scorie d'altoforno.	

Tabella 19: Categorie dei valori massimi di assorbimento di acqua.

Il produttore deve, poi, effettuare prove e controlli per garantire che il prodotto (ovvero l'aggregato riciclato) sia conforme alla presente norma europea ed ai relativi valori dichiarati. Per questo vengono stabiliti determinati periodi di frequenza di campionamento e di prova:

prospetto C.1 **Frequenze minime di prova per le proprietà generali**

	Proprietà	Punto	Note/riferimenti	Metodo di prova	Frequenza minima di prova
1	Granulometria	4.3		EN 933-1	1 alla settimana
2	Forma dell'aggregato grosso	4.4	La frequenza di prova si applica all'aggregato costituito da particelle rotte o frantumate. La frequenza di prova per la ghiaia arrotondata dipende dalla provenienza e può essere ridotta	EN 933-3 EN 933-4	1 al mese
3	Percentuale di particelle frantumate	4.5	Soltanto per la ghiaia grossa	EN 933-5	1 al mese
4	Contenuto di fini	4.6		EN 933-1	1 alla settimana
5	Qualità dei fini	4.7		EN 933-8 EN 933-9	1 alla settimana
6	Resistenza alla frammentazione	5.2		EN 1097-2	2 all'anno
7	Resistenza all'usura	5.3		EN 1097-1	2 all'anno
8	Massa volumica delle particelle	5.4	Il metodo di prova dipende dalle dimensioni granulometriche dell'aggregato	EN 1097-6:2000, punto 7, 8 o 9	1 all'anno
9	Assorbimento di acqua	5.5	Il metodo di prova dipende dalle dimensioni granulometriche dell'aggregato	EN 1097-6:2000, punto 7, 8 o 9	1 all'anno
10	Componenti che alterano la velocità di presa e di indurimento delle miscele legate con leganti idraulici: - idrossido di sodio - acido fulvico (se fallisce l'idrossido di sodio) - prove di resistenza comparata - tempo d'indurimento	6.4.1		EN 1744-1:1998, 15.1 EN 1744-1:1998, 15.2 EN 1744-1:1998, 15.3	1 all'anno 1 all'anno 1 all'anno
11	Resistenza al gelo/disgelo	7.3		EN 1097-6 EN 1367-1 EN 1367-2	1 ogni 2 anni
12	Sostanze pericolose <sup>a)</sup> In particolare: Rilascio di metalli pesanti	C.3.3 C.4	<sup>a)</sup>	<sup>a)</sup>	Se necessario e in caso di dubbio

a) Salvo diversa indicazione, solo se necessario ai fini della marcatura CE (vedere appendice ZA).

Tabella 20: Frequenze minime di prova per le proprietà generali.

Se il valore misurato si avvicina al limite specificato, potrebbe essere necessario provvedere ad aumentare la frequenza dei campionamenti e delle prove, a garanzia della conformità del prodotto.

### 2.4.3. Norma UNI EN 13043

#### “Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico”

La norma in oggetto specifica le proprietà di aggregati e filler ottenuti da materiali naturali o riciclati, per impiego in miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade e altre aree soggette a traffico. Tale norma non si applica all’impiego di conglomerati bituminosi fresati, per i quali si fa rimando alle norme:

- UNI EN 13108-8, che specifica i requisiti per la classificazione e la descrizione del fresato come materiale costituente di miscele bituminose;
- UNI/TS 11688, che definisce le modalità di gestione e i requisiti minimi per il corretto impiego del conglomerato bituminoso di recupero nelle costruzioni stradali in conformità alle prescrizioni in materia di tutela ambientale, assicurando le prestazioni tecniche dei prodotti ottenuti.

La granulometria deve essere determinata in conformità alla EN 933-1:1997 e deve soddisfare i seguenti requisiti:

Aggregato	Dimensione mm	Percentuale passante in massa					Categoria G
		2 D	1,4 D <sup>a)</sup>	D <sup>b)</sup>	d	d/2 <sup>a)</sup>	
Grosso	D > 2	100	100	da 90 a 99	da 0 a 10	da 0 a 2	G <sub>C</sub> 90/10
		100	da 98 a 100	da 90 a 99	da 0 a 15	da 0 a 5	G <sub>C</sub> 90/15
		100	da 98 a 100	da 90 a 99	da 0 a 20	da 0 a 5	G <sub>C</sub> 90/20
		100	da 98 a 100	da 85 a 99 <sup>c)</sup>	da 0 a 15	da 0 a 2	G <sub>C</sub> 85/15
		100	da 98 a 100	da 85 a 99 <sup>c)</sup>	da 0 a 20	da 0 a 5	G <sub>C</sub> 85/20
		100	da 98 a 100	da 85 a 99 <sup>c)</sup>	da 0 a 35	da 0 a 5	G <sub>C</sub> 85/35
Fine	D ≤ 2	100	-	da 85 a 99	-	-	G <sub>F</sub> 85
In frazione unica	D ≤ 45 e d = 0	100	da 98 a 100	da 90 a 99	-	-	G <sub>A</sub> 90
		100	da 98 a 100	da 85 a 99	-	-	G <sub>A</sub> 85

a) Qualora gli stacci calcolati come 1,4 D e d/2 non siano esattamente corrispondenti ai numeri indicati nella serie ISO 565:1990,R20, deve essere adottata la dimensione dello staccio successiva più vicina.  
b) Se la percentuale trattenuta su D è <1% in massa, il produttore deve documentare e dichiarare la granulometria tipica includendo gli stacci D, d, d/2 e gli stacci del gruppo di base più il gruppo 1 o del gruppo di base più gli stacci del gruppo 2 compresi tra d e D.  
c) Per gli aggregati grossi di dimensione singola d/D, dove D/d < 2, delle categorie G<sub>C</sub>85/15, G<sub>C</sub>85/20 e G<sub>C</sub>85/35, il valore della percentuale passante in massa su D può essere diminuito del 5% in base alla particolare applicazione o impiego finale.

Tabella 21: Requisiti generali di granulometria in riferimento alla tipologia di aggregato.

Il produttore deve documentare e dichiarare la classificazione tipica di ciascun aggregato fine o in frazione unica con D ≤ 8 mm, rispetto alle tolleranze stabilite dalla presente norma.

Dimensione staccio mm	D	D/2	0,063	Categoria G <sub>TC</sub>
Tolleranze	±5 <sup>a)</sup>	±10	±3 <sup>b)</sup>	G <sub>TC</sub> 10
Percentuale passante in massa	±5 <sup>a)</sup>	±20	±3 <sup>b)</sup>	G <sub>TC</sub> 20
	Nessun requisito	Nessun requisito	Nessun requisito	G <sub>TC</sub> NR

a) Eccetto le categorie G<sub>A</sub>90 e G<sub>A</sub>85, le tolleranze di ±5 sono ulteriormente limitate dai requisiti della percentuale passante D nel prospetto 2 (G<sub>A</sub>90, G<sub>A</sub>85).  
b) Eccetto la categoria G<sub>F</sub> (contenuto di polveri fini ≤3%).

Tabella 22: Tolleranze sulla classificazione tipica dichiarate per l'aggregato fine e in frazione unica con D < 8mm.

La resistenza alla frantumazione dell'aggregato grosso deve essere determinata sulla base del coefficiente Los Angeles, il cui valore deve essere dichiarato nella scheda di marcatura CE, in conformità con la particolare applicazione finale.

**Categorie per valori massimi di coefficiente Los Angeles**

Coefficiente Los Angeles	Categoria LA
≤15	LA <sub>15</sub>
≤20	LA <sub>20</sub>
≤25	LA <sub>25</sub>
≤30	LA <sub>30</sub>
≤40	LA <sub>40</sub>
≤50	LA <sub>50</sub>
>50	LA <sub>dichiarato</sub>
Nessun requisito	LA <sub>NR</sub>

Tabella 23: Categorie per valori massimi di coefficiente di Los Angeles.

La norma stabilisce, inoltre, i requisiti per l'aggregato filler, nello specifico per il filler addizionato (aggregato filler di origine minerale), tra i quali si citano la porosità del filler compattato secco, la solubilità e la reattività in acqua, il contenuto di calce spenta e tutti i requisiti per l'uniformità di produzione.

Le prove devono avere anche qui la seguente frequenza minima:

prospetto B.1 **Frequenze di prova minime per proprietà generiche**

	Proprietà	Punto	Note/riferimenti	Metodo di prova	Frequenza di prova minima
1	Granulometria	4.1.3		EN 933-1:1997	1 alla settimana
2	Contenuto di fini	4.1.4		EN 933-1:1997	1 alla settimana
3	Qualità di fini	4.1.5	Solo quando il contenuto di fini nell'aggregato fine, o nell'aggregato completo 0/D con $D \leq 8$ mm, eccede il valore specificato in 4.1.5	EN 933-9	2 all'anno
4	Forma dell'aggregato grosso	4.1.6	La frequenza di prova si applica all'aggregato frantumato. La frequenza di prova per la ghiaia arrotondata dipende dalla fonte e può essere ridotta	EN 933-3 EN 933-4	1 al mese
5	Percentuale di particelle frantumate e totalmente arrotondate	4.1.7	Solo per aggregato di ghiaia	EN 933-5	1 al mese
6	Spigolosità degli aggregati fini	4.1.8	Solo per aggregato fine	EN 933-6:2001	1 al mese
7	Resistenza alla frammentazione dell'aggregato grosso	4.2.2		EN 1097-2:1998	1 all'anno
8	Resistenza all'usura	4.2.5		EN 1097-1	1 all'anno
9	Massa volumica delle particelle	4.2.7		EN 1097-6:2000	1 ogni 2 anni
10	Assorbimento di acqua Resistenza al gelo e disgelo	4.2.9.1 4.2.9.2		EN 1097-6:2000 EN 1367-1:1999/ EN 1367-2	1 ogni 2 anni
11	Resistenza allo shock termico	4.2.10		EN 1367-5	1 all'anno
12	Affinità ai leganti bituminosi	4.2.11		prEN 12697-11:2000	1 all'anno
13	Composizione chimica	4.3.2		EN 932-3	1 ogni 5 anni
14	Contaminanti leggeri	4.3.3	Aggregato $D > 2$ mm in caso di dubbio	EN 196-2:1994 EN 1744-1:1998,14.2	1 all'anno
15	Sostanze pericolose <sup>a)</sup> In particolare:  Emissione di radioattività Rilascio di metalli pesanti Rilascio di idrocarburi poliaromatici	B.3.3 B.4	a)	a)	Se richiesto e in caso di dubbio

a) Salvo diversa indicazione, solo se necessario ai fini della marcatura CE (vedere appendice ZA).

Tabella 24: Frequenze di prova minime per proprietà generiche.

## 2.5. Prestazioni tecniche del prodotto finito

### 2.5.1. Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018

#### “Norme tecniche per le costruzioni”

Dopo 10 anni dall’emanazione delle Norme Tecniche delle Costruzioni 2008 (NTC 2008) sono state definitivamente emanate le nuove **Norme Tecniche per le Costruzioni** (D.M. 17 gennaio 2018). Esse forniscono i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni da utilizzare nel progetto, nonché le caratteristiche dei materiali e dei prodotti per l’utilizzo nel settore delle costruzioni.

Nel paragrafo 11.2.9.2 “*Aggregati*” le NTC riportano: “Sono idonei alla produzione di calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, ovvero provenienti da processi di riciclo conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 12620 e, per gli aggregati leggeri, alla norma europea armonizzata UNI EN 13055-1.”

Il sistema di valutazione e verifica della costanza della prestazione, di tali aggregati, ai sensi del Regolamento UE 305/2011, è indicato nella seguente Tabella 25.

Specifica Tecnica Europea armonizzata di riferimento	Uso Previsto	Sistema di Attestazione della Conformità
Aggregati per calcestruzzo UNI EN 12620 e UNI EN 13055-1	Calcestruzzo strutturale	2+

Tabella 25: Norme di riferimento per gli aggregati

La norma prevede l’uso di aggregati grossi provenienti da riciclo, secondo i limiti di cui alla Tab. 11.2.III, a condizione che la miscela di calcestruzzo confezionata con aggregati riciclati, venga preliminarmente qualificata e documentata, nonché accettata in cantiere, le procedure di cui alle presenti norme.

Tab. 11.2.III

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

Tabella 26: Percentuale consentita per gli aggregati di riciclo in relazione alla classe di resistenza del calcestruzzo

Per quanto riguarda i controlli di accettazione degli aggregati da effettuarsi a cura del Direttore dei Lavori, questi sono finalizzati almeno alla verifica delle caratteristiche tecniche riportate nella Tab. 11.2.IV. I metodi di prova da utilizzarsi sono quelli indicati nelle Norme Europee armonizzate citate, in relazione a ciascuna caratteristica.

Tab. 11.2.IV – Controlli di accettazione per aggregati per calcestruzzo strutturale

Caratteristiche tecniche
Descrizione petrografica
Dimensione dell'aggregato (analisi granulometrica e contenuto dei fini)
Indice di appiattimento
Tenore di solfati e zolfo
Dimensione per il filler
Resistenza alla frammentazione/frantumazione (per calcestruzzo Rck $\geq$ C50/60 e aggregato proveniente da riciclo)

Tabella 27: Controlli di accettazione per aggregati per calcestruzzo strutturale

Resta però scoperto il discorso relativo alla parte fine, in quanto la norma prevede l'utilizzo del solo aggregato grossolano, senza alcun accenno ad aggregati di altre dimensioni, rimandando tutto alle prescrizioni di progetto.

*“Il progetto, nelle apposite prescrizioni, potrà fare utile riferimento alle norme UNI 8520-1 e UNI 8520-2, al fine di individuare i limiti di accettabilità delle caratteristiche tecniche degli aggregati”.*

## 2.6. Le eco-etichette

Le eco-etichette nascono dall'esigenza di fornire ai consumatori, pubblici e privati, informazioni chiare, trasparenti e immediate sulle prestazioni ambientali di un prodotto o di un servizio; sono regolamentate dalle norme ISO della serie 14020 e si possono classificare in tre tipologie:

- Etichette Ambientali di tipo I (ISO 14024), assegnate da organismi di parte terza, si basano su criteri sviluppati tenendo conto delle fasi del ciclo di vita del prodotto e fissano dei valori soglia da rispettare (ad esempio il marchio Ecolabel);
- Etichette Ambientali di tipo II (ISO 14021), sono autodichiarazioni ambientali da parte dei produttori o importatori di prodotti, che non necessitano dell'intervento di un organismo indipendente di certificazione e nemmeno di prestazioni minime di riferimento (rientrano in questa categoria di etichette le seguenti: "Riciclabile", "Compostabile", ecc.);
- Etichette Ambientali di tipo III (ISO 14025), riportano dichiarazioni basate su parametri stabiliti e che contengono una quantificazione degli impatti ambientali associati al ciclo di vita del prodotto calcolato attraverso un sistema LCA. Sono sottoposte a un controllo indipendente e presentate in forma chiara e confrontabile. Tra di esse rientrano, ad esempio, le "Dichiarazioni Ambientali di Prodotto" (DAP o EPD).

Tra le etichette ambientali di tipo I la più famosa è rappresentata dall'**Ecolabel UE**, marchio di qualità ecologica dell'Unione Europea, istituito nel 1992 e attualmente disciplinato dal Regolamento n. 66/2010, che certifica prodotti e servizi con elevate qualità prestazionali e ambientali. Il marchio è in vigore nei 28 paesi dell'Unione Europea e nei paesi appartenenti allo Spazio Economico Europeo (SEE) e garantisce che i prodotti abbiano un minor impatto ambientale e la stessa, o superiore, qualità rispetto ai prodotti convenzionali presenti sul mercato.

Per avere la certificazione Ecolabel vengono considerati i diversi aspetti ambientali che si generano durante la produzione dei prodotti, il loro uso e il loro fine vita. I requisiti considerati hanno lo scopo di ridurre il consumo energetico e idrico, le emissioni atmosferiche, l'utilizzo di sostanze chimiche, la produzione di rifiuti ma ha anche l'obiettivo di considerare le possibilità di recupero/riutilizzo.

Attualmente sono stati forniti i criteri per 29 gruppi di prodotto di beni e 2 gruppi di prodotto di servizi.

I produttori interessati alla concessione del marchio devono farne richiesta alla Sezione Ecolabel Italia, che a sua volta si avvale del supporto dell'ISPRA per lo svolgimento della pratica.

Per la richiesta e il mantenimento della licenza d'uso del marchio, l'azienda deve sostenere un costo annuale proporzionale al fatturato maturato; tale costo appare modesto se confrontato con i vantaggi che si ottengono dall'acquisto (MATTM, 2017):

- consente all'azienda di essere più competitiva nel mercato "green", che è in continua espansione;
- costituisce un elemento di preferenza nella formulazione delle graduatorie per l'assegnazione di contributi, agevolazioni e finanziamenti in ambito ambientale;
- permette l'acquisizione di agevolazioni nell'ambito delle procedure d'acquisto per le pubbliche amministrazioni (Art. 93 D.Lgs. 50/2016).

La **Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD)** è, invece, un'etichetta ambientale di tipo III, ed è un documento con il quale si comunicano informazioni oggettive, confrontabili e credibili relative alla prestazione ambientale di prodotti e servizi. Tali informazioni hanno carattere esclusivamente informativo, non prevedono modalità di valutazione, criteri di preferibilità o livelli minimi che la prestazione ambientale debba rispettare.

La EPD ha le seguenti caratteristiche:

- utilizza la Valutazione del Ciclo di Vita (LCA - Life Cycle Assessment) come metodologia per l'identificazione e la quantificazione degli impatti ambientali. L'applicazione della LCA deve essere in accordo con quanto previsto dalle norme della serie ISO 14040, in modo da garantire l'oggettività delle informazioni contenute nella dichiarazione;
- è applicabile a tutti i prodotti o servizi, indipendentemente dal loro uso o posizionamento nella catena produttiva. Viene, inoltre, effettuata una classificazione in gruppi ben definiti in modo da poter effettuare confronti tra prodotti o servizi funzionalmente equivalenti;
- viene verificata e convalidata da un organismo indipendente che garantisce la credibilità e veridicità delle informazioni contenute nello studio LCA e nella dichiarazione.

La EPD è uno strumento di dichiarazione in cui vengono riportate le prestazioni ambientali del prodotto e, pertanto, non deve soddisfare dei criteri ecologici, come nel caso dell'Ecolabel.

Per consentire il confronto tra le EPD di prodotti diversi appartenenti allo stesso gruppo vengono definite le Product Category Rules (PCR), stabilite dallo standard EN 15804, che individuano i criteri specifici per gruppi di prodotti omogenei per unità funzionale.

Attualmente esistono vari programmi di EPD sia in Europa che in altre parti del mondo. Quello più diffuso in Europa, ed al quale fanno riferimento le imprese italiane, è quello governato da un "organismo competente", il SEMC (Swedish Environmental Management Council), originariamente incaricato dal governo svedese per la gestione del programma.

Le etichette ambientali sono riconosciute dal PAN GPP come strumenti conoscitivi che garantiscono le informazioni sul ciclo di vita, sulla base delle quali è possibile individuare le caratteristiche ecologiche dei beni e servizi acquistati.

### 2.6.1. Life Cycle Assessment (LCA)

Il Life Cycle Assessment è un metodo che valuta le interazioni che un prodotto ha con l'ambiente, rispetto al suo intero ciclo di vita che include le fasi di pre-produzione, produzione, distribuzione, uso, riciclaggio e dismissione finale. Rappresenta un supporto indispensabile allo sviluppo degli schemi di Etichettatura Ambientale ed è uno degli strumenti fondamentali per l'attuazione di una politica integrata dei prodotti. Delinea una strategia di miglioramento delle prestazioni ambientali dei prodotti finalizzata ad un'ideologia di mercato più sostenibile e regolamentata, nello specifico, dalle norme ISO della serie 14040.

Le norme ISO 14000 identificano una serie di standard internazionali relativi alla gestione ambientale delle organizzazioni. I lavori di redazione di queste norme, di competenza del Comitato Tecnico internazionale ISO/TC 207 "Environmental Management" dell'Organizzazione Internazionale di Normazione (ISO), iniziati nel 1993, hanno portato alla definizione di una serie di norme finalizzate alla gestione ambientale, che riguardano i criteri e requisiti per i sistemi di audit sia per le aziende che per la gestione ambientale dei prodotti.

L’LCA, attraverso l’analisi dettagliata di ogni aspetto relativo ad un prodotto, permette di ottenere numerosi vantaggi: evidenziare e localizzare le opportunità per ridurre gli impatti ambientali collegati alla vita del prodotto, supportare decisioni interne in merito a interventi sui processi, paragonare tra loro prodotti con la medesima funzione e migliorare le relazioni con le istituzioni.

Il termine “ciclo di vita” si riferisce al fatto che occorre eseguire un’indagine complessiva del problema, prendendo in considerazione tutto il ciclo di vita del prodotto: dalla produzione di materie prime, alla fabbricazione, distribuzione, uso e smaltimento, compreso il trasporto e il consumo di energia. L’insieme di queste macrofasi viene comunemente detto percorso “from cradle to grave”, ossia “dalla culla alla tomba”.

La quantificazione dei carichi ambientali di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche e di tutte le emissioni (gassose, liquide e solide) di rifiuti e di altri rilasci. L’LCA valuta anche i “risparmi ambientali” legati ai processi di recupero di materia ed energia dai rifiuti.

In base al tipo, alla quantità di dati a disposizione e allo scopo per il quale si decide di effettuare lo studio, si possono distinguere varie tipologie di LCA (Figura 15).

In quest’ultimo caso si delineano i seguenti studi di LCA (Cappellaro, et al., 2011):

- “from cradle to gate” (dalla culla al cancello): lo studio inizia con l’approvvigionamento delle materie prime e delle fonti di energia e si conclude con l’immissione del prodotto finito sul mercato, escludendo quindi la fase di utilizzo e di smaltimento dello stesso;
- “from gate to gate” (dal cancello al cancello): lo studio analizza unicamente la realtà aziendale, quindi comprende le fasi di fabbricazione e assemblaggio del prodotto.

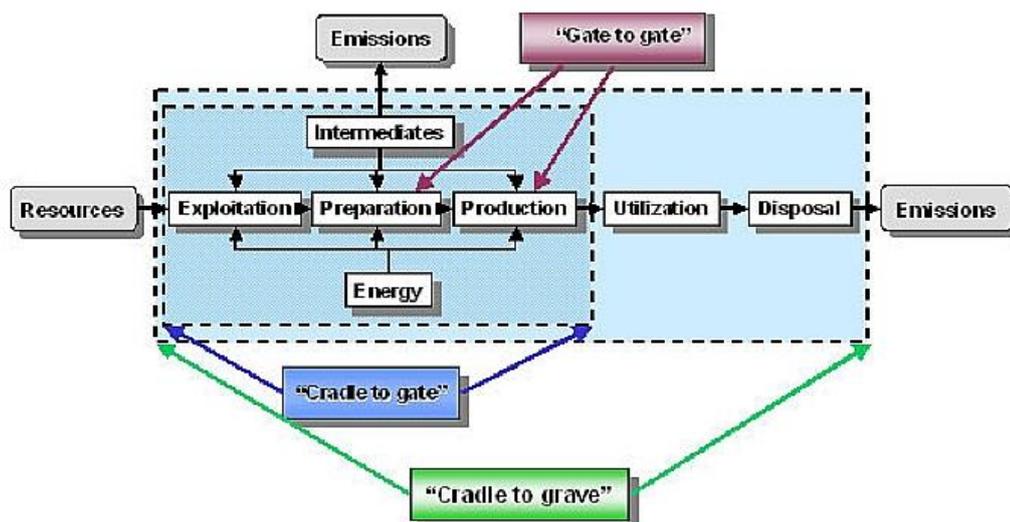


Figura 15: Schema dei confini di sistemi di una LCA (Cappellaro, et al., 2011)

L'elaborazione di una LCA si articola, principalmente, in quattro fasi, il cui schema è riportato in Figura 16:

1. definizione degli obiettivi e campo di applicazione, in cui vengono definiti gli obiettivi dello studio, l'unità funzionale (misura o quantità di prodotto presa come riferimento per l'analisi dell'impatto) e i confini del sistema (ampiezza del sistema considerato);
2. inventario, in cui vengono quantificati gli input e le relative emissioni, per ciascuna fase del ciclo di vita (LCI);
3. valutazione degli impatti, in cui vengono classificate le informazioni ottenute nella fase precedente;
4. interpretazione dei risultati.



Figura 16: Schema sintetico della metodologia LCA  
(Cappellaro, et al., 2011)

## 3. Analisi delle linee guida italiane ed europee

### 3.1. Linee guida in Italia

Al fine di valutare le indicazioni più efficaci per il recupero dei rifiuti da C&D sono state analizzate alcune delle linee guida prodotte a livello regionale e provinciale in Italia. In particolare, a titolo di esempio:

- *Bologna, 2004* con Accordo di Programma approvato con Delibera n.70 del 24 Luglio 2001 e modificato con Delibera Consiliare n.90 del 23 Luglio 2002;
- *Trento, 2011* con Deliberazione n. 1333 del 24 Giugno 2011;
- *Bolzano, 2016* con Delibera Giunta Provinciale n. 1030 del 27 Settembre 2016 e recente aggiornamento con Delibera Giunta Provinciale n. 398 dell' 11 Aprile 2017;
- *Veneto, 2012* con DGRV n. 1773 del 28 Agosto 2012 e DGRV n.1060 del 24 Giugno 2014;
- *Lazio, 2012* con DGRL n. 34 del 26 Gennaio 2012;
- *Liguria, 2015* con DGR n. 734 del 20 Giugno 2015.

È stato, inoltre, analizzato il documento redatto dal Sistema Nazionale della Protezione dell'Ambiente (SNPA) nel 2016 che, oltre ad aver raccolto le linee-guida elaborate a livello provinciale e regionale mediante un documento condiviso, mira a definire strumenti univoci per la gestione di rifiuti derivanti dalle attività di costruzione e demolizione, al fine di produrre materiali riciclati con caratteristiche prestazionali adeguate.

Nel paragrafo 3.1.1 si riporta una sintesi dei diversi documenti esaminati, ponendo particolare attenzione alle linee guida della Provincia autonome di Trento ritenute di maggiore interesse.

Si rimanda l'analisi specifica delle singole linee guida agli Allegati del Report.

#### 3.1.1. Corretta gestione dei rifiuti C&D a fronte dell'analisi delle linee guida nazionali

Le linee guida consultate si propongono di fornire un insieme di indicazioni di carattere operativo-gestionale relative sia alla produzione che alla gestione dei rifiuti, nell'ambito delle attività di costruzione e demolizione (dal luogo di produzione - cantiere, sino ai siti di trattamento in cui questi vengono recuperati e trasformati in nuovi prodotti).

L'obiettivo che si pongono le linee guida è quello di ridurre la produzione di rifiuti, di ottimizzare e massimizzarne il recupero, riducendo, di conseguenza, i quantitativi destinati allo smaltimento finale in discarica e gli impatti ambientali complessivi.

Viene, quindi, di seguito presentato un elenco delle principali indicazioni promosse a livello territoriale.

- **Demolizione selettiva**

Nel caso di attività di demolizione, la soluzione più efficace che assume maggior risalto dalla lettura delle linee guida analizzate è l'incentivazione della cosiddetta "*demolizione selettiva*",

ovvero la separazione all'origine delle diverse tipologie di rifiuti da avviare a idonei impianti di trattamento.

Per ottenere il massimo dell'efficienza, la demolizione andrebbe eseguita ripercorrendo in ordine inverso il processo che è stato realizzato al momento della costruzione dell'edificio.

Durante questo processo e prima di procedere alla demolizione delle strutture murarie è necessario provvedere alla separazione delle seguenti frazioni:

- materiali e componenti pericolosi: quali, ad esempio, materiali contenenti amianto, interruttori contenenti PCB;
- componenti riusabili: coppi, tegole, travi, elementi inferriate e parapetti, serramenti, che possono essere "smontati" in modo modulare e che possono essere riadattati ad un nuovo impiego senza modificarne le caratteristiche geometriche. Questo, secondo il criterio di "prestazione residua" tramite verifica delle proprietà che l'elemento possiede ancora, come specificato nelle linee guida della regione Veneto;
- materiali riciclabili;
- rifiuti non riciclabili: destinati allo smaltimento.

Operando attraverso questi accorgimenti si possono perseguire tre obiettivi fondamentali:

1. favorire la separazione e l'avvio a un recupero più efficiente delle frazioni separate;
2. ridurre, di conseguenza, i quantitativi dei rifiuti prodotti;
3. eliminare le componenti pericolose.

Una demolizione selettiva permette di ottenere rifiuti inerti omogenei, senza la presenza delle eventuali componenti pericolose che devono essere rimosse nelle fasi preliminari.

L'accumulo dei rifiuti C&D dovrebbe, inoltre, essere effettuato per categorie omogenee (es. mattoni, ferro, legno) attribuendo a ciascuna il rispettivo codice EER in modo tale da evitare, per quanto è possibile, cumuli di rifiuti misti che verranno successivamente avviati agli impianti di recupero/smaltimento.

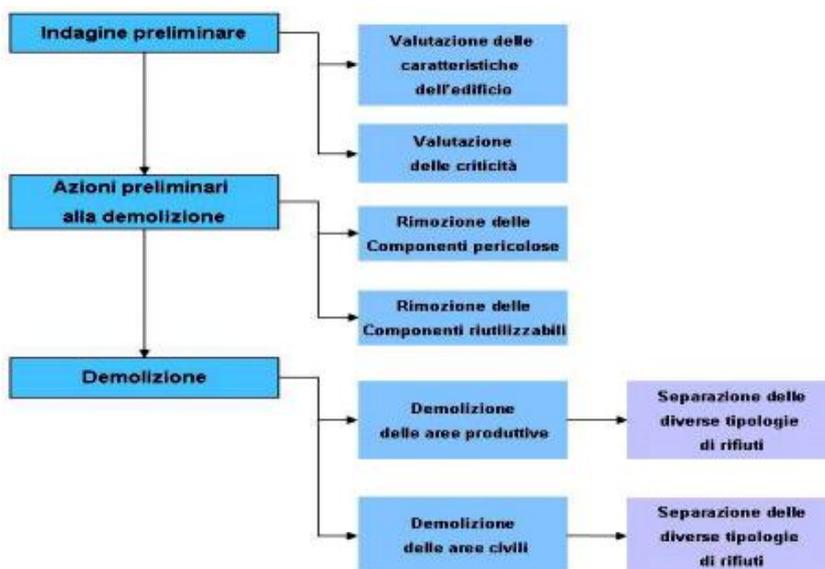


Figura 17: Schema della procedura di demolizione selettiva.

- **Analisi sul rifiuto da parte del produttore e frequenze di campionamento**

Nel documento emanato dalla Regione Veneto, come in quello del SNPA, vengono distinte le modalità con cui devono essere eseguite le analisi sul rifiuto da parte del produttore, sulla base alla tipologia di demolizione adoperata, per la sua corretta classificazione e codifica.

Nel caso di demolizione eseguita con **modalità selettiva** di *fabbricati civili, commerciali o porzioni dei fabbricati industriali/artigianali non destinati ad uso produttivo*, trattandosi di rifiuti che si possono considerare omogenei e provenienti da edifici che non presentano criticità particolari, la classificazione può essere effettuata dal produttore tenendo conto degli elementi conoscitivi e senza necessità di effettuazione di analisi per l'attribuzione del codice EER (anche se a specchio). È necessario, però, presentare una dichiarazione con cui il produttore/detentore si assume la responsabilità di affermare l'assenza di materiali pericolosi.

Al contrario, qualora non sia possibile attestare preventivamente che non ricorra alcuna criticità oppure i materiali siano provenienti dalla demolizione selettiva di *fabbricati artigianali o industriali*, gli eventuali rifiuti classificati con codice a specchio dovranno essere sottoposti a specifiche analisi da effettuare su una massa di rifiuti sufficientemente significativa ai fini della rappresentatività del quantitativo che verrà prodotto.

Nel caso di demolizione eseguita con **modalità non selettiva**, trattandosi di rifiuti che non si possono considerare omogenei, la totalità dei rifiuti prodotti dovrà essere caratterizzata analiticamente e il campionamento andrà eseguito in conformità alla normativa tecnica di settore.

Il profilo chimico minimo richiesto deve essere valutato in funzione della tipologia dell'edificio e potrebbe prevedere delle analisi sui seguenti parametri: pH, piombo, nichel, rame, cromo totale, cromo VI, mercurio, arsenico, cadmio, zinco, cianuri, idrocarburi pesanti C>12, IPA, PCB. Deve essere, altresì, dimostrato che il rifiuto da costruzione e demolizione sia privo di amianto.

- **Impianti di recupero dei rifiuti da C&D**

È possibile distinguere due macrocategorie di impianti:

- 1) **Impianti fissi**

Si caratterizzano per una maggiore complessità, legata alla contemporanea presenza di diversi sistemi di macinazione in grado di produrre granulometrie diverse di materiale, garantendo così un migliore livello qualitativo dell'aggregato riciclato in uscita.

- 2) **Impianti mobili**

Rappresentano una struttura tecnologica unica o, in casi particolari, un insieme di strutture tecnologiche, che possono essere trasportate ed installate in un sito, con la peculiarità di operare direttamente in loco, evitando, quindi, la movimentazione dei materiali di risulta o da demolizione. Il loro utilizzo è motivato essenzialmente dal costo di acquisto, inferiore a quello degli impianti fissi e dalla possibilità di abbattere le spese di trasporto nel caso in cui sia necessario frantumare grosse quantità di materiale da reimpiegare in loco.

A fronte però di una elevata trasportabilità ed autonomia energetica, tali impianti

consentono, a differenza degli impianti fissi, una limitata separazione delle frazioni di rifiuti e quindi una minor qualità dell'aggregato riciclato.

- **Procedure di accettazione del rifiuto e controlli in entrata**

Per quanto riguarda le procedure di accettazione dei rifiuti negli impianti di riciclaggio le linee guida della Regione Veneto sono quelle che forniscono un'argomentazione più approfondita. Queste procedure, al momento del conferimento, devono essere effettuate dal responsabile dei controlli e devono prevedere i seguenti contenuti minimi:

- Controlli di tipo *amministrativo*: presa visione della documentazione necessaria al conferimento dei rifiuti (modulo di attestazione demolizione selettiva se presente, certificazioni dei controlli analitici se previsti e documenti relativi al trasportatore);
- Controlli *specifici* di corretta corrispondenza del codice EER ai codici autorizzati;
- Controlli *qualitativi*: di tipo visivo dell'effettiva corrispondenza della tipologia di rifiuto rispetto a quanto indicato nel formulario di indicazione dei rifiuti (FIR). Per cui, in fase di scarico, va verificata l'assenza di amianto e di altri materiali non conformi nei rifiuti da C&D. Qualora in fase di scarico si rilevassero delle non conformità, si dovranno interrompere le operazioni e si provvederà a ricaricare sul mezzo quanto già scaricato.

- **Gestione dei prodotti ottenuti dal recupero**

I materiali provenienti da processi di recupero (aggregati riciclati) devono essere sottoposti a prove che ne garantiscano la compatibilità *ambientale* dell'uso e che ne valutino *prestazioni* e caratteristiche al fine di verificarne gli utilizzi più idonei.

Per garantire un costante ed ottimale standard di qualità occorre prevedere prove di caratterizzazione dei materiali che rispettino le indicazioni contenute nell'atto di autorizzazione dell'impianto.

L'esame per la verifica della **compatibilità ambientale** deve garantire una tutela durevole dei beni suolo ed acqua.

La valutazione sulla compatibilità ambientale dell'aggregato riciclato deve essere verificata sul prodotto finito, anche quando risultante dalla miscelazione con altri materiali.

Sulla base del D.M. 05/02/1998 sarà quindi necessario effettuare il test di cessione sul materiale prodotto secondo le indicazioni dell'Allegato 3. Gli aggregati riciclati, che superano i limiti stabiliti, devono essere smaltiti come rifiuto speciale.

Dall'analisi delle linee guida della Provincia autonoma di Bolzano è evidente come la caratterizzazione chimica vari a seconda della tipologia di materiale prodotto, ovvero:

- il granulato d'asfalto necessita dell'analisi dell'eluato solo nel caso in cui il suo utilizzo ne preveda l'impiego allo stato sciolto e non "legato";
- il granulato da calcestruzzo riciclato e misto (con un massimo del 15% di conglomerati bituminosi) prevede, indipendentemente dal tipo di recupero, l'esecuzione del test di cessione e un'analisi delle frazioni presenti.

L'analisi delle **caratteristiche prestazionali** si rende necessaria poiché i prodotti derivanti dal recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione, per essere commercializzati, devono

riportare obbligatoriamente la marcatura CE. Il livello di attestazione di conformità deve rispondere ai contenuti del “sistema 4” (se per impiego “non strutturale”) o del “sistema 2+” (se per impiego portante o strutturale) in funzione del tipo di uso previsto e delle specifiche norme di riferimento applicabili (UNI EN 12620, 13242, 13043).

Ovviamente, come emerge anche dal documento del SNPA, i controlli in fase esecutiva delle caratteristiche tecniche e chimiche del materiale da collocare in opera, devono coincidere con i controlli periodici in produzione che il produttore deve effettuare secondo quanto previsto dalle Norme armonizzate e dalla specifica autorizzazione dell’impianto di produzione/recupero.

### 3.1.2. Linee guida della Provincia autonoma di Trento

(Deliberazione n. 1333 del 24 Giugno 2011)

La Provincia autonoma di Trento ha prodotto nel 2011 delle linee guida, suddivise in due documenti riguardanti rispettivamente la gestione di impianti di recupero e il trattamento dei rifiuti da recuperare.

Il primo documento *“Linee guida per la corretta gestione di un impianto di recupero e trattamento dei rifiuti e per la produzione di materiali riciclati da impiegare nelle costruzioni”* tratta temi quali:

- riferimenti ai documenti che il produttore deve predisporre a supporto dell’attività di produzione per assicurare la continua conformità dei requisiti così come previsto dalla Direttiva “Prodotti da Costruzione” (Direttiva europea 89/106/CEE del 21 Dicembre 1988 – G.U.C.E 11 Febbraio 1989 L40 e G.U.C.E 30 Agosto 1993 L220);
- caratteristiche che un impianto di recupero deve avere in conformità alle norme ambientali, con una descrizione tecnica delle principali tecnologie disponibili;
- caratteristiche dei rifiuti utilizzati e dei prodotti ottenuti con i relativi riferimenti normativi alla frequenza e tipologia dei controlli.

Nel secondo documento *“Norme tecniche e ambientali per la produzione dei materiali riciclati e posa nella costruzione e manutenzione di opere edili, stradali e recuperi ambientali”*, vengono, invece, riportati (a differenza delle altre linee guida precedenti) i principi fondamentali di impiego dei prodotti riciclati nel settore delle costruzioni, rispetto ai possibili utilizzi all’interno delle opere stradali, definendo le relative caratteristiche tecniche e ambientali.

Vengono considerati prodotti riciclati derivanti da attività di recupero non solo i rifiuti provenienti da costruzione e demolizione (EER 17), ma anche i rifiuti inerti provenienti da diverse processi produttivi artigianali/industriali (scorie di acciaierie, loppe d’altoforno, scarti del vetro e del cristallo, sabbie di fonderia, fanghi e polveri).

Le prescrizioni tecniche richiamate definiscono le caratteristiche fisiche, geometriche, geotecniche e chimiche dei prodotti riciclati in funzione della coesione e della loro modalità di produzione, in particolare:

- Prodotti riciclati non legati: come sottofondi, riempimenti e colmate, fondazioni stradali e corpo di rilevati;
- Prodotti riciclati legati con legante idraulico (cemento, calce) o bituminoso (bitume, emulsione bituminosa);
- Opere di stabilizzazione in situ: utilizzo di tecnologie basate sul miglioramento delle prestazioni dei materiali già presenti nel cantiere come, ad esempio, terreni naturali con insufficienti caratteristiche di portanza o pavimentazioni in conglomerato bituminoso degradate.

### 3.1.3. Considerazioni e strategie operative per la promozione del recupero e dell'utilizzo dei materiali riciclati

Si presentano di seguito alcune azioni per incrementare la qualità e l'utilizzo dei materiali riciclati provenienti da processi di trattamento di rifiuti da costruzione e demolizione:

- Dal punto di vista **gestionale**:
  - adozione di demolizione selettiva e riduzione delle analisi richieste sui rifiuti prodotti dalla demolizione di edifici civili e micro ristrutturazioni, previa verifica dell'assenza di componenti pericolose;
  - impianti di recupero: standard elevati sui trattamenti da adottare e sulle relative prestazioni; la scelta tra gli impianti fissi e mobili dovrebbe tenere in considerazione la qualità degli aggregati riciclati prodotti, la percentuale di recupero raggiungibile, e gli impatti ambientali generati dall'utilizzo degli impianti stessi.
- Dal punto di vista **normativo** e degli appalti pubblici:
  - Analisi e tipologie di recupero: sviluppare una metodologia di analisi in base alla valutazione dell'impiego più idonea dal punto di vista prestazionale e ambientale basata sull'Analisi di Rischio; al tempo stesso, concordare con gli Enti un test di cessione specifico per ogni applicazione che tenga in considerazione le condizioni reali di utilizzo;
  - aggiornamento degli strumenti tecnici (Capitolati Speciali d'Appalto).
- Dal punto di vista **economico**:
  - Individuare politiche e strategie adeguate per aumentare l'utilizzo e la competitività, sul mercato, degli aggregati riciclati in alternativa a quelli naturali;
  - Definizione di incentivi a favore delle imprese che utilizzano AR e proponenti dell'intervento.
- Dal punto di vista **conoscitivo**:
  - Aumentare le attività di formazione rivolte a imprese, liberi professionisti e PA sulle caratteristiche prestazionali degli AR.

### 3.2. Linee guida europee

Rispetto alla scala europea è stato analizzato il “Protocollo Europeo per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione” (2016) e i documenti prodotti da alcuni stati membri, di seguito brevemente descritti e riportati in allegato, quali:

- Portogallo, *“Guidelines to Improve Construction and Demolition Waste Management in Portugal”*, 2010;
- Germania, *“Construction and Demolition Waste management in Germany”*, 2015;
- Regno Unito, *“Construction and Demolition Waste management in Germany”*, 2016;
- Paesi nordici, *“End-of-Waste Criteria for Construction & Demolition Waste”*, 2016.

All'interno delle linee guida emanate dal **Portogallo** il concetto fondamentale trova cardine in una minor produzione di rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) attraverso un'attenta progettazione e costruzione secondo precise azioni, tra cui: utilizzo di materiali prefabbricati aventi dimensioni esatte in modo da ridurre gli scarti, oppure riduzione della produzione di imballaggi mediante la riconsegna degli stessi ai fornitori.

I documenti emanati dalla **Germania** mettono in risalto come, in ambito nazionale, i livelli istituzionali coinvolti nella gestione dei rifiuti siano molteplici e non vi è esclusiva competenza della Federazione. È compito dei singoli Stati federali (Länder) l'elaborazione, per le proprie aree di responsabilità, dei relativi piani di gestione dei rifiuti. In particolare, attraverso schede tecniche dettagliate per ogni singolo materiale componente il rifiuto C&D (calcestruzzo, mattoni, legno, metalli, ecc.), vengono specificati: la descrizione delle caratteristiche del materiale, le destinazioni d'uso dell'aggregato riciclato ottenuto, i trattamenti a cui deve essere sottoposto e altre informazioni, come costi e modalità di smaltimento.

Nel **Regno Unito**, i piani di gestione dei rifiuti sono sviluppati da ciascuno degli organismi governativi presenti in Inghilterra, Galles, Scozia e Irlanda del Nord. Di rilevanza, all'interno del presente documento, è la definizione dei criteri “End of Waste” (2011) che specificano come, al fine di attestare la qualifica di “cessazione di rifiuto”, sia necessario soddisfare determinati requisiti stabiliti dal Protocollo di Qualità. Tale documento identifica le tipologie di rifiuto e tutti i processi atti a individuare l'iter per il loro recupero. In conformità con tale protocollo, l'aggregato potrà essere destinato all'utilizzo per applicazioni legate o non legate per opere di ingegneria civile ed edile, nel rispetto delle specifiche norme di settore.

Si propone, di seguito, una descrizione completa del Protocollo europeo e dei criteri “End of Waste” dei paesi nordici, che sono risultati essere quelli più interessanti.

#### 3.2.1. Protocollo europeo per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione

Il presente Protocollo si inserisce nell'ambito della strategia “costruzioni 2020” dell'UE e della Comunicazione della Commissione Europea sulle “opportunità per migliorare l'efficienza delle risorse nell'edilizia”. Esso fa, inoltre, parte del più recente e ambizioso “Pacchetto sull'economia circolare”, presentato dalla Commissione europea, che contiene la rivisitazione di Direttive in materia di rifiuti al fine di stimolare la transizione dell'Europa verso

un'economia circolare e aumentare così la competitività globale, promuovere la crescita economica sostenibile e creare nuova occupazione.

Le azioni proposte contribuiranno a raggiungere l'obiettivo della direttiva quadro sui rifiuti (2008/98/CE) che punta al 70% di riciclo dei rifiuti C&D entro il 2020, chiudendo il cerchio del ciclo di vita dei prodotti con benefici sia per l'ambiente che per l'economia, quali:

- l'incremento della domanda di materiali riciclati provenienti dal recupero di rifiuti C&D;
- la promozione di (nuove) attività imprenditoriali e (nuovi) soggetti nel settore delle infrastrutture per la gestione dei rifiuti;
- una maggiore cooperazione lungo la catena del valore dei rifiuti C&D;
- i progressi per il raggiungimento degli obiettivi in materia di rifiuti C&D;
- i progressi verso mercati UE armonizzati per i materiali riciclati C&D (ove opportuno);
- la generazione di statistiche affidabili sui rifiuti C&D in tutta l'UE;
- la riduzione degli impatti ambientali e il contributo all'uso efficiente delle risorse.

L'obiettivo generale del Protocollo risiede nell'aumentare la fiducia nel processo di gestione dei rifiuti C&D e nella qualità dei materiali riciclati prodotti da tali rifiuti. Ciò sarà possibile mediante:

- una migliore identificazione, separazione alla fonte e raccolta dei rifiuti;
- una migliore logistica dei rifiuti;
- un miglior trattamento dei rifiuti;
- la gestione della qualità;
- condizioni politiche e condizioni quadro adeguate.

Per la fase iniziale di **identificazione dei rifiuti**, il Protocollo suggerisce di ricorrere alle verifiche di pre-demolizione selettiva, soprattutto nel caso di edifici di grandi dimensioni, che devono essere effettuate prima di qualsiasi progetto di ristrutturazione o demolizione in modo tale da identificare i rifiuti C&D generati (da riutilizzare o riciclare, oltre che per i rifiuti pericolosi), attuare una corretta decostruzione e specificare le pratiche di smantellamento e demolizione.

Una verifica di pre-demolizione consiste nella raccolta di:

- a) informazioni in merito l'identificazione di tutti i materiali di rifiuto che saranno generati durante la demolizione con l'indicazione della quantità, della qualità e dell'ubicazione nell'edificio o nelle infrastrutture civili. Si devono identificare tutti i materiali e dare una stima della quantità da raccogliere;
- b) informazioni riguardanti:
  - quali materiali devono (obbligatorio) essere separati alla fonte (come ad esempio i rifiuti pericolosi);
  - quali materiali possono/non possono essere riutilizzati o riciclati;
  - come saranno gestiti i rifiuti (non pericolosi e pericolosi) e quali sono le possibilità di riciclaggio.

Sebbene la verifica di pre-demolizione si concentri sui prodotti ("cosa"), occorre preparare un piano di gestione dei rifiuti ("come") orientato ai processi e contenente tutte le informazioni su come verranno eseguite le varie fasi della demolizione, da chi verranno eseguite, quali

materiali saranno raccolti in modo selettivo alla fonte, dove e come saranno trasportati, quale sarà il riciclaggio, il riutilizzo o il trattamento finale e quale il seguito da dare.

Tale piano riguarda anche il modo di affrontare le questioni della sicurezza, nonché il modo di limitare gli impatti ambientali, tra cui la lisciviazione e la polvere.

Un aspetto fondamentale della corretta gestione dei rifiuti consiste nel mantenere i materiali separati e quindi nel migliorare la separazione alla fonte, poiché più efficace è il riciclaggio tanto più elevata sarà la qualità degli aggregati e dei materiali riciclati.

La separazione alla fonte comporta i seguenti tipi di operazione:

- separazione dei rifiuti pericolosi;
- decostruzione (smantellamento compresa la separazione dei flussi secondari e dei materiali di fissaggio);
- separazione dei materiali di fissaggio;
- demolizione strutturale o meccanica.

I flussi principali di rifiuti, tra cui i rifiuti inerti da edifici o infrastrutture civili, devono essere trattati separatamente (ad es. cemento, mattoni, muratura, mattonelle e ceramica).

Per l'utilizzo di materiali riciclati in applicazioni di alta qualità può rendersi necessaria una demolizione più selettiva.

Per quanto riguarda il **trattamento dei rifiuti** viene esposta una vasta gamma di opzioni di trasformazione e trattamento in ordine di priorità, come mostrato nella Figura 18, comunemente note come:

- preparazione per il *riutilizzo*, che comporta una trasformazione minima o nulla del materiale attraverso tutte quelle operazioni di controllo, pulizia e riparazione tramite cui i prodotti diventati rifiuti vengono preparati in modo da poter essere reimpiegati senza altro pretrattamento. In teoria, il riutilizzo offre vantaggi ambientali persino maggiori del riciclaggio poiché non presenta gli impatti ambientali associati al ritrattamento;
- *riciclaggio*, che si traduce in 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, attraverso l'utilizzo ridotto di materie prime e trattamento in appositi impianti.
- *recupero di energia e materiali*, ovvero valutare tutte le possibilità di recupero come combustibile di sostituzione, i cosiddetti combustibili derivati dai rifiuti (CDR). In alcuni paesi (ad es. Austria<sup>1</sup>, Pakistan) esistono vere e proprie linee guida per il trattamento e l'utilizzo di combustibile derivato da rifiuti nell'industria del cemento.

La scelta finale dell'opzione di gestione dei rifiuti varia da un caso all'altro, a seconda degli obblighi regolamentari, nonché delle considerazioni di ordine economico, ambientale, tecnico, di salute pubblica e di altro tipo.



*Figura 18: Gerarchia gestione rifiuti*

Per quanto riguarda la gestione dei **materiali in entrata**, il controllo del processo avviene sia nella fase iniziale di accettazione del materiale in ingresso che durante il processo vero e proprio, attraverso:

- protocolli di ammissione dei rifiuti (controllo delle bolle di spedizione dei rifiuti, dei certificati di accompagnamento del materiale o delle bolle di consegna);
- controllo di produzione in fabbrica: prescrive la frequenza e i tipi di campionamento e di prove al fine di garantire che tutta la produzione dell'UE sia controllata secondo gli stessi standard. Quando il prodotto finale è destinato ad essere permanentemente incorporato in opere di costruzione, dev'essere sottoposto a test in base a un meccanismo armonizzato stabilito nel Regolamento sui prodotti da costruzione (CPR) o per mezzo dello stesso.

Successivamente, è necessario garantire la **qualità del prodotto finito**, attraverso una valutazione delle prestazioni del materiale, corredata da una dichiarazione di prestazioni (DoP) e dal contrassegno della Marcatura CE. Questo permette ai fabbricanti di immettere sul mercato dell'UE prodotti riciclati o riutilizzati e di dichiarare informazioni specifiche circa le loro prestazioni.

### 3.2.2. Criteri End of Waste dei paesi nordici

I Paesi Nordici presentano alcune peculiarità ambientali tra le quali:

- in Danimarca l'acqua ad uso potabile si preleva da falde sotterranee e non subisce trattamenti spinti;
- in Svezia, Finlandia e Norvegia l'acqua ad uso potabile deriva dai laghi i quali supportano ecosistemi fragili, vulnerabili a sostanze organiche ed inorganiche.

L'obiettivo del documento è quindi quello di sviluppare dei criteri di End of Waste con lo scopo di proteggere il suolo, le acque superficiali e di falda da sostanze che potrebbero essere

rilasciate dal materiale da costruzione e demolizione recuperato, includendo valori limite sia in termini di contenuto che di lisciviazione.

La metodica suggerita è simile a quella adottata nella procedura di analisi di rischio (scenario peggiore, ovvero di contatto diretto del materiale con le falde acquifere):



Figura 19: Metodica analoga a quella per l'analisi di rischio

La sorgente può essere di due tipi:

- materiale posto a diretto contatto con il potenziale recettore (ad es. acqua di falda o superficiale) in cui non vi è un percorso lungo quale si possa avere ritenzione delle sostanze rilasciate – peggiore scenario;
- materiale posto in ambiente confinato, coperto, ad una certa distanza dal bersaglio (ad es. pozzo idropotabile).

La metodologia prevede, tramite una procedura inversa (backward), la determinazione delle massime concentrazioni ammissibili in sorgente. Vengono considerati diversi rapporti liquido/solido a seconda dello specifico scenario di utilizzo ed il materiale da recuperare viene sottoposto preventivamente al test di cessione.

I test di cessione previsti sono:

- Test di percolazione in colonna (CEN/TS 14405)
- Test a variazione del pH (CEN/TS 14429 o CEN/TS 14997)
- Test in batch (EN 12457: 1, 2 o 3)

Questo perché alcune delle sostanze, una volta rilasciate dai rifiuti C&D mediante lisciviazione (ad esempio i sali -cloruri e solfati- e alcuni oligoelementi come antimonio e selenio), sono relativamente mobili nel suolo e nelle acque sotterranee e raggiungono il recettore abbastanza rapidamente, mentre altri come ad esempio bario, cadmio, cromo, zinco sono meno mobili e migrano più lentamente attraverso il suolo e le acque sotterranee.

Ciò che emerge è la necessità, quindi, di fissare delle restrizioni e condizioni di utilizzo specifiche nei criteri di End of Waste, andando a valutare e stabilire dei valori limite di lisciviazione coerenti con lo specifico scenario di recupero. Questo perché, valutando unicamente lo scenario di utilizzo peggiore (ovvero ipotizzando uno scenario di applicazione estremo che porta ad una maggior contaminazione ambientale), i valori limite di lisciviazione sarebbero talmente rigidi e stringenti che solo pochi degli aggregati riciclati, se non nessuno, potrebbero soddisfarli.

Infine, vengono fornite anche alcune raccomandazioni sui requisiti dei materiali di input e sul pretrattamento dei rifiuti C&D, raccomandando di porre controlli severi sulla qualità.

I paesi nordici (Danimarca, Finlandia, Norvegia e Svezia) dispongono già di procedure per la demolizione selettiva e lo smistamento in loco di rifiuti che, se adeguatamente ispezionati, probabilmente saranno sufficienti a garantire un buon materiale di qualità.

## 4. Caratteristiche degli aggregati riciclati e stato dell'arte sull'utilizzo nei calcestruzzi e nelle applicazioni stradali e geotecniche

I prodotti riciclati, ottenuti mediante trattamento dei rifiuti da C&D, possono essere impiegati per diverse applicazioni e in diversi settori, ovvero:

- nella produzione e confezionamento di *calcestruzzi* (con percentuali differenti in base alla classe e origine del riciclato e generalmente per calcestruzzi di bassa resistenza);
- nei lavori di costruzione e manutenzione di *opere stradali e ferroviarie*, come ad esempio realizzazione di sottofondi di piazzali civili, industriali, aeroportuali, realizzazione di strati di fondazione delle infrastrutture di trasporto e realizzazione di strati accessori (funzione anticapillare, antigelo e drenante).
- nelle *opere in terra e geotecniche* dell'ingegneria civile, tra cui inseriamo la realizzazione di rilevati, realizzazione di recuperi ambientali, riempimenti e colmate.
- in opere di *allettamento di tubazioni interrato*, dove il materiale viene inserito come riempimento intorno alle tubazioni per semplice gravità, con funzione di protezione da vibrazioni ed assestamenti (sisma), da rischi di rottura accidentale ed isolamento.

Sulla base delle applicazioni principali maggiormente sviluppate, la presente ricerca ha, quindi, esaminato le caratteristiche ambientali e prestazionali degli AR per la produzione ed il confezionamento di calcestruzzi e per la realizzazione di opere stradali/geotecniche (quali sottofondi stradali).

Non vi è dubbio sul fatto che, nel prossimo futuro, il miglioramento delle tecnologie al servizio di questi materiali consentirà maggiori campi di applicazione, sino a giungere ad impieghi più nobili che, per il momento, risultano ancora preclusi.

Il forte interesse per questa tematica è dimostrato dalle numerose esperienze bibliografiche a livello nazionale ed internazionale che sono state sviluppate nel corso degli ultimi 20 anni, sia rispetto alla caratterizzazione dei rifiuti da C&D in vista di possibili attività di smaltimento, che degli aggregati riciclati (AR) destinati alle differenti operazioni di recupero.

## 4.1. Aggregati riciclati

### 4.1.1. Rifiuti da costruzione e demolizione (C&D)

I rifiuti inerti sono definiti dal D.lgs 36/2003 art. 2, come *“rifiuti solidi che non subiscono alcuna trasformazione chimica, fisica o biologica significativa; i rifiuti inerti non si dissolvono, non bruciano né sono soggetti ad altre reazioni chimiche o fisiche, non sono biodegradabili e, in caso di contatto con altre materie, non comportano effetti nocivi tali da provocare inquinamento ambientale o danno alla salute umana...”*. Molti di questi derivano dal settore edile, per tale motivo si tende ad identificarli con i cosiddetti rifiuti da costruzione e demolizione (C&D Waste).

Secondo quanto affermato nell’art. 184 del D.Lgs 152/06 essi fanno parte dei rifiuti speciali non pericolosi e sono per la maggior parte costituiti da: calcestruzzo, laterizi, ceramiche, terre di scavo più altri costituenti minori (Tabella 28).

La loro composizione è estremamente variabile e dipende da diversi fattori tra cui: tecniche costruttive locali, materie prime, sviluppo tecnologico, attività economica e materiali da costruzione localmente disponibili.

Riutilizzabili per la produzione di aggregati riciclati	Da eliminare o ridurre al minimo nel processo di produzione degli aggregati riciclati
Calcestruzzo (precompresso o normale)	Terra vegetale
Cemento e malte varie	Legname
Conglomerati e misti bituminosi	Carta, cellulosa e polistirolo
Mattoni, laterizi, tegole e blocchi	Metalli
Ceramica, piastrelle, rivestimenti	Plastica
Elementi litici	Gesso
	Materiali compositi
	Vernici
	Materiali per isolamento termico ed acustico
	Amianto (smaltimento selettivo preventivo)

Tabella 28: Costituenti principali dei rifiuti da C&D

Si tratta di una tipologia di rifiuto che possiede, di per sé, grandi potenzialità di recupero e di riutilizzo, purtroppo ancora poco recepite e non sfruttate.

In Italia l’impiego di aggregati riciclati è difatti assai limitato, tant’è che viene utilizzato principalmente come riempimento; al contrario, altri Paesi europei sfruttano già questo materiale per scopi ben più nobili come ad esempio il confezionamento di calcestruzzi.

### 4.1.2. Origine degli aggregati di riciclo (AR)

I rifiuti da C&D contengono tipicamente grandi percentuali di materiale lapideo inerte e piccole quantità di altri materiali, quali laterizi, isolanti, materiale plastico, bitume ecc.. Se separati e lavorati in modo appropriato, possono dare origine ad aggregati con buone prestazioni sia fisiche che meccaniche.

Questi rifiuti sono trattati nella nuova stesura del EER (Elenco Europeo dei Rifiuti) nel capitolo 17 – *Rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (compreso il terreno escavato proveniente da siti contaminati)*, di cui riportiamo la lista aggiornata:

*Allegato D – Parte IV D.lgs 152/2006 – Aggiornato al 04/04/2018*

<b>CODICE</b>	<b>DESCRIZIONE</b>
<b>17 01 CEMENTO, MATTONI, MATTONELLE E CERAMICA</b>	
17 01 01	Cemento
17 01 02	Mattoni
17 01 03	Mattonelle e ceramica
17 01 06*	Miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, contenenti sostanze pericolose
17 01 07	Miscugli di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diversi da quelle di cui alla voce 17 01 06
<b>17 02 LEGNO, VETRO E PLASTICA</b>	
17 02 01	Legno
17 02 02	Vetro
17 02 03	Plastica
17 02 04*	Vetro, plastica e legno contenenti sostanze pericolose o da esse contaminati
<b>17 03 MISCELE BITUMINOSE, CATRAME DI CARBONE E PRODOTTI CONTENENTI CATRAME</b>	
17 03 01*	Miscela bituminosa contenenti catrame di carbone
17 03 02	Miscela bituminosa diverse da quelle di cui alla voce 17 03 01
17 03 03*	Catrame di carbone e prodotti contenenti catrame
<b>17 04 METALLI (COMPRESSE LE LORO LEGHE)</b>	
17 04 01	Rame, bronzo, ottone
17 04 02	Alluminio
17 04 03	Piombo
17 04 04	Zinco
17 04 05	Ferro e acciaio
17 04 06	Stagno
17 04 07	Metalli misti
17 04 09*	Rifiuti metallici contaminati da sostanze pericolose

17 04 10*	Cavi impregnati di olio, di catrame di carbone o di altre sostanze pericolose
17 04 11	Cavi, diversi da quelli di cui alla voce 17 04 10
<b>17 05 TERRA (COMPRESA QUELLA ESCAVATA PROVENIENTE DA SITI CONTAMINATI), ROCCE E MATERIALE DI DRAGAGGIO</b>	
17 05 03*	Terra e rocce, contenenti sostanze pericolose
17 05 04	Terra e rocce, diverse da quelle di cui alla voce 17 05 03
17 05 05*	Materiale di dragaggio contenente sostanze pericolose
17 05 06	Materiale di dragaggio, diverso da quello di cui alla voce 17 05 05
17 05 07*	Pietrisco per massicciate ferroviarie, contenente sostanze pericolose
17 05 08	Pietrisco per massicciate ferroviarie, diverso da quello alla voce 17 05 07
<b>17 06 MATERIALI ISOLANTI E MATERIALI DA COSTRUZIONE CONTENENTI AMIANTO</b>	
17 06 01*	Materiali isolanti, contenenti amianto
17 06 03*	Altri materiali isolanti contenenti o costituiti da sostanze pericolose
17 06 04	Materiali isolanti diversi da quelli alle voci 17 06 01 e 17 06 02
17 06 05*	Materiali da costruzione contenenti amianto
<b>17 08 MATERIALI DA COSTRUZIONE A BASE DI GESSO</b>	
17 08 01*	Materiali da costruzione a base di gesso contaminati da sostanze pericolose
17 08 02	Materiali da costruzione a base di gesso diversi da quelli di cui alla voce 17 08 01
<b>17 09 ALTRI RIFIUTI DELL'ATTIVITÀ DI COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE</b>	
17 09 01*	Rifiuti dell'attività di costruzione e demolizione, contenenti mercurio
17 09 02*	Rifiuti dell'attività di costruzione e demolizione, contenenti PCB (ad esempio sigillanti contenenti PCB, pavimentazioni a base di resina contenenti PCB, elementi stagni in vetro e condensatori contenenti PCB)
17 09 03*	Altri rifiuti dell'attività di costruzione e demolizione (compresi rifiuti misti) contenenti sostanze pericolose
17 09 04	Rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03

Tabella 29: Codici EER dei principali materiali C&D

I rifiuti contrassegnati nell'elenco con un asterisco "\*" sono rifiuti pericolosi ai sensi della direttiva 2008/98/CE e ad essi si applicano le disposizioni della medesima direttiva, a condizione che non trovi applicazione l'articolo 20.

Si ritiene che tali rifiuti presentino una o più caratteristiche indicate nell'Allegato III della direttiva 2008/98/CE e, rispetto ai codici da H3 a H8, H10 e H11 del medesimo Allegato, una o più delle seguenti caratteristiche:

- punto di infiammabilità  $\leq 55$  °C;
- una o più sostanze classificate come molto tossiche in concentrazione totale  $\geq 0,1\%$ ;
- una o più sostanze classificate come tossiche in concentrazione totale  $\geq 3\%$ ;
- una o più sostanze classificate come nocive in concentrazione totale  $\geq 25\%$ ;
- una o più sostanze corrosive classificate come R35 in concentrazione totale  $\geq 1\%$ ;
- una o più sostanze corrosive classificate come R34 in concentrazione totale  $\geq 5\%$ ;
- una o più sostanze irritanti classificate come R41 in concentrazione totale  $\geq 10\%$ ;
- una o più sostanze irritanti classificate come R36, R37 e R38 in concentrazione totale  $\geq 20\%$ ;
- una sostanza riconosciuta come cancerogena (categorie 1 o 2) in concentrazione  $\geq 0,1\%$ .

#### 4.1.3. Il processo di demolizione

Di seguito è riportato in forma schematica il processo di demolizione nel suo complesso. Verranno trattati in modo separato i due processi di demolizione principali: la demolizione non selettiva e quella selettiva.

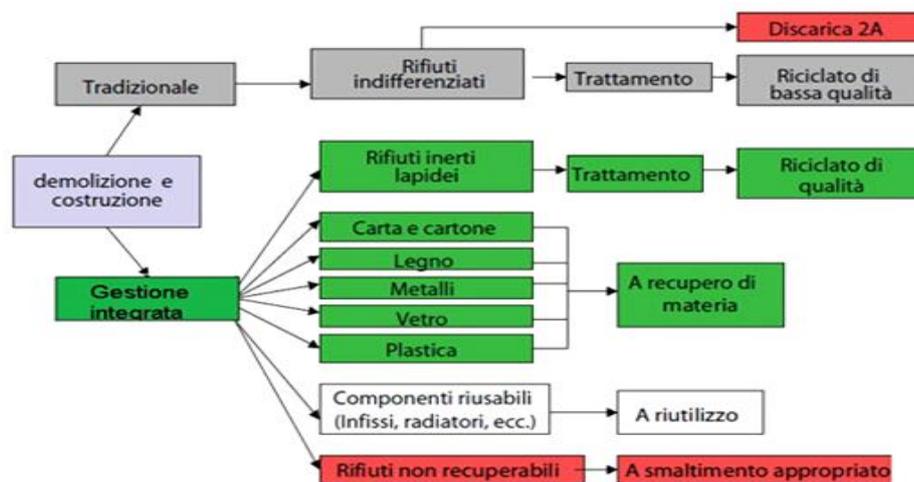


Figura 20: Schema comparativo della gestione dei rifiuti C&D

#### La demolizione non selettiva

La demolizione non selettiva è sintetizzata nella parte alta dello schema in Figura 20. Si può notare come questa generi un flusso di rifiuti indifferenziato che porta imprescindibilmente ad un materiale di bassa qualità. Ovviamente è da precisare il fatto che una minima parte di selezione viene comunque effettuata in fase di demolizione, quale ad esempio lo smontaggio di porte/infissi e sanitari. L'eterogeneità del materiale risulta essere quindi la conseguenza principale di tale tecnica di demolizione e tutto il materiale riciclato ottenuto (che viene

identificato tramite codice EER 17 09 04) sarà destinato o ad un apposito trattamento oppure alla discarica.

Indubbiamente l'accatastamento dei materiali in discarica rappresenta un fallimento della strategia Zero Waste ed appare chiaro come in quest'ottica la gestione integrata dei rifiuti sia, quindi, la soluzione da preferire.

### **La demolizione selettiva**

La demolizione selettiva ha il compito di verificare la presenza di eventuali materiali pericolosi, favorisce lo smontaggio dei componenti riusabili, porta alla demolizione e selezione dei materiali riciclabili ed al contempo allo smaltimento dei rifiuti non riciclabili o riciclabili secondo diversi canali. Gli obiettivi di questa tecnologia sono essenzialmente:

- ottenere frazioni di singoli materiali omogenee adatte al trattamento in appositi impianti di riciclaggio per la valorizzazione dei rifiuti;
- aumentare concretamente il livello di riciclabilità dei rifiuti generati sul cantiere di demolizione;
- migliorare la qualità del materiale ottenibile dal riciclaggio.

Per raggiungere tali obiettivi sono necessari:

1. una progettazione specifica e ponderata dell'intero processo (dove possibile);
2. tempi necessariamente più lunghi rispetto alle procedure standard.

Altro aspetto fondamentale sono i vantaggi che inevitabilmente si ottengono in cantiere attraverso l'impiego di questa metodologia controllata, tra i quali:

- assenza di percussioni (che invece si avrebbero con l'utilizzo del martello demolitore);
- assenza di vibrazioni dannose;
- assenza di polvere;
- rumorosità contenuta;
- limitato affaticamento dell'operatore;
- precisione e rapidità;
- meno invasive e più rispettose dell'ambiente.

Si riportano due esempi di impianti di produzione degli aggregati riciclati: una ottenuta tramite procedure di riciclo più tradizionali ed un'altra ottenuta tramite impianti fissi della tecnologia di selezione "R.O.S.E." (Recupero Omogeneizzato degli Scarti Edilizi).

## Procedura standard per il riciclo dei rifiuti inerti da C&D

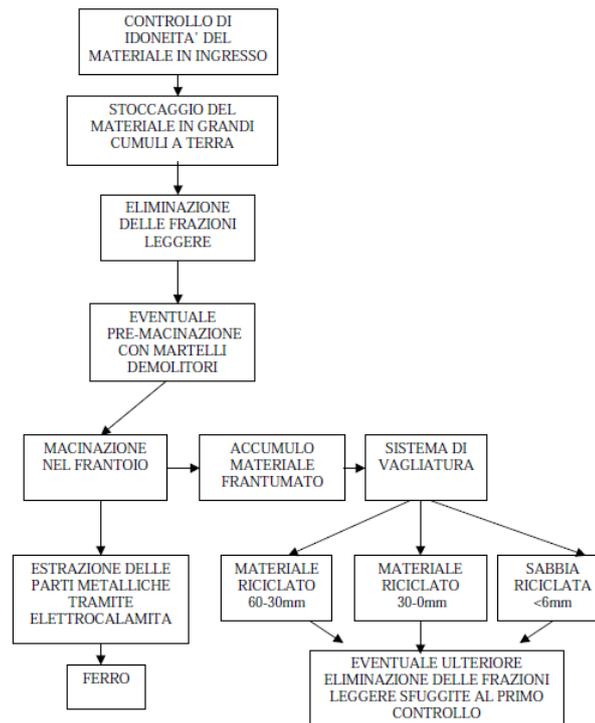


Figura 21: Diagramma di flusso di un tradizionale impianto di riciclaggio.

Durante la demolizione, in genere, viene prodotto un flusso indifferenziato di macerie, costituito da frazioni eterogenee che entra nel centro di riciclaggio dopo un primo controllo per l'idoneità all'accettazione, avvenuto in un'apposita area di stoccaggio a terra.

In presenza di blocchi od elementi particolarmente voluminosi, si procede ad una pre-frantumazione mediante l'impiego di escavatori attrezzati con appositi martelli demolitori. Si passa dunque ad una pre-separazione manuale per l'eliminazione dei materiali quali carta, plastica, legno ed eventualmente ferri ingombranti. Il materiale è poi caricato, con un escavatore, in un frantoio a ganasce, che consente di frantumare i materiali in differenti pezzature, e permette la separazione delle parti metalliche grazie ad un apposito nastro magnetico. In seguito, il materiale frantumato viene separato e raccolto in grandi cumuli alla base dei nastri trasportatori, dove le frazioni più leggere (carta, plastica e legno) vengono eliminate se sfuggite al primo controllo (a causa dei costi non sempre sostenibili, tale procedura raramente viene applicata). Il materiale viene poi prelevato con una pala meccanica e caricato nel vaglio, strutturato per selezionare, generalmente, tre categorie principali di AR quali, a titolo di esemplificativo:

- Materiale riciclato 60-30 mm;
- Materiale riciclato 30-0 mm;
- Sabbia riciclata < 6 mm.

Un'alternativa ai frantoi sopra citati sono i dispositivi di frantumazione mobile. Questi dispositivi sono quelli più utilizzati nel settore per il loro costo inferiore in termini di spesa iniziale, di spese di trasporto e di procedura di autorizzazione. Sono mezzi versatili che possono essere utilizzati in cantieri diversi. Tuttavia, a differenza di un impianto fisso sono caratterizzati da una minore produttività, da una bassa selettività dei materiali e da un basso

controllo di polveri e rumori. Dallo schema in Figura 22 si può notare come il procedimento di riciclo sia il medesimo, con una frantumazione che può essere ripetuta in più fasi.



Figura 22: Schema di flusso degli impianti mobili tradizionali.



Figura 23: Esempi di impianti di frantumazione mobili

- **Tecniche innovative di trattamento selettivo per la produzione di aggregati riciclati: la Tecnologia R.O.S.E.**

Ad oggi, diversi centri di ricerca europei si stanno concentrando sullo sviluppo di tecnologie di trattamento innovative che valorizzino maggiormente la componente inerte dei rifiuti da costruzione e demolizione.

In Italia vi sono alcuni casi di tecnologie di trattamento per la produzione di aggregati riciclati che limitano gli impatti ambientali dovuti ai processi di riciclaggio, come la tecnologia R.O.S.E (acronimo di Recupero Omogeneizzato degli Scarti Edilizi), tecnologicamente all'avanguardia che si presenta con efficienze di trattamento e rimozione elevate delle frazioni indesiderate (ferro, plastica, carta, legno, ecc.), riuscendo così a riciclare i rifiuti inerti non pericolosi in aggregati riciclati di natura omogenea. L'entrata in funzione del primo impianto con tecnologia R.O.S.E. risale al 1990 ma questa tecnologia di trattamento è stata studiata a livello sperimentale già nel 1989. Negli anni questo sistema tecnologico è stato migliorato più volte ed è stato soggetto ad applicazioni diverse raggiungendo livelli di efficienza crescenti dal punto di vista della qualità del materiale riciclato prodotto, nonché di riduzione degli impatti ambientali dell'impianto stesso. Tale tecnologia permette, quindi, di ottenere aggregati riciclati di buona qualità, con un alto livello di separazione tra le varie frazioni nonostante la composizione eterogenea dei rifiuti in entrata, costituita in media da 60% di calcestruzzo, 30% di laterizi, 2% di asfalto e 8% di altri materiali.

Il processo di trattamento prevede un primo controllo di qualità, per verificare l'ammissibilità dei materiali all'impianto, realizzato attraverso l'impiego di una prima telecamera a colori, collegata ad un video ripetitore ad alta risoluzione, che consente di visionare dall'alto, in forma sommaria, il tipo di materiale presente sull'autocarro in arrivo ed una seconda che permette di visualizzare la targa del veicolo da associare al carico in caso si verificano delle non conformità in merito alla natura del materiale conferito. Dopodiché lo scarico avviene in una zona debitamente attrezzata (stoccaggio provvisorio), posta in prossimità dell'impianto e sufficientemente ampia in modo tale da consentire la possibilità di ripartizione del materiale in ingresso in cumuli abbastanza omogenei. Il materiale in ingresso, dove l'alimentazione al ciclo avviene tramite pala gommata, viene tenuto sotto controllo da una terza telecamera che opera sulla bocca d'uscita dell'alimentatore, ovvero prima che i rifiuti inizino il ciclo di trattamento vero e proprio. In questa fase l'operatore, qualora ne ravvisi la necessità, può bloccare l'alimentazione e sottoporre i materiali o ad una semplice ispezione visiva più accurata, oppure può disporre l'accantonamento degli stessi per eseguire un'analisi chimico-fisica al fine di verificarne in via definitiva la qualità o l'eventuale presenza di rifiuti pericolosi. La fase successiva corrisponde ad una prima selezione di questo materiale effettuata tramite vibrovaglio che permette di evitare l'invio alla macinazione della frazione fine. Dopo questa operazione il materiale restante viene convogliato alla camera di frantumazione in cui il mulino ad urto consente, oltre alla riduzione granulometrica dei rifiuti, il distacco del ferro dall'impasto di calcestruzzo senza che in tale processo possano così verificarsi danni alla meccanica del mulino stesso. La tecnologia applicata consente, quindi, di realizzare il perfetto distacco del ferro dal calcestruzzo; contrariamente i piccoli blocchetti di calcestruzzo tra loro collegati dal tondino dovrebbero essere smaltiti in una discarica autorizzata con un doppio danno economico: il costo di conferimento ed il mancato guadagno dalla vendita del solo metallo. A valle del mulino si trova, poi, un dispositivo per l'abbattimento delle polveri, che

tramite getti di acqua nebulizzata consente il recupero delle stesse, incrementando la frazione fine del prodotto (altrimenti dispersa nell'ambiente).

Successivamente, per mezzo di un estrattore orizzontale, i materiali in uscita dal mulino vengono convogliati attraverso un nastro trasportatore sino al primo deferrizzatore elettromagnetico a nastro, la cui funzione è quella di separare i metalli ferrosi presenti e provvedere direttamente allo stoccaggio in un apposito cassone metallico (particolarità: il ricavato della vendita del ferro recuperato è, grosso modo, analogo al costo annuo dell'energia elettrica necessaria al funzionamento dell'impianto).

Dopo questa operazione, utilizzando un nastro trasportatore, sul quale viene effettuata una seconda fase di deferrizzazione mediante un separatore elettromagnetico di emergenza a nastro, il materiale viene convogliato ad un vibrovaglio per la separazione a secco delle frazioni leggere non idonee (carta, legno, plastica, ecc.); questi materiali vengono stoccati in apposito contenitore e successivamente eliminati mediante conferimento in discarica autorizzata. A questo punto il materiale viene inviato ad un sistema di vagli per la separazione in frazioni granulometriche. Nel diagramma a blocchi di Figura 24 è rappresentato lo schema di funzionamento dell'impianto.

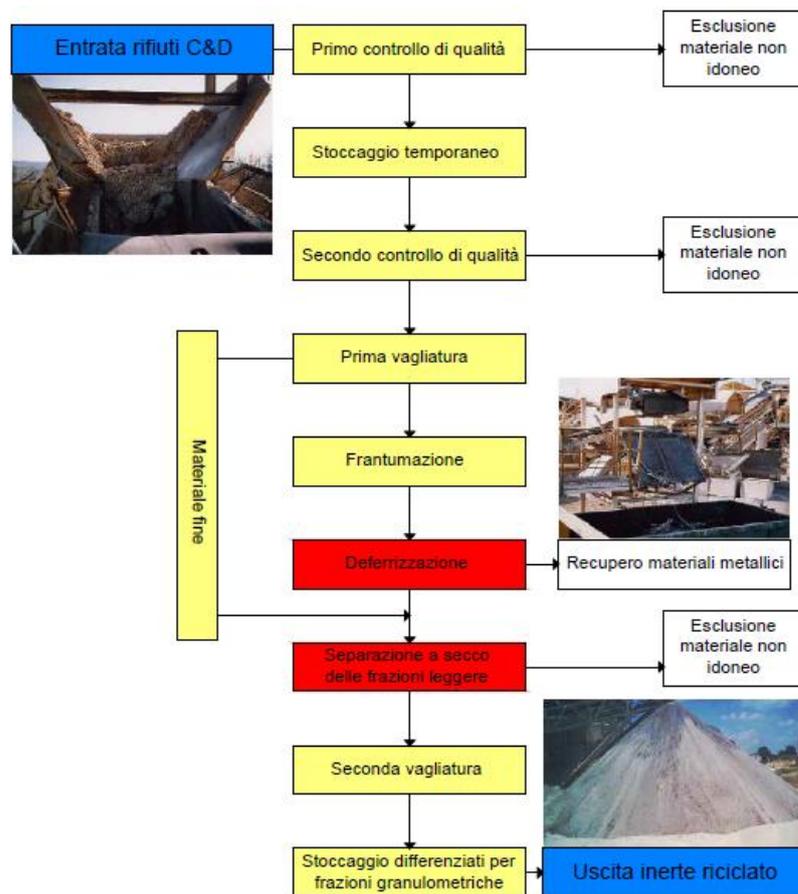


Figura 24: Schema di funzionamento della tecnologia ad impianto R.O.S.E.

Le caratteristiche tecniche dell'impianto R.O.S.E. risultano, quindi, molto soddisfacenti: la rumorosità rimane nell'intervallo di 70÷94 dB(A); le vibrazioni sono confrontabili con quelle presenti nell'ambiente; la produzione di polveri è praticamente nulla e si limita a quella dovuta alla movimentazione del materiale prima e dopo il trattamento; la potenza richiesta

dall'impianto e di soli 100 kW per una produzione oraria di 50÷60 m<sup>3</sup>. L'avanzata automazione richiede, infine, l'impiego di tre soli operatori: il primo provvede all'alimentazione dell'impianto prelevando il materiale dai cumuli di stoccaggio provvisorio; il secondo gestisce dalla sala di controllo le operazioni del ciclo produttivo dell'impianto ed il terzo si occupa della ricezione e pesatura del materiale in entrata, del primo controllo qualitativo, oltre che della pesatura e fatturazione del materiale in uscita.



*Figura 25: Impianto fisso di trattamento a secco a tecnologia R.O.S.E. in Italia*

Nel complesso, gli impianti fissi R.O.S.E. rappresentano una “best practice” nel contesto italiano. Sul nostro territorio sono presenti oggi circa 20 impianti tra Lombardia, Trentino, Veneto, Toscana, Marche, Emilia-Romagna, Campania e Sicilia.

La crisi che negli ultimi anni ha duramente colpito l'edilizia, unitamente all'aumento dei costi di approvvigionamento energetico e dei carburanti, ha indotto la R.O.S.E. Engineering a mettere a punto una tecnologia mobile più economica. Il nuovo impianto, denominato Pocket Size, risponde alla necessità di una nuova configurazione minimale in termini di ingombri che mantenga le peculiarità del R.O.S.E. permettendo però la lavorazione delle macerie direttamente in cantiere. Rispetto ai più comuni impianti di trattamento mobili che offrono limitate garanzie in termini di qualità del prodotto riciclato, perché non permettono la separazione accurata delle frazioni estranee (ferro, plastica, legno), il Pocket Size offre le stesse prestazioni dell'impianto fisso da cui deriva, fornendo: da 1 a 5 granulometrie prodotte in contemporanea, un elevato grado di pulizia dei materiali ed un efficace recupero dei materiali ferrosi. Rispetto ad analoghi impianti mobili ha, inoltre, un'elevata flessibilità produttiva, produce meno polveri e rumore ed ha un basso consumo energetico.

Riguardo alle tecnologie per il trattamento di pulizia del rifiuto C&D da cui si originerà, poi, l'aggregato riciclato, segnaliamo, altresì, due tipologie di macchinari:

- ad **aria**: attraverso dei separatori ad aria, i materiali più leggeri quali carta, plastica e legno, vengono separati sfruttandone la densità e forma differente. La selezione viene, pertanto, ottenuta sottoponendo il materiale ad un flusso di corrente d'aria in grado di trascinare con sé la frazione più leggera e di lasciare depositata quella più pesante.
- ad **acqua**: vi è, a titolo di esempio, la lavatrice a spruzzo (nei vagli piani vengono inseriti degli spruzzatori) in cui la corrente d'acqua lava le pezzature più grosse trascinando con sé le particelle più piccole. A valle occorre poi provvedere alla separazione delle parti più fini dall'acqua ed alla successiva asciugatura del materiale stesso.

## 4.2. Caratteristiche chimiche degli aggregati riciclati (AR)

L'analisi degli aggregati riciclati, dal punto di vista chimico ed ambientale, è fondamentale per prevenire eventuali effetti dannosi sull'ecosistema e, conseguentemente, sulla salute umana. Oltre all'assenza di sostanze pericolose, deve essere verificato che le impurità presenti (es. legno, vetro, plastica) e il rilascio di sostanze potenzialmente inquinanti (verifica mediante test di cessione) siano inferiori ai limiti stabiliti dalle norme per gli utilizzi specifici. Sono quindi utili test per determinarne la composizione chimica ed il comportamento a lisciviazione, quali:

- Analisi di composizione chimica;
- Test lisciviazione secondo prova EN 12457-2 (prova a singolo stadio, con un rapporto liquido/solido di 10 l/kg, per materiali con particelle di dimensioni minori di 4 mm, durata di 24 ore).

### 4.2.1. Composizione chimica

Dagli studi svolti da *Butera et al. 2014* sull'analisi di 33 campioni di aggregati riciclati prelevati da diversi impianti di riciclaggio è emerso come la composizione chimica degli AR sia fortemente dipendente dalle caratteristiche del rifiuto C&D da cui sono generati. La composizione e l'origine di tali materiali viene presentata in Figura 26.

Sample ID	Origin – site ID	Description	Cement type, main features
C0-C5	A	Clean concrete	Unknown
C6-C7	B	Construction waste (clean concrete)	BASIS+RAPID Cement+fly ash
C8-C13	C	Mixed aggregates (concrete, bricks, tiles, mortar). Presence of soil, clay	Unknown
C14-C17	D	Clean concrete	Unknown
C18-C20	E	Mixed aggregates (concrete, bricks, tiles, mortar). Presence of soil, clay	Unknown
C21	E	Mixed aggregates (mainly concrete, only few bricks and tiles)	Unknown
C22-C23	F	Mixed aggregates (mainly concrete, only few bricks and tiles)	Unknown
C24	F	Clean asphalt	Unknown
C25-C26	G	Clean concrete	Unknown
C27-C28	H	Clean concrete. Presence of small metal wires, woods and tiles	Unknown
C29	I	Newly cast concrete cores	BASIS Cement; no fly ash
C30-C31	J	Newly cast concrete cores (two different recipes)	RAPID Cement; no fly ash
C32	K	Newly cast concrete cores	RAPID Cement; no fly ash

Figura 26: Composizione ed origine dei materiali analizzati.

Dalle analisi è risultato come vi siano due gruppi distinti di costituenti all'interno degli AR:

- contenuto degli elementi *principali* (ordine  $\text{g kg}^{-1}$  TS) che varia generalmente in modo lieve (7-38%) al variare della composizione del rifiuto da costruzione e demolizione: silicio, alluminio, calcio, potassio, sodio, ferro, magnesio e zolfo (solfati).

- contenuto degli elementi *in traccia* (ordine mg kg<sup>-1</sup> TS) che varia, invece, generalmente in modo considerevole (15-126%) sempre al variare della composizione del rifiuto per: arsenico, bario, cadmio, cloro, cobalto, cromo, rame, litio, manganese, molibdeno, nichel, fosforo, piombo, antimonio, selenio, zinco, stronzio, e vanadio.

Elemento	Valore medio	Concentrazione soglia di contaminazione	
		Siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale [mg kg <sup>-1</sup> ]	Siti ad uso commerciale ed industriale [mg kg <sup>-1</sup> ]
Alluminio [g/kg TS]	42	-	-
Calcio [g/kg TS]	85	-	-
Ferro [g/kg TS]	13	-	-
Potassio [g/kg TS]	16	-	-
Sodio [g/kg TS]	11	-	-
Silicio [g/kg TS]	270	-	-
Magnesio [g/kg TS]	3.7	-	-
Solfati [g/kg TS]	5.3	-	-
Arsenico [mg/kg TS]	3.4	20	50
Bario [mg/kg TS]	410	-	-
Cadmio [mg/kg TS]	0.21	2	15
Cloruri [mg/kg TS]	140	-	-
Cobalto [mg/kg TS]	5.7	20	250
Cromo [mg/kg TS]	23	150	800
Rame [mg/kg TS]	18	120	600
Litio [mg/kg TS]	13	-	-
Manganese [mg/kg TS]	370	-	-
Molibdeno [mg/kg TS]	0.80	-	-
Nichel [mg/kg TS]	13	120	500
Fosforo [mg/kg TS]	460	-	-
Piombo [mg/kg TS]	33	100	1000
Antimonio [mg/kg TS]	0.53	10	30
Selenio [mg/kg TS]	<7	3	15
Stronzio [mg/kg TS]	260	-	-
Vanadio [mg/kg TS]	32	90	250
Zinco [mg/kg TS]	67	150	1500
PCB <sub>tot</sub> [mg/kg TS]	0.017	0.06	5
Sum 16 EPA PAHs [mg/kg TS] <sup>2</sup>	5.9	10	100

Tabella 30: Composizione chimica dei 33 campioni soggetti ad analisi. (Butera et al., 2014), comparati ai limiti della Tab. 1 All.5 alla parte IV del D.Lgs 152/2006.

Tali variazioni sono legate alla forte eterogeneità dei rifiuti C&D, ed effettuando una comparazione con i valori di concentrazione limite accettabili previsti dall'Allegato 5 - Tabella 1 "Concentrazione soglia di contaminazione nel suolo e nel sottosuolo riferiti alla specifica destinazione d'uso dei siti da bonificare" del D.lgs 152/2006 - Parte IV, è emerso che l'unico elemento che potrebbe risultare problematico in alcuni casi è il PCB (policlorobifenile).

<sup>2</sup> IPA come Σ dei policiclici aromatici da 25 a 34 Tabella 1 parte IV D.Lgs 152/2006

Riportando i diagrammi di concentrazione di ogni singolo elemento per ogni campione, è possibile analizzare nel dettaglio l'origine di tali componenti in funzione delle frazioni che compongono il rifiuto C&D (Figura 27).

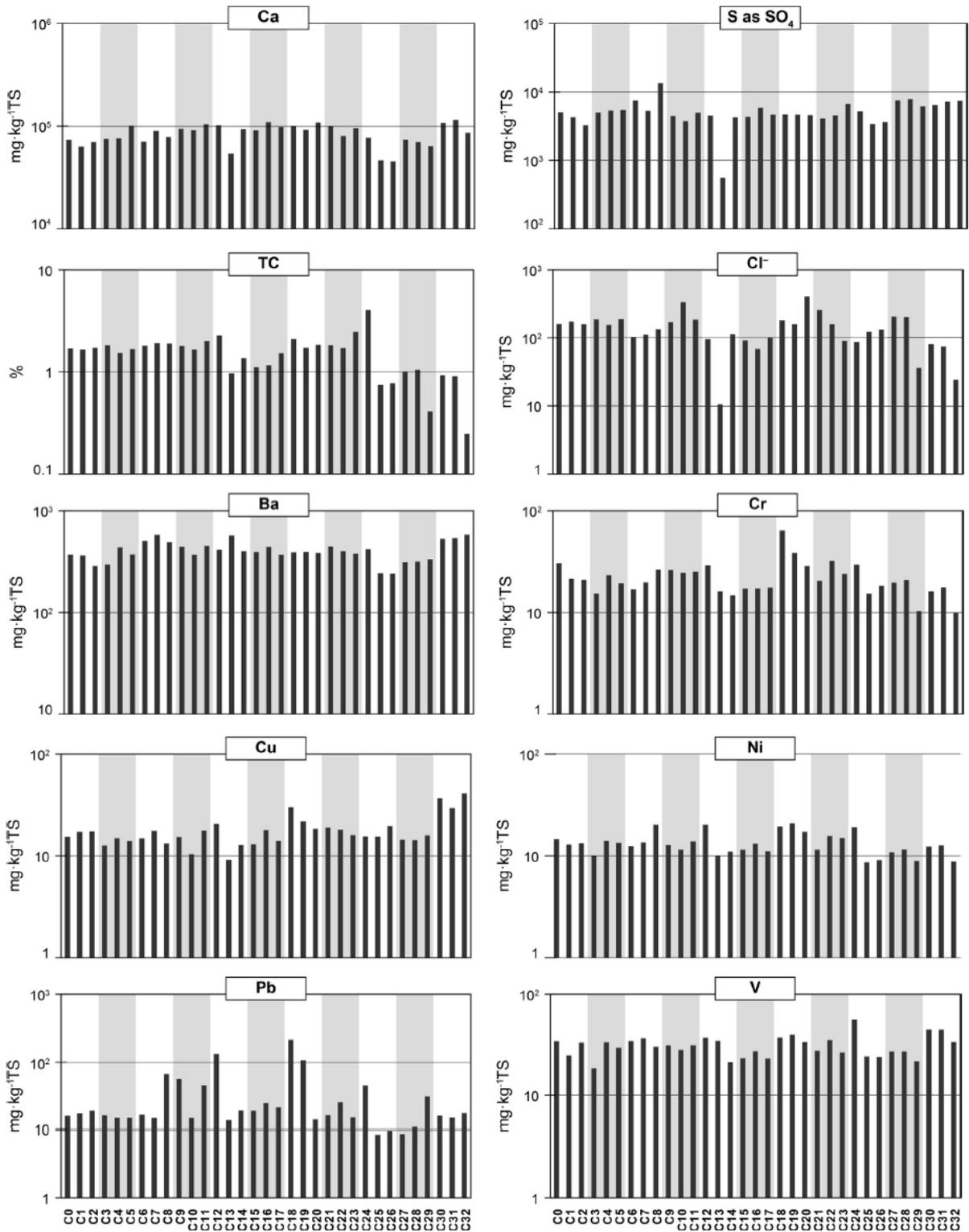


Figura 27: Contenuto totale degli elementi selezionati all'interno dei 33 campioni. (Butera et al., 2014)

Dai dati forniti, si nota come silicio, calcio e alluminio risultino gli elementi in maggior concentrazione, riflettendo così le principali caratteristiche di composizione dei materiali da cui si originano gli AR, in particolare modo dalla presenza di cemento; con un contenuto medio rispettivamente di circa 270, 80 e 40 g kg<sup>-1</sup> TS.

Per quanto riguarda piombo, cromo, nichel e solfati, si denota come la loro concentrazione aumenti all'interno dei campioni *misti*, con presenza di calcestruzzo, mattoni, tegole, malta e talvolta anche argilla e terreno (C8-C13, C18-C19, C22-C23).

Il vanadio, diversamente, presenta un picco di contenuto in particolare modo nel campione prodotto interamente da asfalto (C24), e lo stesso per il rame, con un picco per i campioni realizzati solo con calcestruzzo preconfezionato (C29-C32).

Come precedentemente accennato, un elemento d'analisi interessante è anche quello riguardante la concentrazione di PCB<sub>tot</sub> (Figura 28).

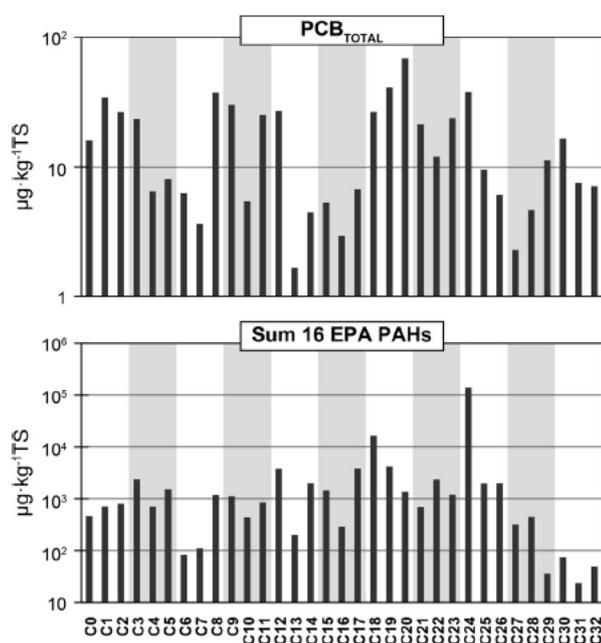


Figura 28 - Concentrazione di PCB totale e PAH nei 33 campioni soggetti ad analisi. (Butera et al., 2014)

Di norma le misurazioni di PCB nei rifiuti da C&D spesso non presentano livelli rilevanti; in campioni più recenti di rifiuti da demolizione (ed anche in quelli da calcestruzzo appena gettato) è stata però dimostrata la presenza di quantità notevoli di PCB, nonostante sia un composto organico bandito dagli anni '70.

Questo, si presenta come composto organico di sintesi clorurato con struttura simile al bifenile, ma con la fondamentale differenza che alcuni atomi di idrogeno vengono sostituiti con atomi di cloro (fino ad un massimo di dieci). Dal punto di vista chimico-fisico si tratta di composti estremamente stabili (da cui la sostanziale non infiammabilità), dalle ottime proprietà dielettriche. La loro stabilità è tuttavia anche responsabile della loro persistenza nell'ambiente. Questi sono, inoltre, caratterizzati da una bassa solubilità in acqua e da una bassa volatilità e sono tutti molto solubili nei solventi organici, negli oli e nei grassi. Proprio per queste loro caratteristiche i PCB sono stati estensivamente impiegati, sin dagli anni '30, nel settore elettrotecnico come isolanti (nei condensatori a partire dal 1931 e nei

trasformatori dal 1933) ed anche, in altri settori, come lubrificanti, in fluidi per impianti di condizionamento, nella preparazione delle vernici (in alcuni mobili, ad esempio, la presenza di PCB nelle vernici può raggiungere il 10%), di carte impregnate per usi particolari (fra cui la comune carta carbone) e, tra il 1955 ed il 1975, furono additivati ai *sigillanti di giunti di edifici in calcestruzzo* (tra cui figurano edifici pubblici e privati come scuole, palestre e piscine, ospedali, case per anziani, edifici amministrativi, grandi edifici residenziali e commerciali, loft, stabilimenti industriali e artigianali) allo scopo di incrementarne l'elasticità. Ecco perché fra le sorgenti primarie di PCB vengono citati, nell'ambito delle costruzioni, i sigillanti ad elasticità permanente e l'intonaco ottenuto macinando pietre colorate.

Si può, quindi, affermare che la conseguente contaminazione da PCB può avere origini diverse a seconda della tipologia di calcestruzzo originario ("vecchio" o "nuovo"), ovvero:

- contaminazione da contatto diretto con sigillanti o vernici contenenti PCB in campioni più vecchi;
- utilizzo di materie prime contenenti PCB in campioni più recenti (concentrazioni di fondo).

#### 4.2.2. Test di cessione

Il test di cessione rappresenta una prova simulata di rilascio di contaminanti, effettuata ponendo in contatto per un tempo definito un solido con un lisciviante in modo tale da ottenere un eluato (il liquido prodotto all'esito del test) sul quale viene poi valutato il rilascio di eventuali sostanze inquinanti.

In ambito nazionale, le modalità di esecuzione del test di cessione sono definite nell'Allegato 3 del D.M 5/02/98; la norma nazionale UNI 10802 (definita come un'armonizzazione a livello europeo) stabilisce, invece, il corretto campionamento dei rifiuti. Dall'esito delle analisi dipenderà il destino del rifiuto trattato che verrà, di conseguenza, conferito presso una discarica (per lo smaltimento) o utilizzato in sostituzione del materiale naturale di cava.

Per i procedimenti di preparazione ed analisi degli eluati, la norma rimanda alla UNI EN 12457-2, fornendo informazioni sulla lisciviazione di rifiuti granulari e fanghi nelle condizioni di prova specificate, e con un rapporto liquido/solido di 10 l/kg di sostanza secca. La norma si applica a rifiuti di dimensioni minori di 4 mm con o senza riduzione delle dimensioni.

Dall'esame della letteratura internazionale è stato possibile notare come, nella maggior parte degli studi svolti, i risultati ottenuti dalla prova, ed i corrispettivi limiti di riferimento, vengano espressi come [mg/kg], richiedendo, pertanto, un fattore di conversione:

$$\frac{mg}{l} = \frac{\left[ \frac{mg}{kg} \right]}{10}$$

Si tratta di studi svolti sulla base della Decisione Europea EU2003/33/EC, che stabilisce criteri e procedure per l'ammissione dei rifiuti nelle discariche ai sensi dell'articolo 16 e dell'Allegato II della direttiva 1999/31/CE "Discariche di rifiuti".

Dalle analisi di *Butera et al. 2014*, sui 33 campioni di AR differenti, già presentati nel paragrafo 4.2.1, eseguite tramite prova EN 12457-1 (metodica che prevede un rapporto liquido/solido pari a 2 (L/S=2) confrontabile con la nostra normativa nazionale attraverso “[mg/kg]/2”) è derivato un’evidente rilascio di bario, nichel, litio, zinco e solfati. Nella Figura 29 sono elencati i valori medi per i singoli elementi.

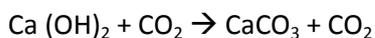
	Mean	Inter-sample variation	LOD
pH	11.92	±6.4%	-
Conductivity (mScm <sup>-1</sup> )	4.68	±63%	-
Aluminium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	3.2	±77%	0.07
Calcium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	790	±63%	0.07
Iron (mg kg <sup>-1</sup> TS)	0.17	±86%	0.07
Potassium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	250	±53%	0.3
Sodium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	180	±35%	0.07
Silicon (mg kg <sup>-1</sup> TS)	12	±149%	0.1
Magnesium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	0.097	±155%	0.007
S as sulphate (mg kg <sup>-1</sup> TS)	150	±229%	0.05
DOC (mg kg <sup>-1</sup> TS)	35	±50%	2.0
Arsenic (µg kg <sup>-1</sup> TS)	32	±71%	6.9
Barium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	1600	±119%	6.9
Cadmium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	2.0	±37%	1.0
Chloride (µg kg <sup>-1</sup> TS)	110,000	±69%	2000
Cobalt (µg kg <sup>-1</sup> TS)	19	±42%	6.9
Chromium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	110	±68%	1.0
Anionic chromium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	88	±75%	1.0
Copper (µg kg <sup>-1</sup> TS)	100	±71%	13.8
Lithium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	380	±120%	3.0
Manganese (µg kg <sup>-1</sup> TS)	12	±106%	6.9
Molybdenum (µg kg <sup>-1</sup> TS)	30	±49%	6.9
Nickel (µg kg <sup>-1</sup> TS)	71	±314%	3.0
Phosphorous (µg kg <sup>-1</sup> TS)	120	±66%	13.8
Lead (µg kg <sup>-1</sup> TS)	19	±67%	7.6
Antimony (µg kg <sup>-1</sup> TS)	72	±42%	6.9
Selenium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	64	±67%	13.8
Strontium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	15,000	±90%	3
Vanadium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	37	±84%	3.0
Zinc (µg kg <sup>-1</sup> TS)	260	±459%	13.8

Figura 29: Test di cessione con relativi valori di rilascio nell'eluato. (*Butera et al., 2014*)

Anche il pH svolge un ruolo essenziale nel rilascio di inquinanti. Per la maggior parte dei campioni, i valori di pH risultano compresi tra 11 e 13 (Figura 30), mentre valori leggermente inferiori sono stati osservati per gli aggregati misti C8-C13 (composti da calcestruzzo, malta, tegole, mattoni ed eventuale presenza di terreno), fattore che potrebbe essere proprio attribuito alla presenza di suolo e mattoni nelle diverse miscele.

I campioni di calcestruzzo “recente” preconfezionato (C29-C32) hanno mostrato, invece, un pH più elevato (intorno 13) rispetto ai campioni rimanenti, in accordo con i dati riportati per il calcestruzzo fresco da laboratorio sviluppati da altri studi. Ciò indica bassi livelli di carbonatazione, ed è rappresentativo del fatto che tale processo si verifica principalmente dopo la frantumazione (superficie specifica aumentata) a condizione che siano disponibili tempo, umidità e contatto con l'aria sufficienti.

Nel calcestruzzo giovane, infatti, la presenza di Ca (OH)<sub>2</sub> fa sì che il pH sia 12,5-13. Con il tempo avviene la carbonatazione (che porta al degrado del calcestruzzo):



La formazione di carbonato di calcio riduce progressivamente il pH fino a 8,5 (nel caso di calcestruzzo completamente carbonato).

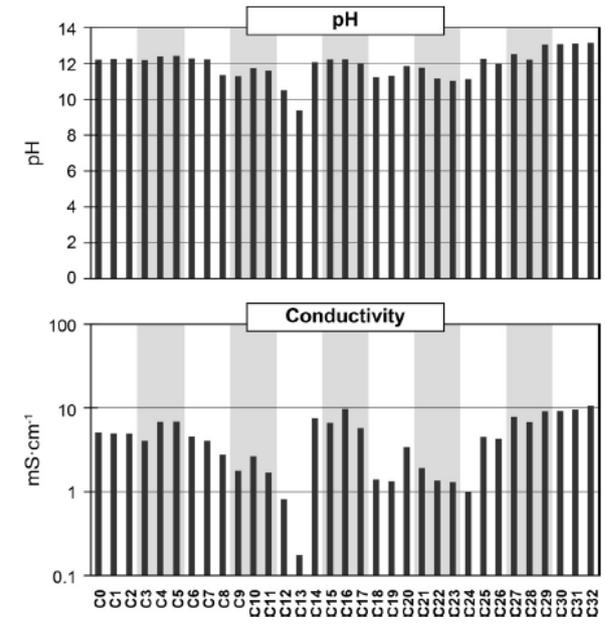
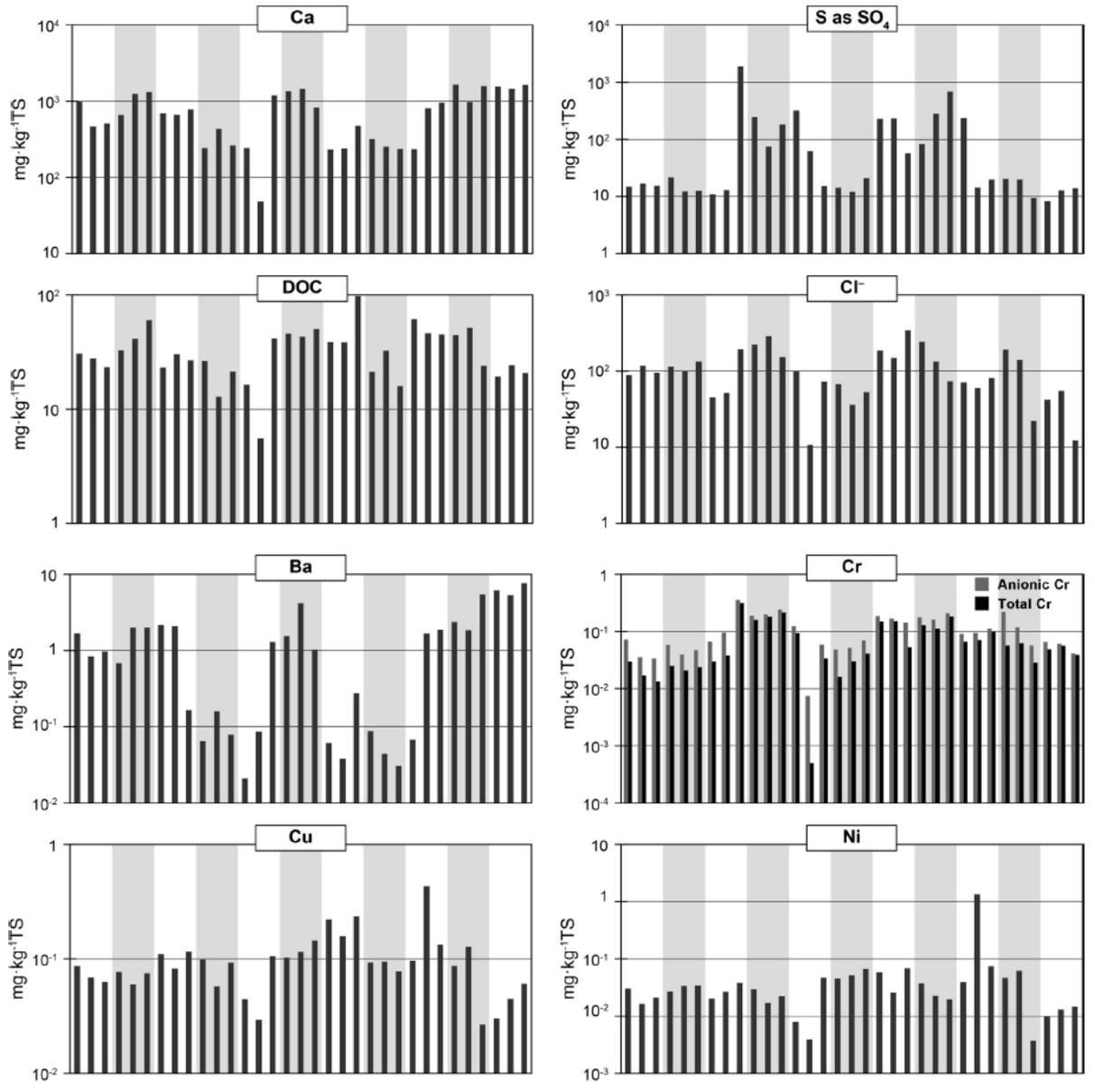


Figura 30: Valori di pH. (Butera et al., 2014)



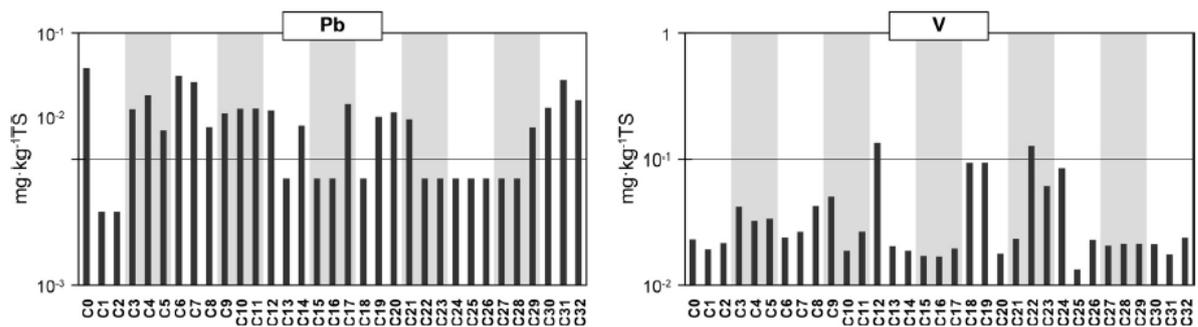


Figura 31: Comportamento a lisciviazione dei 33 campioni dopo test di cessione. (Butera et al., 2014)

Per quanto riguarda i contaminanti rilasciati all'interno dell'eluato, dalla Figura 31 si nota come:

- il *calcio* viene rilasciato in quantità comprese tra 200 e 1600 mg di kg<sup>-1</sup> TS, eccetto per un singolo campione di aggregato misto con un valore di 50 mg di kg<sup>-1</sup> TS;
- il *nichel* presenta un'uniformità nel rilascio, ad eccezione del campione C-25 di solo calcestruzzo che mostra al contrario un notevole rilascio di contaminante. Poiché, però, valori elevati di nichel, rame e zinco sono stati identificati anche all'interno dello stesso campione replicato per verifica (C-25), questi valori sono stati considerati anomali;
- per quanto riguarda gli elementi minori, si riporta che lo zolfo è stato rilasciato nell'intervallo 8-700 mg kg<sup>-1</sup> TS in termini di *solfato*, ad eccezione dei campioni misti con calcestruzzo, tegole, malta e mattoni (C8-C13, C18-C23), che presentano un rilascio di solfato fino a 1900 mg kg<sup>-1</sup> TS. Questo è dovuto alla presenza di materiali ceramici al loro interno;
- lo stesso vale per il *vanadio* che pur mostrando valori di rilascio ridotti, presenta dei picchi notevoli solo per le tipologie di materiali misti; questo probabilmente è dovuto alla sua presenza nelle argille di cui i materiali ceramici sono composti e all'eventuale impiego in pigmenti per l'industria ceramica.

Tramite un'analisi dettagliata è stato possibile, inoltre, identificare i componenti che presentano un rilascio significativo, mettendo in evidenza i range di variazione dei parametri critici all'interno di due sottogruppi distinti sulla base della composizione primaria degli aggregati (Figura 32), in particolare di:

- *solo calcestruzzo*: bario, calcio, litio, potassio;
- *campioni contenenti murature*: silicio, solfati, vanadio e, in misura minore, cloruri e cromo.

	Range clean concrete samples	Range masonry- containing samples	Factor difference <sup>a</sup>
pH	12.0–13.1	10.7–11.7	10 <sup>b</sup>
Conductivity (mS cm <sup>-1</sup> )	4.1–11	0.8–3.4	1/4
Calcium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	460–1600	230–790	1/3
Potassium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	170–640	92–210	1/2
Silicon (mg kg <sup>-1</sup> TS)	0.1–2.1	4.3–50	30
Magnesium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	7.6–250	20–330	3
Sulphate (mg kg <sup>-1</sup> TS)	8.2–22	57–1900	100
Barium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	680–7600	21–280	1/30
Chloride (mg kg <sup>-1</sup> TS)	12–190	73–340	2
Chromium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	34–220	120–360	3
Anionic chromium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	13–99	53–310	4
Lithium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	190–2000	47–130	1/6
Selenium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	6.9–140	31–150	2
Strontium (mg kg <sup>-1</sup> TS)	11–51	1.4–6.2	1/10
Vanadium (µg kg <sup>-1</sup> TS)	13–42	18–130	3

<sup>a</sup> Average of masonry-containing samples compared with average of clean concrete samples.

<sup>b</sup> Expressed as [H<sup>+</sup>] ratio.

Figura 32: Range di variazione dei parametri critici per i due sottogruppi. (Butera et al., 2014)

Nel dettaglio, è possibile affermare come un certo numero di campioni di calcestruzzo misto a muratura (C8-C12 e C18-C23) abbiano mostrato statisticamente livelli di lisciviazione diversi rispetto ai restanti campioni.

Queste differenze sono risultate sostanziali specialmente per il solfato (con un fattore di 100 rispetto agli intervalli misurati per campioni di calcestruzzo), silicio, bario (fattore di 30) e stronzio (fattore di 10), andando ad indicare come la presenza della muratura all'interno del calcestruzzo frantumato possa influenzare in modo significativo la lisciviazione di alcuni elementi.

Oltre a ciò, anche la carbonatazione può influenzare la lisciviazione, in quanto la diminuzione del pH porta ad un aumento di rilascio di solfati, silicio, cromo e vanadio e simultaneamente ad una bassa lisciviazione di calcio, bario, stronzio, sodio e potassio.

In entrambi i due sottogruppi è da annoverare comunque il fatto che il cromo non è un elemento trascurabile.

La motivazione specifica per quanto riguarda il rilascio evidente di solfati e cromo è stata esaminata da *Del Rey et al. 2015*, i quali hanno proposto un'analisi su 20 campioni di aggregati riciclati provenienti da differenti impianti di riciclaggio, la cui composizione è mostrata nella Tabella 31, tramite prova EN 12457-3 condotta con doppio stadio L/S=2 ed L/S=10, anch'essa non direttamente confrontabile con la metodica nazionale di riferimento stabilita dalla UNI 12457-2.

		RA source	Composition (% in weight)					
			Bitumen	Ceramic	Concrete and mortar	Natural aggregates	Gypsum	Others
Recycled concrete aggregate	C1	RCA	0.85	0.74	52.89	45.37	0	0.15
	C2	RCA	1.12	0	59.34	39.56	0	0.88
	C3	RCA	4.79	4.34	41.13	49.74	0	0
	C4	RCA	<sup>a</sup>					
	C5	RCA	3.8	3.7	62.9	29.6	0	0
	C6	RCA	0	1.3	80.9	17.8	0	0
	C7	RCA	0	0	95.6	4.4	0	0
Mixed recycled aggregates	M1	MRCeA	9.56	32.75	40.36	15.92	1.15	0.26
	M2	MRCA	2.48	20.41	45.91	30.73	0.12	0.35
	M3	MRCA	2.88	25.72	35.25	35.46	0.45	0.24
	M4	MRCA	4.1	29.73	49.69	14.54	1.55	0.39
	M5	MRCA	0.9	13.8	49.3	34.9	0.2	0.9
	M6	MRCA	3.07	26.23	54.02	16.24	0.28	0.16
	M7		<sup>a</sup>					
	M8		<sup>a</sup>					
	M9	MRCA	2.47	8.7	81.44	7.05	0.13	0.21
	M10	MRCeA	0	33.8	59.5	6.6	0	0.1

<sup>a</sup> Non-determined parameter due to the grain size distribution of the material.

Tabella 31: Composizione degli aggregati riciclati. (Del Rey et al., 2015)

In tale studio sono stati analizzati 7 campioni di AR provenienti da calcestruzzo frantumato, 10 da materiale misto (calcestruzzo, asfalto e particelle ceramiche), 3 dalla fresatura di pavimentazioni asfaltate.

È stato, poi, effettuato un lavoro sui materiali *vergini* di partenza, in modo tale da valutare l'origine effettiva degli inquinanti presenti nell'eluato. Di questi sono stati analizzati 8 materiali, dei quali 5 ceramici e 3 provenienti da calcestruzzo. Quest'ultimo realizzato in differenti periodi storici (anni 1960 e 1990) e con differenti prestazioni meccaniche, come mostrato in Tabella 32.

	Materials	Description
Type 1: unused ceramic materials from factory	Perforated brick (PB)	Made of clay with holes greater than 25% of the brick volume
	Hollow brick (HB)	Made of clay. The holes are less than 25% of the brick volume
	Tile (T)	Made of clay used in the manufacture of pitched roofs
	Bluebird (B)	Thin flat pieces made of clay, silica, fluxes (feldspars), colouring and other raw materials. Generally used to pave floors and cover walls and facades
	Stoneware (S)	Ceramic tile made of malleable clay or a combination of clays that have been fired at high temperature. It has a fine texture with a glassy finish
Type 2: concretes of different manufacturing years	New Mortar (NM)	Mortar made of a natural sand with a CEM II/B-L 32.5-R
	Recycled Concrete Aggregate (RC-1)	Concrete provided by a CDW treatment plant of Andalusia. The concrete comes from the demolition of a foundation of a house early 60s. Based on the classification of the Spanish legislation of Concrete for that period (EH-68). The concrete presented a minimum strength of 6 (MPa)
	Recycled Concrete Aggregate (RC-2)	Concrete provided by a CDW treatment plant of Andalusia. The concrete comes from the demolition of a foundation of a house on the decade of 90s. Based on the classification of the Spanish legislation of Concrete for that period (EH-73). The concrete presented a minimum strength of 12.5 (MPa)

Tabella 32: Descrizione dei materiali analizzati per determinare l'origine di Cromo e Solfato. (Del Rey et al., 2015)

È stato valutato inizialmente il comportamento a lisciviazione dei materiali in base al test di conformità proposto dalla direttiva sulle discariche "Direttiva 2003/33/EC", da cui è emerso, come mostrato dalle tabelle 33-34-35, come il cromo ed il solfato siano i composti più critici, superando entrambi i limiti per i rifiuti inerti imposti dalla direttiva nella maggior parte dei materiali testati.

	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7	
	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10
C ( $\mu\text{S/cm}$ )	2298	1225	1577	1335	987	527	1014	730	730	348	1195	632	1735	850
pH	12.1	11.94	11.7	11.56	12.13	11.88	11.78	11.78	11.73	11.56	12.38	12.05	12.55	12.23
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	25.2	24.7	18.6	17.1	21.5	20.6	24.5	23.3	17.7	17.3	17.5	17.1	17.5	17.1
Cr	<b>0.270</b>	<b>0.600</b>	<b>0.250</b>	0.500	<b>0.230</b>	0.450	0.180	0.500	0.200	0.500	<b>0.960</b>	<b>1.360</b>	0.200	0.500
Ni	0.010	0.030	0.020	0.060	0.020	0.040	0.010	0.050	0.010	0.040	0.010	0.030	0.010	0.060
Cu	0.070	0.120	0.050	0.130	0.230	0.300	0.030	0.100	0.010	0.050	0.050	0.120	0.010	0.090
Zn	0.020	0.050	0.030	0.140	0.010	0.040	0.030	0.170	0.020	0.120	0.020	0.120	0.020	0.120
As	<0.001	<0.001	<0.001	0.010	<0.001	<0.001	<0.001	0.010	<0.001	<0.001	<0.001	0.010	<0.001	0.010
Se	0.045	0.074	0.054	0.070	0.052	0.085	0.047	0.075	0.045	0.085	0.040	0.080	0.055	0.087
Mo	0.050	0.160	0.080	0.100	0.180	0.270	0.160	0.170	0.010	0.080	0.130	0.200	0.020	0.160
Sb	<0.001	0.010	<0.001	<0.001	0.001	0.013	<0.001	0.010	<0.001	0.020	<0.001	0.010	<0.001	0.010
Ba	0.470	1.410	0.100	0.420	0.110	0.330	0.110	0.280	0.020	0.200	0.080	0.340	0.150	0.860
Pb	<0.005	<0.005	<0.005	0.010	<0.005	<0.005	<0.005	0.020	<0.005	0.010	<0.005	0.010	<0.005	0.010
F <sup>-</sup>	1.800	8.700	2.000	8.500	1.300	8.700	1.560	8.500	1.300	9.000	1.200	9.200	1.500	8.800
Cl <sup>-</sup>	123.7	170.5	209.3	321.3	114.5	166.0	64.8	50.0	13.1	80.6	100.5	95.6	11.2	70.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	58.6	270.5	<b>2730.0</b>	<b>12076.0</b>	554.8	<b>1089.0</b>	334.0	620.0	140.0	890.0	406.0	800.0	31.1	235.6

Note: Cd was negligible and below the detection limit. Inert value limits exceeded are given in bold.

Tabella 33: Concentrazione di inquinanti da aggregati provenienti da solo calcestruzzo. (Del Rey et al., 2015)

	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7		M8		M9		M10	
	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10
C ( $\mu\text{S/cm}$ )	1708	906	980	549	1131	473	1635	1193	1504	644	1382	526	1072	532	1499	688	1711	917	1393	1285
pH	11.24	11.16	11.62	11.46	11.53	11.55	12.33	12.42	11.97	11.86	10.93	11.06	12.00	11.75	11.22	11.36	11.58	11.50	11.58	11.40
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	25.2	24.5	25.2	24.8	18.1	17.3	18.0	17.3	18.0	21.1	24.7	23.3	21.3	20.7	25.1	24.8	24.4	23.2	17.8	17.3
Cr	<b>0.220</b>	0.490	<b>0.380</b>	0.480	<b>0.860</b>	<b>1.100</b>	0.160	<b>0.520</b>	<b>0.260</b>	0.500	<b>0.530</b>	<b>0.740</b>	0.180	0.450	0.188	0.450	<b>0.380</b>	<b>0.560</b>	0.200	0.500
Ni	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.050	0.010	0.100	0.010	0.050	0.010	0.010	0.020	0.050	0.020	0.140	0.010	0.010	0.010	0.050
Cu	0.060	0.090	0.050	0.070	0.030	0.110	0.030	0.110	0.040	0.120	0.010	0.010	0.090	0.210	0.170	0.260	0.020	0.020	0.030	0.050
Zn	0.010	0.060	0.010	0.040	0.020	0.170	0.020	0.140	0.020	0.130	0.020	0.040	0.020	0.160	0.020	0.050	0.010	0.110	0.030	0.260
As	<0.001	0.010	<0.001	0.010	<0.001	0.010	<0.001	0.010	<0.001	0.020	<0.001	<0.001	0.010	0.020	0.010	0.010	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Se	0.040	0.080	0.050	0.087	0.056	0.078	0.055	0.070	0.050	0.080	0.055	0.078	0.050	0.080	0.055	0.078	0.055	0.080	0.057	0.090
Mo	0.070	0.080	0.080	0.100	0.060	0.080	0.060	0.140	0.080	0.060	0.050	0.070	0.130	0.220	0.110	0.140	0.120	0.170	0.030	0.150
Sb	<0.001	0.010	<0.001	0.010	<0.001	0.010	<0.001	<0.001	<0.001	0.010	<0.001	0.020	<0.001	0.020	<0.001	0.010	<0.001	<0.001	<0.001	0.010
Ba	0.100	0.360	0.090	0.280	0.080	0.290	0.390	1.200	0.120	0.260	0.070	0.170	0.120	0.350	0.190	0.560	0.180	0.540	0.040	0.380
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.007	0.002	0.008	0.002	0.009	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Pb	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.020	<0.005	0.020	<0.005	0.020	<0.005	<0.005	<0.005	0.020	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.030
F <sup>-</sup>	1.800	9.000	1.750	8.500	1.680	8.000	3.200	9.200	1.800	9.000	1.700	8.900	1.500	8.000	1.700	8.500	<b>4.800</b>	8.000	1.500	8.500
Cl <sup>-</sup>	206.5	208.5	102.9	109.0	130.0	122.6	59.4	50.0	35.3	50.0	137.1	173.5	34.4	50.0	63.7	78.0	304.7	247.0	17.4	103.5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>2790.0</b>	<b>6450.0</b>	<b>840.0</b>	<b>1454.9</b>	<b>1942.0</b>	<b>2270.0</b>	19.6	50.0	<b>2620.0</b>	<b>3440.0</b>	<b>2620.0</b>	<b>3450.0</b>	<b>1276.0</b>	<b>1200.0</b>	<b>3340.0</b>	<b>4000.0</b>	<b>2640.0</b>	<b>5750.0</b>	<b>2574.3</b>	<b>13650.0</b>

Note: Cd was negligible and below the detection limit. Inert value limits exceeded are given in bold.

Tabella 34: Concentrazione di inquinanti da aggregati misti. (Del Rey et al., 2015)

	A1		A2		A3	
	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10
C ( $\mu\text{S/cm}$ )	178.6	71.9	145.81	54.4	241	104.3
pH	9.05	9.39	10.28	9.95	11.32	11.09
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	24.1	23.7	24.3	23.7	22.9	22.6
Cr	0.004	0.008	0.004	0.005	0.002	0.013
Ni	0.008	0.052	0.014	0.049	0.014	0.067
Cu	0.004	0.014	0.015	0.023	0.001	0.004
Zn	0.032	0.11	0.024	0.128	0.024	0.143
As	0.001	0.008	0.005	0.016	<0.001	0.002
Se	0.006	0.0012	0.005	0.036	0.008	0.023
Mo	0.008	0.002	0.007	0.013	0.005	0.013
Sb	0.002	0.005	0.003	0.006	0.001	0.004
Ba	0.080	0.354	0.010	0.064	0.058	0.135
Hg	<0.005	0.001	<0.005	0.001	<0.005	0.001
Pb	0.002	0.001	<0.005	0.002	<0.005	0.002
F <sup>-</sup>	<2.000	<1.000	<2.000	<1.000	<2.000	<1.000
Cl <sup>-</sup>	18.3	50	50	50	45.2	59.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	206.7	276.1	89.5	80.2	14.3	50.0
I. Fenol	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2

Note: Cd was negligible and below the detection limit.

Tabella 35: Concentrazione di inquinanti da aggregati provenienti da pavimentazione asfaltata. (Del Rey et al., 2015)

Da questo è nata la necessità di determinare le possibili origini di entrambi i contaminanti a partire dai materiali vergini, ovvero tutti quei materiali necessari alla costruzione vera e propria dell'edificio (quali ad esempio mattoni forati, tegole, malta etc.).

In particolare, è stato riscontrato come i materiali ceramici prodotti in processi industriali, quali mattoni forati, tegole, rivestimenti ceramici e tegole in argilla cotte ad elevate temperature, presentino un rilascio molto critico di cromo e solfati.

Al contrario, i materiali come malte e calcestruzzi riciclati da rifiuti C&D con resistenza minima di 6-12 MPa non hanno mostrato valori oltre i limiti ma pH superiori (coerenti con l'origine dei materiali).

Sono stati, invece, inaspettati i dati relativi al cromo (inferiori rispetto al previsto), essendo il cromo elevato negli aggregati da calcestruzzo frantumato in quanto contenuto nel cemento.

I dati sul solfato hanno invece confermato che, come evidenziato in precedenza, l'ottenimento di valori alti deriva prevalentemente dal gesso, dalle particelle di ceramica e dalla malta aderenti agli AR.

		C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Cr	$\text{SO}_4^-$
PB	L/S = 2	1301	9.35	22.1	<b>0.866</b>	<b>3040</b>
	L/S = 10	914	9.65	21.7	<b>0.847</b>	<b>10,400</b>
HB	L/S = 2	1423	9.20	22.4	<u><b>4.266</b></u>	<b>3340</b>
	L/S = 10	872	8.39	22.1	<b>4.614</b>	<b>7840</b>
T	L/S = 2	506	10.09	22.2	<b>0.213</b>	<b>870</b>
	L/S = 10	164.7	10.27	21.7	0.237	990
B	L/S = 2	297	11.11	19.6	0.083	250
	L/S = 10	146.6	10.97	18.8	0.094	315
S	L/S = 2	158.1	9.89	20.0	<0.01	204
	L/S = 10	55.3	9.77	18.5	<0.01	287
NM	L/S = 2	538	12.84	21.7	0.039	16
	L/S = 10	566	12.92	20.9	0.115	67
RC-1	L/S = 2	885	11.76	22.1	0.054	120.4
	L/S = 10	463	11.97	22.4	0.085	428
RC-2	L/S = 2	505	11.54	20.8	0.109	548
	L/S = 10	645	11.82	21.6	0.170	970

Note: Values exceeding inert limits are given in bold. Values exceeding non-hazardous limits are given in bold and underlined.

Figura 33: Test di cessione sui materiali vergini per valutare l'origine di Cromo e Solfato. (Del Rey et al., 2015)

Il basso livello di cromo, sopra richiamato, potrebbe essere dovuto al limitato contenuto di cemento nel calcestruzzo riciclato testato, in quanto poco prestante e quindi non strutturale, oppure all'elevato pH.

A conferma di ciò, è necessario stabilire lo stato di ossidazione del cromo in modo tale da effettuare una stima del pericolo, essendo il cromo esavalente (Cr VI presente in composti come pigmenti per vernici, vetro e plastica) dannoso per l'uomo, a differenza di quello trivalente.

È stata, pertanto, eseguita l'estrazione a caldo con acido nitrico al 20% in acqua ad un pH acidificato, a causa della relativa insolubilità del Cr (III) per pH superiori a 5.

Dall'analisi, riferita anche alla curva di solubilità, è stato possibile evidenziare due fattori determinanti, ovvero:

- per valori di pH tra 7 – 11: vi è una reale possibilità di rilascio di cromo in quanto altamente solubile;
- per valori inferiori tra 5-7: il cromo è meno solubile.

Si osserva, altresì, che per i valori di pH inferiori a 5, la maggior parte del cromo viene lisciviata sotto forma di Cr (III), al contrario, quando il pH è neutro o leggermente alcalino, il cromo viene lisciviato sotto forma di Cr (VI) "esavalente".

A conclusione di questo è possibile, quindi, affermare che i materiali ceramici, mattoni e piastrelle sono una considerevole fonte di cromo e solfati. Mentre, le malte e il gesso sono fortemente collegati alla presenza di solfato negli eluati.

Affermazione dimostrata e confermata anche dagli autori *Barbudo et al. 2012*, i quali hanno sviluppato un'analisi su 19 aggregati differenti con composizione mostrata in Tabella 36.

	Metals (mg/kg)									Sulphate	
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Sb	Ba	SO <sub>4</sub> (mg/L)	SO <sub>3</sub> (%)
N1	n.d.	0.004	0.012	0.058	0.035	0.003	0.022	0.007	1.411	32	0.03
N2	0.014	0.013	0.001	0.003	0.006	n.d.	0.014	0.002	0.021	41	0.04
C1	0.286	0.028	0.147	n.d.	0.002	0.033	0.228	n.d.	2.395	46.5	0.04
C2	0.048	0.007	0.045	0.010	0.001	0.002	0.027	0.023	0.219	92	0.09
A1	0.005	0.039	n.d.	n.d.	0.135	0.040	n.d.	0.023	n.d.	128	0.12
A2	0.273	0.001	0.136	n.d.	0.013	0.016	0.094	0.036	0.059	180.8	0.17
M1	0.162	0.038	0.047	0.022	0.002	0.016	0.057	0.008	0.486	1707	1.63
M2	0.706	0.027	0.106	0.010	0.002	0.007	0.082	0.011	0.437	669	0.64
M3	0.663	0.040	0.078	0.021	0.002	0.042	0.086	0.008	0.384	714	0.68
M4	1.024	0.007	n.d.	n.d.	0.003	0.042	0.042	0.007	0.117	353.5	0.34
M5	0.003	0.028	0.013	n.d.	0.017	0.042	0.156	0.020	0.273	1425	1.36
M6	0.007	0.035	0.045	n.d.	0.008	0.064	0.128	0.048	0.336	1675	1.60
B	3.918	0.027	n.d.	n.d.	0.002	0.049	0.262	n.d.	0.272	1039	0.99
X1	1.021	0.136	0.233	n.d.	0.005	0.038	0.381	n.d.	2.130	1450	1.39
X2	1.041	0.145	0.223	n.d.	0.003	0.022	0.375	n.d.	2.042	1525	1.46
X3	0.957	0.142	0.228	n.d.	0.006	0.040	0.406	n.d.	2.046	1431	1.37
X4	0.730	0.108	0.177	n.d.	0.005	0.043	0.275	n.d.	2	960	0.92
X5	0.782	0.031	0.014	n.d.	0.004	0.008	0.098	n.d.	0.928	564	0.54
X6	1.418	0.042	0.064	n.d.	0.004	0.058	0.223	n.d.	1.578	141.5	0.14

Tabella 36: Composizione degli aggregati analizzati. (*Barbudo et al., 2012*)

Dall'analisi del test di cessione, riportata in Tabella 37, si nota come la concentrazione nell'eluato di mercurio, piombo e cadmio risulti trascurabile e quindi non inclusa all'interno dei dati forniti.

Si osserva, invece, che le più alte concentrazioni di solfati (pari o superiori all'1% di SO<sub>3</sub>) si presentano negli aggregati riciclati con le maggiori quantità di particelle ceramiche:

- M5 e M6 (entrambi i campioni con una percentuale di particelle ceramiche superiori al 50%);
- nel materiale B (100% particelle ceramiche);
- nei campioni Xi realizzati in laboratorio con alte percentuali di particelle di gesso (X1, X2, X3 e X4).

	Concrete and mortar	Natural aggregate	Ceramic particles	Gypsum	Bituminous	Others
N1	0	100	0	0	0	0
N2	0	100	0	0	0	0
C1	85.63	13.64	0.16	0.02	0.54	0.01
C2	68.97	28.01	2.99	0	0	0.03
A1	37.01	5.46	1.11	0	56.42	0
A2	2.61	51.37	3.94	0	42.08	0
M1	59.67	18.75	12.67	2.13	6.78	0
M2	37.64	41.49	20.81	0	0	0.06
M3	60.08	8.14	29.67	1.03	1.06	0.02
M4	38.06	17.68	44.16	0.09	0.01	0
M5	32.67	10.83	50.65	1.32	3.91	0.62
M6	25.69	16.54	56.12	0.33	1.28	0.04
B	0	0	100	0	0	0
X1	77.06	12.28	0.14	10.02	0.49	0.01
X2	79.21	12.61	0.15	7.52	0.50	0.01
X3	81.35	12.96	0.15	5.02	0.51	0.01
X4	83.06	13.23	0.16	3.02	0.52	0.01
X5	83.48	13.30	0.16	2.52	0.53	0.01
X6	84.77	13.50	0.16	1.02	0.54	0.01

Tabella 37: Concentrazione di metalli e solfati successivamente al test di cessione effettuato (*Barbudo et al., 2012*)

Si può, perciò, affermare che campioni con percentuale di gesso superiore al 2-3% o particelle ceramiche oltre il 30% hanno mostrato una solubilità dei solfati dello:

- 0,90% per solfati solubili in acqua;
- 1,3% per solfati solubili in acido.

Il calcestruzzo non risulta essere la fonte primaria di solfati, ma bisogna tenere in considerazione che campioni di aggregati riciclati costituiti da calcestruzzo possono presentare considerevoli valori di solfati in seguito all'esecuzione dei test di lisciviazione; la causa non è direttamente imputabile al calcestruzzo, ma è correlata all'eventuale presenza di malte aderenti alla superficie.

In generale, il calcestruzzo può essere o non essere, a seconda delle varie situazioni e condizioni in cui si trova, fonte di rilasci di cromo in base a:

- *grado di carbonatazione*: è in funzione del tempo di vita, delle condizioni espositive e del tipo di calcestruzzo impiegato. Tale valore è importante in quanto determina il pH. Quest'ultimo, a sua volta, rappresenta essere uno dei fattori chiave che regolano il rilascio di cromo come dimostrato precedentemente;
- *età del calcestruzzo*: è un parametro da tenere in considerazione quando è utilizzato per la produzione di un AR, in quanto, a seconda del periodo di confezionamento pre/post direttiva 2003/53/CE, possono esserci differenze significative. La direttiva ha limitato il contenuto di cromo nei cementi utilizzati come materiali per la preparazione di calcestruzzi; ne consegue che se il cemento utilizzato ha un minor contenuto di cromo anche il calcestruzzo finale seguirà lo stesso andamento;
- *tipologia di calcestruzzo*, strutturale o non strutturale: dipende dal quantitativo di cemento contenuto nel calcestruzzo, che a sua volta determina una minore o maggiore presenza di cromo.
- *riduzione delle dimensioni delle particelle di calcestruzzo*: tale riduzione comporta un aumento della superficie "scambiante" da cui deriva una maggiore tendenza al rilascio di elementi.

## 4.3. Produzione di calcestruzzo e manufatti cementizi con aggregati riciclati

### 4.3.1. Aspetti chimici

Per il confezionamento di calcestruzzi con aggregati riciclati (AR), dal punto di vista chimico ed ambientale, sono necessari determinati accorgimenti utili a garantire un prodotto finale con le caratteristiche e prestazioni attese. La composizione chimica degli AR è quindi un fattore di notevole importanza, anche se l'origine e le proprietà del materiale riciclato non sempre sono note.

In generale, nel calcestruzzo con AR, si registra un comportamento agli attacchi chimici (carbonatazione, attacco solfatico, attacco dei cloruri, ecc.) peggiore rispetto al calcestruzzo confezionato con aggregati naturali. Infatti, l'aumento della percentuale di AR in sostituzione agli aggregati naturali provoca un deciso aumento della vulnerabilità del conglomerato a causa della maggiore porosità e permeabilità degli AR. È necessario, dunque, conoscere attraverso l'analisi della composizione chimica il quantitativo dei diversi elementi chimici presenti.

*Silva et al. (2014)* hanno effettuato un'analisi completa degli esiti di 236 articoli pubblicati in un arco temporale di 38 anni, esaminando le principali proprietà chimiche di calcestruzzi con AR. L'analisi è stata sviluppata sulla base dei seguenti aspetti:

- **Composizione chimica**

Considerando la vasta gamma di ambienti e condizioni a cui i componenti degli AR sono stati esposti, è necessario conoscere la composizione chimica di questi materiali per realizzare AR di buona qualità e non compromettere, di conseguenza, le prestazioni del calcestruzzo.

- Contenuto di solfati

I solfati sono composti chimici provenienti prevalentemente dall'intonaco di gesso e dal cemento della malta aderente agli AR, che se messi a contatto con i componenti del calcestruzzo risultano potenzialmente reattivi e in grado di dare origine a reazioni espansive e degradanti, come ad esempio fessurazioni o espulsioni di porzioni consistenti di struttura.

Per questo motivo è indispensabile sottoporre gli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo ad un preventivo esame teso ad accertare l'assenza o il contenuto massimo di minerali solfatici potenzialmente pericolosi.

Tramite la norma UNI 8520-2, la quale stabilisce un contenuto massimo di solfati solubili in acido dello 0,2% (inteso come valore di concentrazione della soluzione secca), è possibile fare una valutazione dei dati contenuti nei diversi studi analizzati. In particolare, ipotizzando l'estrazione completa dei solfati partendo dalla concentrazione media di circa 5 g/kg (Tabella 30), pari allo 0,5%, avremmo un valore superiore al limite stabilito dello 0,2%. Ragionando però in modo più realistico, e valutando la concentrazione rispetto al test di cessione, i solfati estratti in acqua risultano pari a 2 g/kg, il che equivarrebbe ad uno 0,2%. Di conseguenza, è possibile stabilire un range di variazione dello 0,2%-0,5% superiore al limite indicato dalla norma.

Si precisa che tali valori derivano da dati di letteratura ottenuti da AR prodotti da rifiuti da demolizione misti nei quali la presenza di gesso, materiali ceramici e laterizi può contribuire al loro rilascio.

A conferma dell'influenza che l'eterogeneità del materiale può avere sul rilascio di tale inquinante, vi sono i dati forniti da alcuni gestori da cui emerge che il contenuto di solfati è pari allo 0,1%.

- Contenuto di cloruri

Il contenuto di cloruri deve essere sempre controllato, in quanto può portare alla corrosione delle barre di rinforzo (anche se generalmente rispetta i limiti imposti).

In caso di necessità, sono state studiate diverse possibili soluzioni per ridurre i quantitativi di cloruri.

Tra le più semplici vi è quella del lavaggio ad acqua del rifiuto C&D, un metodo rapido ed efficace in quanto i cloruri non sono legati alla microstruttura cementizia e quindi sono facilmente rimovibili.

Dopo un accurato lavaggio o la totale immersione in acqua per almeno 2 settimane (*Martín-Morales et al., 2010*), la quantità di cloruro decrementa fino al punto tale da consentire l'utilizzo di aggregati riciclati nel calcestruzzo strutturale senza rischio di corrosione.

La norma UNI 8520-2 stabilisce un valore limite dello 0,03%, inteso come valore di concentrazione della sostanza secca. Dai dati della composizione chimica e test di cessione si hanno valori variabili in un range di 0,014% - 0,035%.

Ai fini della durabilità è importante che il cloruro complessivo nel calcestruzzo sia inferiore a quanto indicato dalla norma UNI EN 206, la quale stabilisce una verifica sul contenuto di cloruri solubili in acqua in rapporto al dosaggio di cemento, con un limite per i calcestruzzi armati dello  $0,2 \div 0,4\%$ .

A titolo esemplificativo, da un dosaggio di cemento di  $300 \text{ kg/m}^3$ , un quantitativo di aggregati riciclati di  $2000 \text{ kg/m}^3$  e di cloruri solubili in acido acetico pari a  $140 \text{ mg/kg}$  (si assume per il calcolo l'estrazione in acido acetico che è maggiore rispetto all'acqua) risulta una percentuale di cloruri pari allo 0,093% (ampiamente entro il limite).

Dai dati di eluizione in acqua forniti da alcuni gestori ( $\approx 57 \text{ mg/L}$ ) si nota, invece, come la percentuale di concentrazione sia pari allo 0,38%, ovvero prossima al limite. Questo conferma la necessità di effettuare il trattamento di lavaggio dei rifiuti C&D a monte del processo.

- Contenuto di alcali

La presenza di alcali, spesso provenienti dal cemento e dalla silice reattiva all'interno degli aggregati, può portare ad una reazione espansiva alcali-aggregato, ovvero a una delle forme di degrado chimico del calcestruzzo.

Di fronte a porzioni di calcestruzzo frantumato occorre, pertanto, prestare attenzione alle frazioni di cemento idratato presenti e al relativo contenuto di alcali.

- **Massa Volumica**

La massa volumica è un parametro variabile in funzione del tipo di materiale C&D da cui è originato l'aggregato (laterizi, calcestruzzi, materiali ceramici), influenzata anche dal processo di selezione e frantumazione applicato. Durante questa fase, se ben eseguita, è possibile eliminare una buona parte delle malte aderenti agli aggregati, che hanno una densità molto bassa, ed ottenere di conseguenza un aggregato con elevata densità.

È stato rilevato come i valori di massa volumica degli aggregati provenienti da materiali ceramici (RMA) sono normalmente inferiori a quelli degli aggregati provenienti da calcestruzzo (RCA), questo a causa del loro livello di porosità superiore.

Inoltre, le **miscele di calcestruzzo** con un grado di resistenza elevato, richiedendo un maggior contenuto di cemento in fase di progettazione, portano ad una minore porosità della miscela finale e quindi ad un aumento di densità degli aggregati risultanti. Da alcuni studi è emerso anche che gli aggregati da calcestruzzo (RCA) con resistenza alla compressione variabile, sottoposti a procedure di riciclaggio simili, presentano valori di densità sostanzialmente simili.

Per quanto riguarda, invece, gli aggregati da **materiali ceramici (RMA)**, è stata trovata una correlazione tra la massa volumica e la resistenza a compressione dei mattoni originari, con la massa volumica degli aggregati risultanti. È stato, infatti, dimostrato che i mattoni di argilla con maggior resistenza alla compressione hanno prodotto aggregati con valori di massa volumica superiori.

Sulla base di queste informazioni, unendo le due tipologie di aggregati RCA e RMA, si ha che la massa volumica degli aggregati risultanti aumenta con il contenuto di aggregato da calcestruzzo (indipendentemente dalla resistenza del materiale sorgente) e, al contrario, diminuisca con il contenuto di aggregati ceramici, tanto più se la resistenza del materiale sorgente è relativamente scarsa.

- **Assorbimento d'acqua**

Quando si utilizzano gli AR è necessario adottare alcune precauzioni a causa della loro porosità notevolmente superiore a quella degli aggregati tradizionali.

I laterizi, le malte e le particelle fini rappresentano gli elementi che contribuiscono maggiormente al comportamento di assorbimento dell'aggregato.

Il grado di assorbimento di acqua dipende sia dal tipo di materiale che dal processo di trattamento. In merito, è interessante far notare come anche il processo di lavaggio dei rifiuti da C&D di partenza frantumati, possa essere efficace ai fini della riduzione dell'assorbimento, garantendo una pre-saturazione dell'aggregato. I dati di uno studio hanno difatti dimostrato che, dopo il lavaggio del rifiuto, i valori di assorbimento sono diminuiti addirittura del 35% e del 55%. Questo perché le particelle fini, che conferivano valori di assorbimento piuttosto elevati, sono state rimosse.

Tale fattore risulta, pertanto, essere un elemento chiave, in quanto il rapporto acqua-cemento è uno degli aspetti fondamentali nella definizione delle proprietà del calcestruzzo, perché influenza la resistenza meccanica a compressione e incide notevolmente anche sulla lavorabilità. Da ciò ne deriva che un maggior assorbimento d'acqua incide sulla giusta calibrazione di tale rapporto in fase di progettazione della miscela.

Ulteriori proprietà dell'AR, descritte in letteratura, sono state successivamente confrontate e valutate allo scopo di effettuare delle proposte di correlazione tra di esse. Sono, allora, state indagate nello specifico: la densità in seguito ad essiccamento in forno (ODD) e l'assorbimento d'acqua (WA).

Dall'analisi statistica (eseguita su 589 campioni di aggregati differenti per forma, dimensioni e origine) è emerso che esiste una relazione tra ODD e WA dovuta principalmente alla porosità del materiale: con l'aumentare della porosità la capacità di assorbire acqua aumenta, mentre la densità diminuisce (Figura 34).

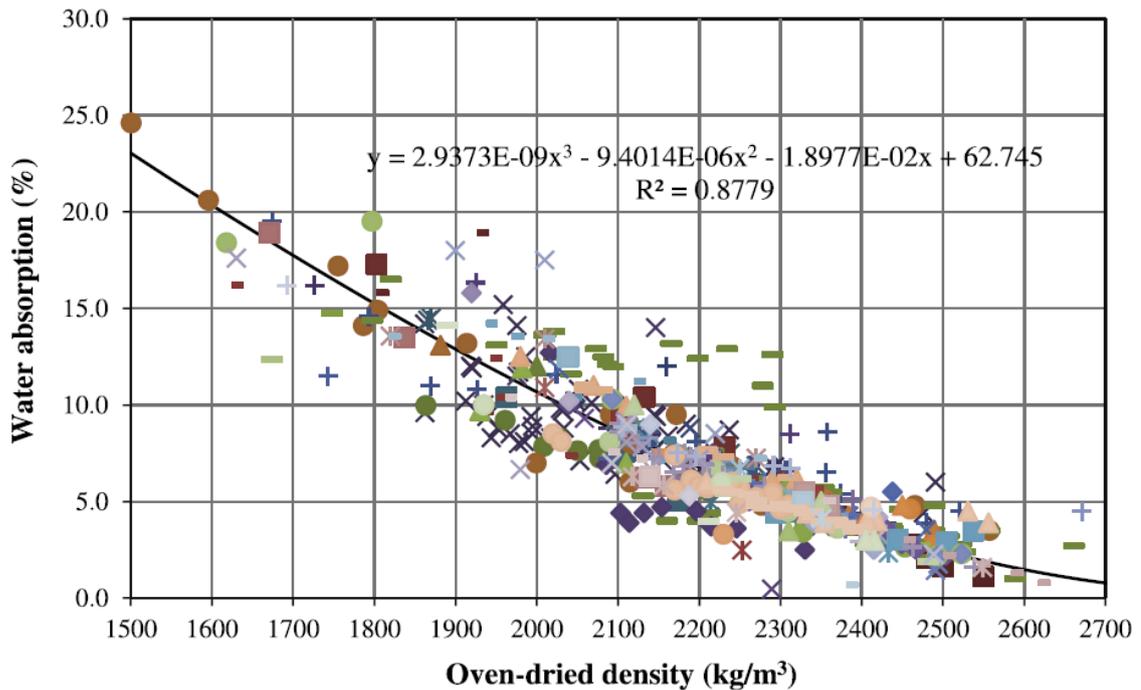


Figura 34: Relazione tra assorbimento d'acqua e densità dopo essiccamento. (Silva et al., 2014)

Da un punto di vista statistico, anche se i risultati mostrano una certa dispersione, è possibile affermare la presenza di una forte correlazione tra le due variabili.

Dalla Figura 35, che mette in evidenza le differenze tra aggregato riciclato fine e grossolano, è possibile avanzare alcune considerazioni sulle curve di regressione polinomiale: esse suggeriscono come per lo stesso valore di densità dopo l'essiccamento (ODD), gli aggregati fini presentino un valore superiore di assorbimento rispetto agli aggregati grossolani.

Questa differenza, tuttavia, è marginale e può essere attribuita a differenze nei metodi di prova, o anche ad errori sperimentali vissuti da diversi ricercatori nella determinazione del grado di assorbimento degli aggregati fini. Sulla base di quest'ultima considerazione è possibile affermare che gli aggregati fini e grossolani hanno comunque un comportamento simile in termini di relazione WA e ODD.

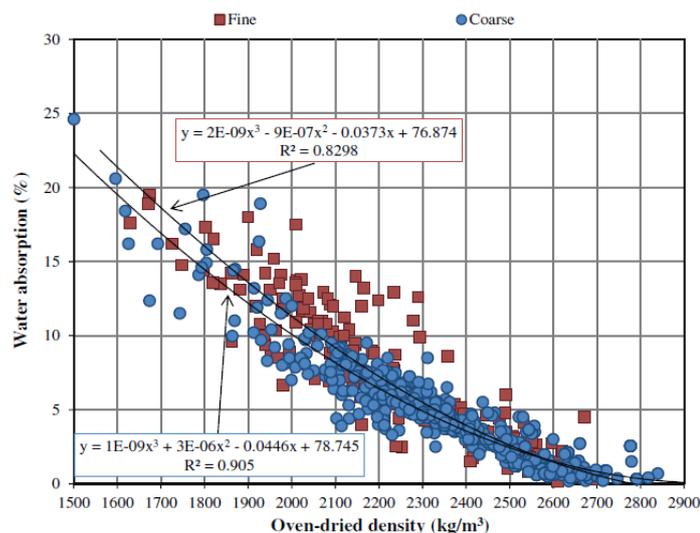


Figura 35: Relazione tra densità dopo essiccazione e assorbimento d'acqua tra materiali fini e grossolani. (Silva et al., 2014)

A seguito della dimostrazione della buona correlazione tra le proprietà, è stato possibile, a conclusione del lavoro, realizzare un sistema di classificazione degli aggregati riciclati in modo tale da stimare la probabilità di ottenere un aggregato appartenente ad una determinata classe, in base alla densità dopo essiccazione ed assorbimento d'acqua (come mostrato in Figura 36 e Figura 37).

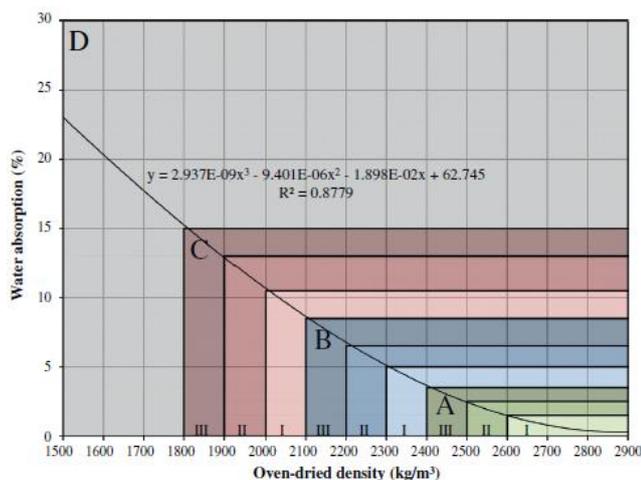


Figura 36: Classificazione degli aggregati in base la relazione tra WA e ODD (Silva et al., 2014)

Aggregate class	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Minimum oven-dried density (kg/m <sup>3</sup> )	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	No limit
Maximum water absorption (%)	1.5	2.5	3.5	5	6.5	8.5	10.5	13	15	
Maximum LA abrasion mass loss (%)	40			45			50			

Figura 37: Requisiti per le proprietà fisiche di appartenenza alle diverse classi (Silva et al., 2014)

Dalla classificazione si evince che gli aggregati grossolani spesso appartenenti alla classe A (in cui risiedono anche i naturali e quindi di buona qualità) vengono considerati i più adatti da utilizzare nella produzione di calcestruzzo.

### 4.3.2. Prestazioni tecniche

In merito alle prestazioni tecniche e meccaniche dei calcestruzzi realizzati con aggregati riciclati è stato possibile definire, attraverso l'analisi bibliografica, un quadro generale esaustivo delle differenti applicazioni-studio realizzate nel corso degli anni.

Innanzitutto è necessario identificare la **percentuale di sostituzione ottimale** poiché, come è stato mostrato da precedenti studi, una sostituzione totale degli aggregati naturali con quelli di riciclo ha portato a esiti non soddisfacenti dal punto di vista meccanico, mentre sostituzioni minime del 10% o 20% hanno generato un calcestruzzo di buona qualità.

La percentuale ottimale identificata è del 30%, la quale rappresenta il miglior compromesso tra un buon utilizzo di materiale e buone prestazioni meccaniche.

La dimensione di AR più utilizzata è quella compresa tra i 4-5 mm e i 22 mm. Vi sono stati casi in cui sono state testate particelle di dimensioni inferiori (ovvero parti considerate fini) e particelle di dimensioni superiori, fino ad una dimensione di 31,5 mm, i cui risultati hanno però evidenziato minori prestazioni meccaniche e fisiche.

Un ulteriore elemento da mettere preliminarmente in conto è la **qualità degli aggregati**, il che rappresenta un fattore determinante per le proprietà finali: i migliori AR sono quelli il più possibile omogenei formati dal solo calcestruzzo demolito. Al contrario, elementi eterogenei influiscono non poco sulla qualità del materiale finale.

Senza dubbio la qualità migliore di aggregati è stata fornita da impianti con tecnologia selettiva (tipo R.O.S.E) ai quali si avvicinano i soli che hanno avuto una vagliatura più accurata.

Passando all'analisi delle principali proprietà degli AR, è di sicura importanza la **forma**: gli aggregati caratterizzati da una forma più tondeggiate sono migliori rispetto a quelli spigolosi che assorbono maggiormente acqua e richiedono una maggiore fluidità dell'impasto per distribuirsi omogeneamente.

**L'assorbimento d'acqua** è anch'essa una proprietà importante: gli AR assorbono 3-4 volte più acqua degli aggregati naturali. Quando la porosità del materiale è maggiore, la massa volumica risulta normalmente inferiore: dai 2.2 g/cm<sup>3</sup> sino ai 2.5 g/cm<sup>3</sup> (diminuzione della densità di circa il 7%), preannunciando una resistenza a compressione inferiore. Queste caratteristiche hanno un effetto diretto sul comportamento del calcestruzzo allo stato fresco (in termini di lavorabilità) che attesta una perdita di lavorabilità più veloce del calcestruzzo tradizionale. Ulteriore elemento da non trascurare per ottenere un prodotto migliore è la vibratura meccanica, in quanto una compattazione insufficiente può comportare una notevole diminuzione di resistenza. I calcestruzzi con AR hanno altresì una maggior tendenza alla segregazione ed al fenomeno di risalita dell'acqua ("bleeding"). Dalla prova Los Angeles emerge, inoltre, come essi siano assimilabili a rocce tenere, con una scarsa resistenza ad impatto ed abrasione.

Si precisa che nella maggior parte delle prove sperimentali gli aggregati sono stati utilizzati in condizione satura con superficie asciutta, in modo tale che non assorbissero acqua necessaria all'idratazione del cemento e permettessero un calcolo più preciso dei rapporti acqua/cemento.

Passando al **comportamento meccanico**, sono state analizzate prove di resistenza a compressione, trazione e di modulo elastico oltre all'analisi del ritiro igrometrico.

La resistenza a compressione, in caso di sostituzione parziale di circa il 30%, subisce una riduzione di circa il 10% rispetto al calcestruzzo con aggregati naturali. Tale decremento può essere maggiore in caso di sostituzione degli aggregati più fini. Un aumento di resistenza si osserva, invece, con il miglioramento della qualità dell'aggregato riciclato e con la riduzione della percentuale di sostituzione. La resistenza a compressione viene solitamente valutata a 28 giorni di maturazione. Nelle sperimentazioni più accurate sono state verificate le resistenze a date di maturazione differenti, sino a 365 giorni.

La resistenza a trazione segue di pari passo quella a compressione, subendo in caso di sostituzione parziale un decremento del 10%, creando il cosiddetto effetto "pinching" ovvero una tendenza alla fessurazione maggiore dovuta al minor ingranamento degli aggregati di riciclo. Il modulo elastico subisce anch'esso un decremento fino ad un massimo del 20%, dovuto principalmente all'interfaccia tra la vecchia malta degli aggregati riciclati e quella del nuovo impasto.

Per quanto riguarda la resistenza a flessione, la percentuale di AR influenza in minima parte la resistenza dell'elemento, producendo perdite poco significative.

Per quanto riguarda la permeabilità all'acqua, la resistenza agli agenti aggressivi, ai cloruri ed all'ossigeno, il calcestruzzo di riciclo mostra una **durabilità** equivalente al naturale negli aspetti considerati. Fattore principale, in tema di durabilità, è il ritiro igrometrico che merita una premessa: le condizioni in cui esso è stato analizzato (differenti rispetto a quelle meccaniche) erano a temperatura e umidità costanti, attorno ai 22°C ed al 50-60% di umidità, o in taluni casi a temperatura ambiente. Il ritiro igrometrico dei calcestruzzi di riciclo è maggiore rispetto a quello naturale e questo aumenta con l'aumentare della percentuale di sostituzione degli aggregati. A titolo indicativo, su di un calcestruzzo con una sostituzione del 70% dell'aggregato naturale con quello riciclato, a 100 giorni dal getto e senza l'aggiunta di additivi riduttori del ritiro, è stato rilevato un accorciamento di 250 µm/m del campione di riferimento.

Menzione a parte va fatta per i calcestruzzi che oltre a contenere aggregati grossolani di riciclo contengono anche altri materiali in aggiunta che ne modificano il comportamento. Ad esempio l'AR viene utilizzato anche in sostituzione della parte fine, in tale caso però si è riscontrata una qualità inferiore del calcestruzzo caratterizzato da un'ulteriore perdita della resistenza a compressione.

In un altro esperimento è stata, invece, utilizzata la cenere volante in parziale sostituzione della matrice fine da cui è conseguito che nei calcestruzzi di riciclo si è ottenuta una resistenza a compressione maggiore rispetto all'AR naturale. Quest'effetto si è percepito verso i 28 giorni di maturazione in quanto il tempo di reazione della cenere volante è più lento.

Ultimo caso ha riguardato una sostituzione del 10% dell'aggregato naturale fine con la polvere di vetro, con una granulometria variabile dai 75 µm ai 450 µm. Tale aggiunta ha avuto un effetto benefico sia sulla resistenza a compressione che a trazione. Aumentando la granulometria della polvere o aumentandone il quantitativo si è, invece, ottenuto un effetto negativo.

Il buon risultato di un calcestruzzo confezionato con AR dipende, perciò, dalla variabilità, per qualità e composizione, degli AR (che dipende dalle macerie di provenienza degli stessi)

nonchè dal periodo di edificazione e dalla localizzazione territoriale dell'opera demolita. Pertanto, è fondamentale conoscere le caratteristiche di origine dell'AR che lo compone.

Gli AR non sono materiali omogenei, ma sono costituiti da una miscela di grani di natura diversa.

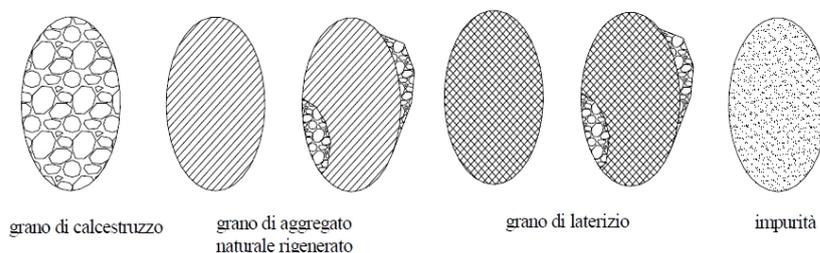


Figura 38: Tipologie di aggregati di riciclo

E' necessario, però, operare una distinzione tra AR provenienti dalla demolizione di solo calcestruzzo ed AR "tout venant" provenienti da macerie eterogenee. Un'analisi visiva degli AR permette di distinguere i grani di solo calcestruzzo, dagli aggregati naturali ricoperti di vecchia malta cementizia ed aggregati naturali più puliti che possono avere piccoli residui di malta. Entrambi i tipi di AR hanno un peso specifico inferiore a quello degli aggregati naturali (2500-2800 kg/m<sup>3</sup>) a causa della malta cementizia che vi rimane attaccata. La malta cementizia è un materiale poroso la cui porosità dipende dal rapporto a/c del calcestruzzo originario o dalla malta utilizzata per la realizzazione delle murature.

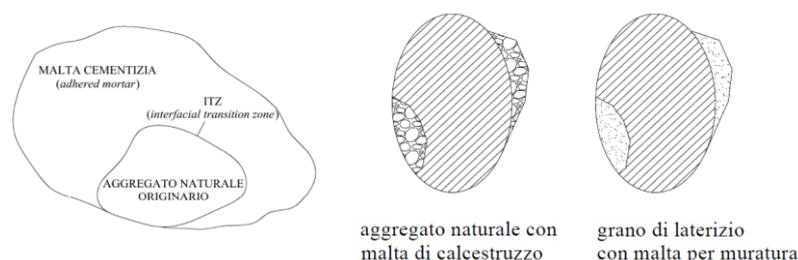


Figura 39: Composizione di un aggregato di riciclo.

Gli AR "tout venant", a loro volta, hanno un peso specifico leggermente inferiore a quello degli AR provenienti dal solo calcestruzzo. Il minor peso degli aggregati provenienti da macerie può essere correlato alla presenza di elementi più leggeri quali laterizi e altre impurità. La presenza della malta cementizia influisce sulle proprietà finali di questo tipo di aggregati. In particolare, maggiore è il quantitativo di malta cementizia nell'AR e minore è la sua qualità. La stima di malta cementizia che aderisce all'AR viene calcolata come percentuale sul peso totale degli AR attraverso una ricognizione visiva ed indagine al microscopio oppure attraverso dissoluzione in acido cloridrico.

Il quantitativo di malta cementizia attaccata all'aggregato naturale originario è direttamente proporzionale alla resistenza meccanica del calcestruzzo originario.

Un ulteriore fattore che può incidere sulla qualità finale dell'AR è la scelta del processo di frantumazione. Da alcuni studi effettuati è infatti emerso che se il materiale demolito viene sottoposto ad una frantumazione in più fasi, la riduzione del quantitativo di malta cementizia presente è maggiore.

Anche l'assorbimento d'acqua (proprietà che maggiormente differenzia gli aggregati naturali da quelli riciclati) dipende dalla quantità e qualità della malta cementizia attaccata all'aggregato originale naturale. Gli AR denotano un aumento dell'assorbimento d'acqua del 5% per gli aggregati grossi e del 10% per quelli fini.

In generale l'assorbimento per le sabbie è di circa 1,50% – 3,50%, per il pietrisco 1% – 4,50%, per il granito 0,80% – 1,20%, per le pietre calcaree 0,50% – 0,75%, mentre negli AR assume valori compresi prevalentemente tra 3% – 8% per la frazione grossa e tra 8% – 15% per la frazione fine.

Durante la fase di preparazione della miscela del calcestruzzo, se il quantitativo d'acqua definito dal rapporto a/c non viene adeguatamente corretto, gli AR, per raggiungere la condizione di superficie satura asciutta, generalmente assorbono più acqua sottraendola alla miscela ed alterando così il rapporto a/c.

Per limitare i problemi dovuti all'alto assorbimento si consiglia, dunque, di bagnare gli aggregati prima di miscelarli ad altri componenti. Le proprietà fisiche degli AR (peso specifico e assorbimento d'acqua) vengono amplificate nella frazione fine a causa della maggior quantità di malta cementizia presente. Ne consegue che per il confezionamento di calcestruzzi è da preferire l'utilizzo di sabbia naturale in sostituzione di quella di riciclo.

*Corinaldesi et al.* hanno condotto sperimentazioni da cui è risultato, invece, che l'utilizzo della frazione fine di materiali di riciclo permette di realizzare malte con buone caratteristiche meccaniche e di aderenza ai mattoni.

Un ulteriore punto debole degli aggregati riciclati è la presenza di microfrazture dovute alle operazioni di frantumazione. Tali fratture sono visibili attraverso l'utilizzo di microscopi che indagano la superficie del granulo, appositamente sezionata lungo un piano, levigata con polvere di diamante e trattata con liquido fluorescente.

Nel caso di aggregati provenienti da solo calcestruzzo, le fessure possono interessare:

- il vecchio aggregato;
- la vecchia matrice cementizia;
- l'interfaccia aggregato-matrice.

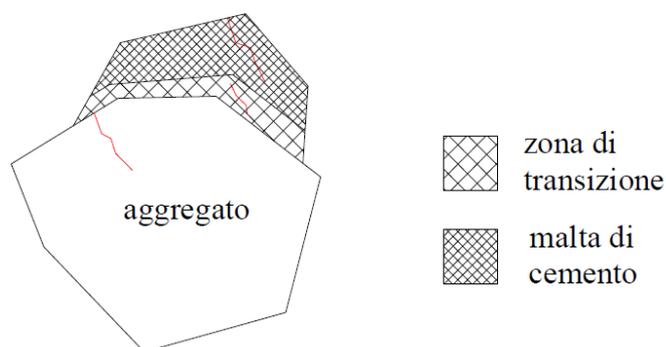


Figura 40: Possibili fratture di un aggregato riciclato

Altro aspetto è il maggior contenuto di polveri: da esami al microscopio elettronico è emerso che più la superficie è disseminata di minuscole particelle, più viene a ridursi la qualità dell'AR. Queste particelle sono eliminabili mediante bagni ad ultrasuoni.

Sono in atto tecnologie migliorative per quanto concerne la frantumazione, con l'obiettivo di staccare la malta cementizia dagli aggregati del calcestruzzo demolito attraverso frantoi disposti in sequenza o per collisione tra gli stessi aggregati.

Riportiamo in modo schematico la composizione del calcestruzzo confezionato con gli aggregati riciclati "tout venant" e con aggregati riciclati di solo calcestruzzo.

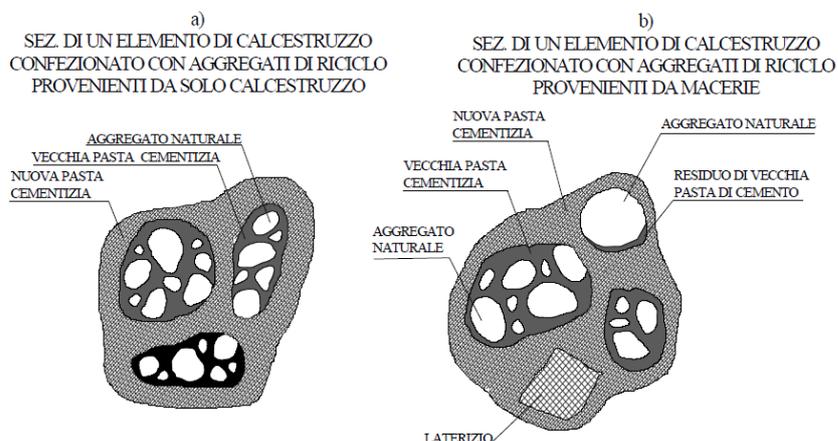


Figura 41: Calcestruzzo confezionato con gli aggregati di riciclo "tout venant" (b) e calcestruzzo con aggregati di calcestruzzo riciclato(a)

#### 4.3.3. Esperienze bibliografiche

Nel presente capitolo è riportata una review bibliografica degli articoli analizzati sulla realizzazione di calcestruzzo con aggregati riciclati e relative applicazioni strutturali. Gli articoli elaborati sono stati molteplici, sia a livello nazionale che internazionale.

Tra questi, è stato dato risalto ai documenti redatti da Alice Toffano e Letelier-Moriconi in quanto particolarmente completi ed esaustivi dal punto di vista tecnico.

Per un ulteriore approfondimento si rimanda all'Allegato B).

- COPPOLA L., MONOSI S., SANDRI S., BORSOI A., "Riciclaggio delle strutture di c.a. e c.a.p. demolite per il confezionamento di nuovi calcestruzzi", Italia, 1995
- CORINALDESI V., MORICONI G., "I materiali inerti da demolizioni nelle malte e nei calcestruzzi: nuove prospettive", Italia, 2002
- CORINALDESI V., MORICONI G., "Riciclaggio dei materiali da demolizione nella produzione del calcestruzzo", Italia, 2005
- TOFFANO A., "Caratterizzazione petrochimica e petrofisica di materiali inerti secondari da costruzione e demolizione, per la realizzazione di impasti ceramici ordinari e calcestruzzi", Italia, Tesi di Dottorato 2006
- CORINALDESI V., MORICONI G., "Utilizzazione di aggregati in calcestruzzo riciclato in prefabbricazione", Italia, 2007
- FERRARI G., MOROTTI A., "Prospettive d'impiego dei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati", Italia, 2008

- RICHARDSON A., ALLAIN P., VEUILLE M., *“Concrete with crushed, graded and washed recycled construction demolition waste as a coarse aggregate replacement”*, Inghilterra/Francia, 2010
- LA MARCA F., MARCOCCIO C., ZAMBITO P., *“Calcestruzzo strutturale con aggregati riciclati”*, Italia, 2011
- CAGGIANO A., FAELLA C., LIMA C., MARTINELLI E., PEPE M., REALFONZO R., *“Calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati e cenere volante: risultati di una recente campagna sperimentale”*, Italia, 2012
- WAGIH A.M., EL-KARMOTY H.Z., EBID M., OKBA S.H., *“Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete”*, Egitto, 2012
- THOMAS C., SETIEN J., POLANCO J.A., ALAEJOS P., SANCHEZ DE JUAN M., *“Durability of recycled aggregate concrete”*, Spagna, 2012
- MANZI S., MAZZOTTI C., BIGNOZZI M.C., *“Concrete Demolition Waste: Sustainable Source for Structural Concrete”*, Italia, 2013
- AHMED SHAIKH F.U., NGUYEN H.L., *“Properties of concrete containing recycled construction and demolition wastes as coarse aggregates”*, Australia, 2013
- LETELIER V., MORICONI G., *“L’effetto degli aggregati in calcestruzzo riciclato sul comportamento di nodi trave-pilastro in c.a. sotto l’azione di carichi ciclici”*, Italia, 2015
- MORICONI G., *“Calcestruzzo strutturale con aggregati riciclati”*, Italia, 2016
- ZORDAN A., PELLEGRINO C., FALESCHINI F., ZANINI M.A., PASINATO S., *“Eco-aggregati riciclati: performance meccaniche e sostenibilità ambientale”*, Italia, 2016
- LETELIER V., TARELA E., OSSES R., CÀRDENAS J.P., MORICONI G., *“Mechanical properties of concrete with recycled aggregates and waste glass”*, Cile, 2016

- **ALICE TOFFANO, Caratterizzazione petrochimica e petrofisica di materiali inerti secondari da costruzione e demolizione, per la realizzazione di impasti ceramici ordinari e calcestruzzi, Italia, Tesi di Dottorato 2006.**

Con tale ricerca si è voluta verificare dapprima la possibilità di utilizzo di frazioni fini di aggregati riciclati per la produzione di laterizi, andando a realizzare miscele ceramiche nelle quali vengono introdotte queste frazioni di inerti riciclati, e successivamente per il confezionamento di calcestruzzi.

Per riuscire a valutare pienamente queste due possibilità di riutilizzo, i materiali da riciclo sono stati caratterizzati secondo le normative di settore e confrontati con quelli naturali, in modo da determinare nella maniera più precisa possibile quale influenza possano avere nelle miscele che si sono andate a realizzare.

Il rifiuto derivante dai processi di costruzione e demolizione è composto da materiali di diversa natura quali: mattoni e materiali in terracotta, calcestruzzo, legno, asfalto, plastica, carta, parti in gomma e materiali fini incoerenti provenienti da malta e calcestruzzo. Si è, quindi, innanzitutto cercato di stimare la percentuale con la quale i vari elementi si presentano nel materiale accumulato in ingresso all'impianto.

<b>COMPONENTI</b>	
Mattoni e materiali in terracotta	48%
Calcestruzzo	20%
Legno	2%
Metalli	3%
Plastica, carta e gomma	0.5%
Asfalto	1%
Materiali fini incoerenti provenienti da malta e calcestruzzo	25.5%
<b>TOTALE</b>	<b>100%</b>

*Tabella 38: Percentuale dei vari componenti nei materiali conferiti nel centro di riciclaggio.*



*Materiale non vagliato (sinistra) e riciclato 60-30 mm (destra)*



*Materiale riciclato 30-0 mm (sinistra) e sabbia riciclata <6 mm (destra).*

*Figura 42: Materiali campionati dal centro di riciclaggio.*

Dai cumuli di materiale sono stati prelevati all'incirca 300 kg di materiale per tipologia e più precisamente:

- 300 kg dal cumulo del materiale che non subisce alcuna vagliatura successiva, ma che viene solamente frantumato con il frantoio. Tale materiale presenta una frazione granulometrica massima pari a 60 mm.
- 300 kg da ciascuno dei tre cumuli che si formano in seguito al processo di vagliatura, effettuato dopo la frantumazione:
  - cumulo frazione 60-30 mm, denominato “materiale riciclato 60-30”;
  - cumulo frazione 30-0 mm, denominato “materiale riciclato 30-0”;
  - cumulo frazione < 6mm, denominato “sabbia riciclata”.

In seguito al prelievo dei materiali si è proceduto con l'esecuzione di trattamenti per la riduzione della dimensione dei campioni e opportune analisi di laboratorio per ottenere dati petrochimici e diffrattometrici.

Nello specifico caso dei calcestruzzi, sono stati realizzati degli impasti preliminari attraverso i quali è stato possibile individuare sia la composizione ottimale del conglomerato, che l'eventuale additivo meglio compatibile con il tipo di materie prime utilizzate. Definito l'impasto si è eseguita la completa caratterizzazione fisica-meccanica dei calcestruzzi prodotti attraverso le seguenti misure, distinte a seconda del calcestruzzo fresco o indurito.

Calcestruzzo fresco:

- Massa volumica (UNI EN 12350-6);
- Contenuto d'aria (UNI EN 12350-7);
- Prova di abbassamento del cono a 0, 15 e 30 min dalla fine della miscelazione (UNI EN 12350-2);
- Prova di spandimento alla tavola a scosse a 0, 15 e 30 min dalla fine della miscelazione (UNI EN12350-5).

Calcestruzzo indurito:

- Massa volumica (UNI EN 12390-7);
- Resistenza alla compressione (UNI EN 12390-3);
- Ritiro igrometrico (UNI EN 12390-6).

Per la qualità dell'impasto finale, l'elemento che gioca un ruolo fondamentale è rappresentato dagli aggregati, le cui prestazioni influiscono notevolmente sulla durabilità e sulle resistenze meccaniche del calcestruzzo (con essi confezionato).

L'autore ha quindi sviluppato, in questa prima fase, la cosiddetta "analisi granulometrica" per vagliatura attraverso l'utilizzo di setacci o crivelli, con fori di apertura tali da coprire un certo intervallo dimensionale. E' stato così ottenuto un grafico che riporta in ascisse l'apertura dei setacci (mm) ed in ordinate la percentuale di aggregato riciclato passante o trattenuto che si ottiene tramite differenza tra 100 e la % del passante cumulativo (curva granulometrica dei trattenuti). In questo studio sono stati utilizzati setacci appartenenti alla "serie base" più quelli della "serie 2".

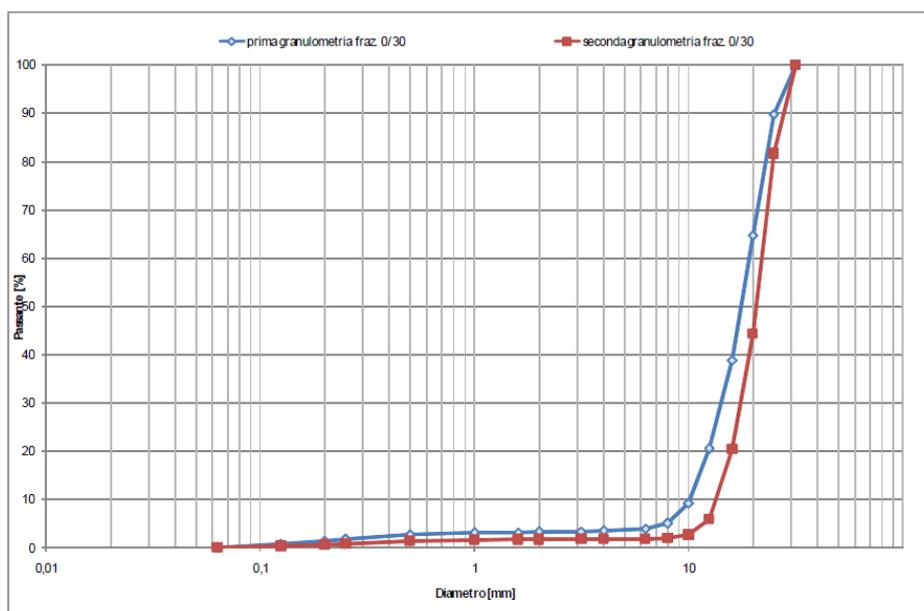


Figura 43: Analisi granulometrica materiale riciclato frazione 0-30 mm.

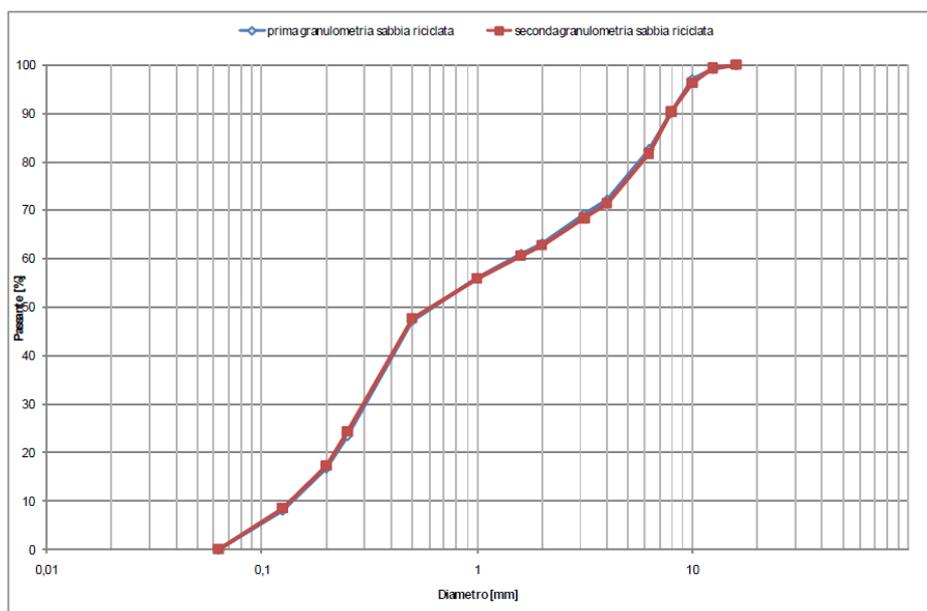


Figura 44: Analisi granulometrica sabbia riciclata.

Da quest'analisi effettuata sia sugli AR fini che grossolani è possibile notare che l'aggregato definito "Materiale riciclato frazione 0-30 mm" è piuttosto omogeneo e corrisponde ad una ghiaia, mentre l'aggregato "Sabbia riciclata" è più eterogeneamente distribuito dal punto di vista dimensionale e può essere definito come una sabbia grossolana.

La reologia del calcestruzzo è influenzata, oltre che dalla distribuzione granulometrica, anche dalla forma dell'AR, dallo stato di usura degli spigoli dell'elemento lapideo e dalla tessitura superficiale dei granuli.

La forma individua la prevalenza di una dimensione dell'AR rispetto alle altre e questa caratteristica può essere quantificata attraverso l'indice di forma (UNI EN 933-4), definito come:

$$SI = (M1/M2) \cdot 100$$

dove:

- M1 è la massa del campione di prova;
- M2 è la massa dei granuli non cubici.

Nel confezionamento del calcestruzzo si deve considerare che AR contraddistinti da indici di forma maggiori di 15 sono caratterizzati da una maggiore superficie specifica rispetto agli inerti pressoché sferici. Ciò significa che per avere la stessa lavorabilità del calcestruzzo fresco, l'impiego di AR a forma spigolosa comporta una maggior richiesta d'acqua di impasto (e quindi un diverso dosaggio di cemento), perché la scorrevolezza fra i diversi elementi è minore.

Per classificare in modo accurato le forme delle particelle è stato adottato il metodo di Zingg (1935). Questo metodo individua con "a" la dimensione dell'asse maggiore del ciottolo, con "b" la massima dimensione perpendicolare ad a, e con "c" la massima dimensione normale al piano ab. In base alla loro forma i ciottoli possono essere assegnati a diverse classi: discoidali, sferoidali, piatti e allungati, allungati.

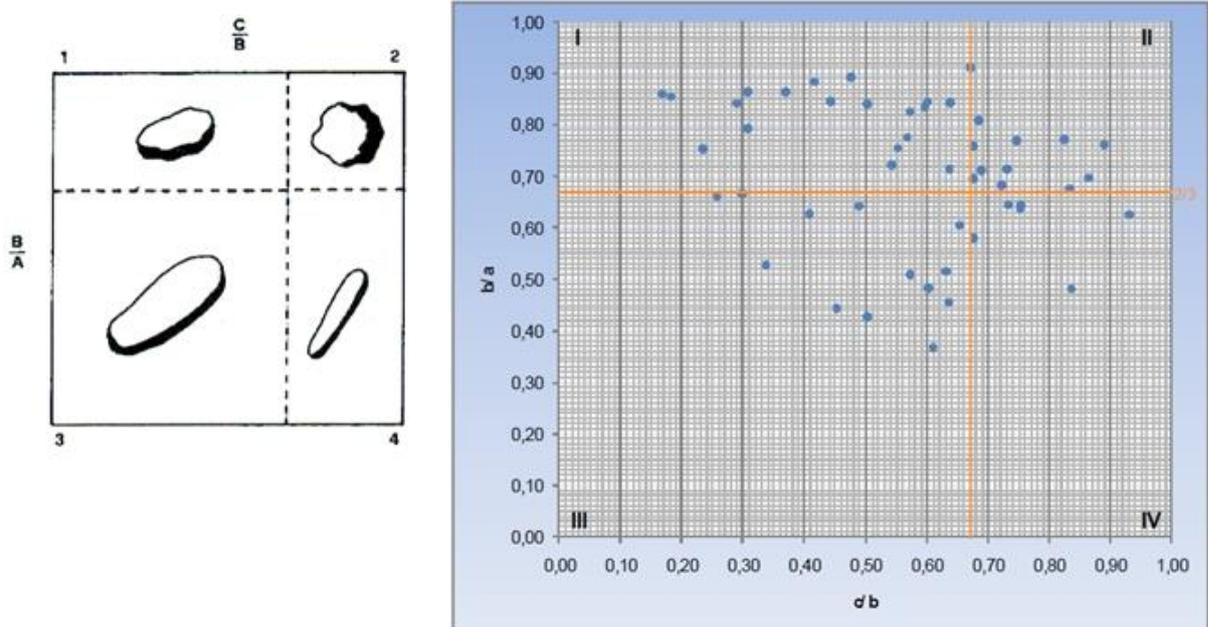


Figura 45: Diagramma di Zingg generale (sinistra) ed ottenuto dall'analisi dei campioni (destra).

Dal diagramma ottenuto la forma prevalente dei granuli di AR è quella che ricade nel primo quadrante, discoidale, seguita in eguale misura dalla forma sferica e lamellare del secondo e terzo quadrante, ed in misura inferiore dalla forma allungata del quarto quadrante.

Ulteriore caratteristica d'interesse è rappresentata dalla qualità degli elementi piatti, stimati attraverso l'indice di appiattimento (UNI-EN 933-3), che rappresenta la percentuale di granuli che posseggono una delle dimensioni inferiore a circa 0,6 volte la dimensione media della frazione granulometrica cui essi appartengono.

$$FI = (M1/M2) \cdot 100$$

dove:

- M1 è la somma dei granuli delle classi granulometriche di/Di in cui viene suddiviso per vagliatura;
- M2 è la somma delle masse dei granuli di ciascuna delle classi passanti ad uno speciale vaglio a barre cilindriche parallele che delimitano aperture rettangolari, distanti tra loro Di/2 e all'incirca 0,63 di.

M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	FI
9544,4	1903,7	19,95

Tabella 39: Valori misurati per il "materiale riciclato frazione 0-30 mm".

Sebbene la norma UNI 8520/2 non imponga alcun limite alla percentuale di elementi piatti, è evidente che un loro utilizzo eccessivo può accentuare, per la naturale tendenza degli stessi a disporsi secondo direzioni preferenziali, sia il comportamento anisotropo del calcestruzzo che il fenomeno del bleeding interno. Perciò, l'impiego di AR con indice di appiattimento superiore a 15 sarebbe da evitare.

Un'altra proprietà analizzata, che dipende dalla distribuzione granulometrica, è stata la massa volumica sia in mucchio che dei granuli. E' importante ottenere un calcestruzzo con massa volumica elevata, perché con questa aumentano, di solito, le resistenze meccaniche.

La massa volumica in mucchio dell'AR asciutto, definita dalla norma EN 1097-3, è stata determinata mediante pesate dopo l'essiccazione di AR contenuti in uno specifico recipiente e calcolando, quindi, il rapporto tra la massa del materiale ed il suo volume.

	Sabbia riciclata	Materiale riciclato frazione 0-30 mm
<b>Massa volumica in mucchio [mg/m<sup>3</sup>]</b>	1,40	1,04

Tabella 40: Massa volumica in mucchio degli aggregati di riciclo (EN 1097-3:1998).

Dal confronto tra i valori di massa volumica in mucchio ottenuti dagli aggregati di riciclo, oggetto dello studio, con i valori di letteratura di alcuni aggregati naturali, è facile intuire che la massa volumica degli aggregati di riciclo è piuttosto bassa.

Tipologie di materiale		Massa volumica in mucchio [mg/m <sup>3</sup> ]
ROCCE IGNEE	Granito, sienite e porfido di quarzo	1,35
	Diorite, gabbri e basalti	1,45
ROCCE SEDIMENTARIE	Calcere tenero	1,05
	Calcere compatto e dolomite	1,35
	Travertino	1,15
ROCCE METAMORFICHE	Gneiss	1,40
	Scisti, marmo e quarziti	1,35

Tabella 41: Massa volumica in mucchio di alcuni aggregati naturali.

La massa volumica dell'AR è caratteristica importante ai fini del proporzionamento del calcestruzzo e dalla valutazione di altre proprietà come permeabilità, assorbimento, gelività, resistenza meccanica e massa volumica del calcestruzzo finale.

Dato che gli inerti hanno una porosità sia chiusa che aperta (comunicante con la superficie) e che, inoltre, ci si può riferire agli aggregati accumulati disordinatamente, sono possibili diverse definizioni di massa volumica:

- Massa volumica reale media;
- Massa volumica media;
- Massa volumica media dell'aggregato saturo a superficie asciutta (s.s.a).

Per gli AR oggetto dello studio sono state determinate la massa volumica media e la massa volumica media dell'aggregato saturo a superficie asciutta mediante l'utilizzo di picnometri. Essendo la massa volumica definita come rapporto tra la massa del materiale ed il suo volume si è andati a determinare la massa per pesate del campione essiccato in stufa, ed il volume attraverso lo spostamento dell'acqua da parte delle particelle essiccate in un picnometro di volume noto. Dai risultati ottenuti, riportati nella Tabella 42, emerge un elevato assorbimento d'acqua:

Campioni	Massa volumica media [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa volumica media aggregato s.s.a [kg/m <sup>3</sup> ]	Assorbimento d'acqua [%]
Materiale riciclato frazione 0-30 mm	2080	2270	9,13
Sabbia riciclata	2136	2283	6,91

Tabella 42: Massa volumica media e media a superficie asciutta ed assorbimento.

Ultima proprietà fisica analizzata è stata la resistenza alla frammentazione, calcolata attraverso prova Los Angeles (LA). Tale prova si effettua in un cilindro rotante all'interno del quale viene fatto rotolare il campione di AR precedentemente preparato insieme a delle sfere di acciaio. Al campione vengono fatti compiere 500 giri ad una velocità compresa tra 31 e 33 giri al minuto con 11 sfere. Completata la rotazione viene determinata la quantità di materiale trattenuta da un setaccio con luce di maglia 1,6 mm.



Figura 46: Materiale e sfere prima della prova (sinistra) e materiale residuo dopo prova (destra).

La prova è stata eseguita solo sul materiale riciclato di frazione 0-30 mm e, confrontando il valore di LA ottenuto con i valori di coefficiente di resistenza alla frammentazione di alcune rocce naturali, è stato evidenziato che questo non è un valore molto alto, e pertanto assimilabile a rocce tenere; ne deriva che è un materiale poco resistente alla disgregazione per urto ed abrasione.

	<b>m [g]</b>	<b>LA [%]</b>
Materiale riciclato 0-30 mm	3133	37
Rocce ignee molto tenaci	-	10
Rocce basaltiche	-	20
Rocce calcaree compatte	-	20-30
Rocce tenere	-	>30

Tabella 43: Valori di prova LA per il materiale riciclato e per rocce naturali.

Successivamente alla prima fase di caratterizzazione degli AR utilizzati, sono stati realizzati diversi impasti preliminari col fine di individuare la composizione ottimale del conglomerato e l'eventuale additivo meglio compatibile con il tipo di calcestruzzo studiato.

Sono stati quindi prodotti 7 impasti di dimensioni ridotte pari a 30 litri. Nel progettare la composizione è stato deciso di miscelare gli inerti riciclati con frazioni di aggregato naturale identificato come "Sataf" (comunemente usato da Italcementi per testare i mix di calcestruzzo) ottenendo il seguente quantitativo di AR per ognuna delle miscele:

		impasti da 30 l						
		A	B	C	D	E	F	G
aggregati sataf	filler Cremaschi	2%	-	-	2%	-	-	-
	113	10%	5%	5%	10%	7,6%	8,3%	-
	103	13%	6,5%	6,5%	13%	10%	11%	-
	117F	7,5%	3,75%	3,75%	7,5%	5,7%	7,0%	-
	117R	7,5%	3,75%	3,75%	7,5%	5,7%	7,0%	-
	107	5%	2,5%	2,5%	5%	4%	5%	-
	109	25%	12,5%	12,5%	25%	19%	20%	-
	10.15	15%	15%	-	-	-	-	-
	15.20	10%	10%	-	-	-	-	-
aggregati diga	6,3-31,5	5%	5%	-	-	-	-	
aggregati riciclati	sabbia riciclata	-	36%	36%	-	18%	12%	70%
	mat. Riciclato 0/30	-	-	30%	30%	30%	30%	30%

Tabella 44: Percentuali di aggregati riciclati e naturali utilizzati nelle miscele prodotte.

L'impasto A risulta essere la miscela di riferimento con l'utilizzo di soli aggregati naturali, le 5 miscele B – C – D – E - F sono state realizzate sia con aggregati da riciclo che naturali, mentre la miscela G con soli aggregati di riciclo.

Ipotizzando di poter ottenere un calcestruzzo con lavorabilità S3-S4, a livello quantitativo e tecnico si è deciso di utilizzare un contenuto di acqua pari a 200 l/m<sup>3</sup>, in quanto il diametro massimo dell'AR raggiunge i 31,5 mm.

Per gli impasti è stato adoperato un cemento di tipo CEM II A/L 42,5, prevedendo un rapporto acqua/cemento pari a 0.66, per cui il quantitativo di cemento per mantenere tale rapporto dev'essere pari a 300 Kg/m<sup>3</sup>. Durante la miscelazione si è reso, inoltre, utile aggiungere piccoli quantitativi di additivo fluidificante solo per gli impasti che durante questa fase apparivano eccessivamente asciutti nonostante l'introduzione del quantitativo previsto di acqua progettato. Nello specifico, si è deciso di aggiungere l'additivo Creative L (Axim Italia), secondo quanto riportato in Tabella 46.

Impasto	A	B	C	D	E	F	G
Aggiunta di additivo	-	1,5%	1%	-	0,5%	0,5%	2%

Tabella 45: Percentuale di additivo aggiunto durante la fase di miscelazione.

Stabiliti gli ingredienti e la quantità, sono state realizzate le miscele di calcestruzzo usando una betoniera idonea ad impastare i litri di calcestruzzo progettato.

È importante ricordare che durante la fase di miscelazione degli ingredienti si è scelto di utilizzare gli aggregati riciclati previa saturazione d'acqua (questo per ovviare all'eventuale probabile sottrazione d'acqua di miscelazione) e quindi di ridurre l'acqua che serve alla reazione con il cemento. Oltre a saturare gli aggregati riciclati, si è poi proceduto a calcolare la reale aggiunta d'acqua, andando a togliere ai 200 l/m<sup>3</sup> ipotizzati, l'acqua di assorbimento dell'aggregato "Sataf". Nella Tabella 47 sono riportati i valori reali del rapporto acqua-cemento per ciascun impasto (a/c), che risultano inferiori al rapporto ipotizzato da progetto (0,66).

Impasto	A	B	C	D	E	F	G
Rapporto a/c	0,59	0,53	0,66	0,61	0,63	0,62	-

Tabella 46: Valori dei rapporti acqua/cemento ottenuti per i differenti impasti.

I calcestruzzi allo stato fresco sono stati poi caratterizzati mediante prova del cono di Abrams e prova di spandimento con tavola a scosse per la misura della lavorabilità degli stessi.

La prova di abbassamento al cono di Abrams, detta anche slump test (grazie alla sua semplicità, rapidità e modesta apparecchiatura richiesta) è la prova più diffusa sia in cantiere che in laboratorio per misurare la consistenza del calcestruzzo; essa determina l'abbassamento dell'impasto rispetto alla forma originaria.

La norma UNI EN 206-1 raggruppa in cinque classi di consistenza gli abbassamenti al cono:

Classe di consistenza	Abbassamento al cono [mm]	Denominazione corrente
S1	da 10 a 40	Terra umida
S2	da 50 a 90	Plastica
S3	da 100 a 150	Semi-fluida
S4	da 160 a 210	Fluida
S5	>220	Super-fluida

Tabella 47: Classi di consistenza tramite prova del cono di Abrams "slump test".

Nella Tabella sottostante sono mostrati i valori ottenuti:

Impasto	Abbassamento al cono [mm]			CLASSE DI CONSISTENZA CORRISPONDENTE		
	0 minuti	15 minuti	30 minuti	0 minuti	15 minuti	30 minuti
A	160	140	90	S4	S3	S2
B	110	70	-	S3	S2	-
C	110	110	90	S3	S3	S2
D	150	150	125	S3	S3	S3
E	195	175	175	S4	S4	S4
F	210	165	140	S4	S4	S3
G	130	-	-	S3	-	-

Tabella 48: Valori ottenuti tramite prova del cono di Abrams per gli impasti preliminari.

Lo slump misurato varia dalla classe di consistenza S3 alla S4, ovvero valori che rispecchiano una miscela semifluida e fluida. Al passare del tempo la consistenza tende a diminuire per quasi tutti gli impasti, tranne che per l'impasto D e l'impasto E.

Per la realizzazione della prova con la tavola a scosse è stata riempita una forma metallica troncoconica di dimensioni standardizzate con il calcestruzzo in esame, secondo modalità prefissate. Sollevata la forma, il cono di calcestruzzo è sottoposto a 15 cadute, una al secondo, da un'altezza di 1,25 cm. Il movimento sussultorio provoca l'appiattimento dell'impasto e l'incremento del diametro, calcolato come percentuale del diametro di base del cono, indicandone le proprietà di flusso o l'attitudine allo spandimento.



Figura 47: Prova di spandimento tramite tavola a scosse.

Impasto	Diametro Spandimento in mm			CLASSE DI CONSISTENZA CORRISPONDENTE		
	0 minuti	15 minuti	30 minuti	0 minuti	15 minuti	30 minuti
A	427,5	400	383	F3	F2	F2
B	380	356	-	F2	F2	-
C	405	392,5	387,5	F2	F2	F2
D	410	417,5	383	F2	F2	F2
E	436	430	427	F3	F3	F3
F	483	455	418	F3	F3	F3
G	-	-	-	-	-	-

Tabella 49: Valori ottenuti tramite prova di spandimento per gli impasti preliminari.

I valori di spandimento misurati variano dalla classe di consistenza F2 (miscela plastica) alla F3 (miscela semi-fluida). Queste classi di consistenza tendono generalmente a mantenersi costanti nel tempo per le varie miscele, tranne che per la miscela A (quella realizzata interamente con aggregato naturale).

Successivamente all'indurimento delle miscele è stata determinata la resistenza a compressione su provini cubici di lato 150 mm che sono stati messi a maturare in camera a nebbia alla temperatura di 20°C e con umidità relativa pari al 90%. Sono stati, quindi, misurati e testati a compressione dopo 1, 3, 7 e 28 giorni di maturazione.

Impasto	A [N/mm <sup>2</sup> ]	B [N/mm <sup>2</sup> ]	C [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	F [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]
1 giorno	15,5	12,0	6,5	11,5	8,0	9,8	-
3 giorni	24,0	20,0	13,0	21,1	15,5	16,5	8,5
7 giorni	29,0	23,5	15,0	25,5	18,5	20,0	10,5
28 giorni	35,5	28,5	19,1	30,0	23,0	26,5	13,5

Tabella 50: Valori di resistenza a compressione degli impasti preliminari ad 1,3,7,28 giorni.

Dai valori ottenuti emerge una notevole variabilità di dati tra i differenti impasti realizzati. L'impasto che presenta i valori di resistenza più elevati è l'impasto A, ovvero il campione di riferimento costituito interamente da aggregato naturale. È però importante notare che ci sono un paio di impasti, per la precisione D e F, che presentano valori non troppo inferiori rispetto all'impasto A. Altri impasti, in particolare il campione C, hanno dato invece un valore di resistenza a compressione notevolmente inferiore; mentre per quanto concerne l'impasto G, cioè quello interamente costituito con aggregati riciclati, non sono state effettuate le prove di resistenza meccanica a tutte le scadenze in quanto già dai valori ottenuti delle prove di lavorabilità e dalle prime resistenze a compressione si presentava come una miscela di scarso interesse.

In seguito a queste prime prove di caratterizzazione eseguite sugli impasti preliminari, sono state scelte 3 miscele principali da riprodurre in maggiore quantità, 200 litri, sulle quali eseguire la caratterizzazione completa secondo la norma UNI-EN 206-1:

- Miscela A: interamente composta da aggregato naturale (campione di riferimento);
- Miscela D ed F: con caratteristiche più prossime ai valori dell'impasto A.

I nuovi impasti presentano la composizione percentuale riportata nella Tabella 51.

		Impasti da 200 l		
		A	D	F
Aggregati Sataf	Filler cremaschi	2 %	2 %	-
	113	10 %	10 %	8,5 %
	103	13 %	13 %	11 %
	117F	7,5 %	7,5 %	7,0 %
	117R	7,5 %	7,5 %	7,0 %
	107	5 %	5 %	5 %
	109	25 %	25 %	20 %
	10.15	15 %	-	-
	15.20	10 %	-	-
Aggregati diga	6,3-31,5	5 %	-	-
Aggregati riciclati	Sabbia riciclata	-	-	12
	Mat. Riciclato 0/30	-	30 %	30 %
Cemento CEM II/A-LL 42,5 [Kg/m <sup>3</sup> ]		300	300	300
Acqua [Kg/m <sup>3</sup> ]		192	200	200

Tabella 51: Composizione degli impasti definitivi prodotti in scala maggiore.

Terminata la miscelazione degli impasti sono state effettuate le prime prove sul calcestruzzo ancora fresco, eseguite con le medesime modalità di prova precedentemente viste per gli impasti preliminari, andando a determinare:

- Massa volumica;
- Lavorabilità;
- Contenuto d'aria.

Impasto		A		D		F	
Massa Volumica [Kg/m <sup>3</sup> ]		2367		2239		2241	
Aria inglobata		2,3%		2,2%		2,2%	
Rapporto a/c		0,59		0,61		0,62	
Abbassamento al cono [mm]	0'	220	S4	200	S4	190	S4
	15'	210	S4	170	S4	175	S4
	30'	195	S4	170	S4	160	S4
Diametro Spandimento [mm]	0'	545	F4	535	F4	490	F4
	30'	500	F4	485	F4	470	F3

Tabella 52: Risultati ricavati dalle prove su calcestruzzo fresco.

Dai risultati si nota un miglioramento nella lavorabilità che passa dalla classe F3 alla classe F4. Successivamente, per caratterizzare nel modo più completo gli impasti allo stato indurito, sono stati confezionati per ciascuna miscela:

- 12 provini cubici di lato 150 mm per eseguire la prova a compressione;
- 2 travetti di dimensioni 100x100x400 mm per la misura del ritiro igrometrico.

Per la resistenza a compressione gli autori sono andati a testare i provini cubici a 1, 28, 60 e 90 giorni di stagionatura, andando poi a determinare i rispettivi valori:

Impasto		A	D	F
Resistenza a compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	1 giorno	18,0	14,0	13,0
	28 giorni	36,0	28,0	25,5
	60 giorni	37,5	29,0	27,0
	90 giorni		30,0	28,0

Tabella 53: Valori di resistenza a compressione degli impasti definitivi a 1, 28, 60, 90 giorni.

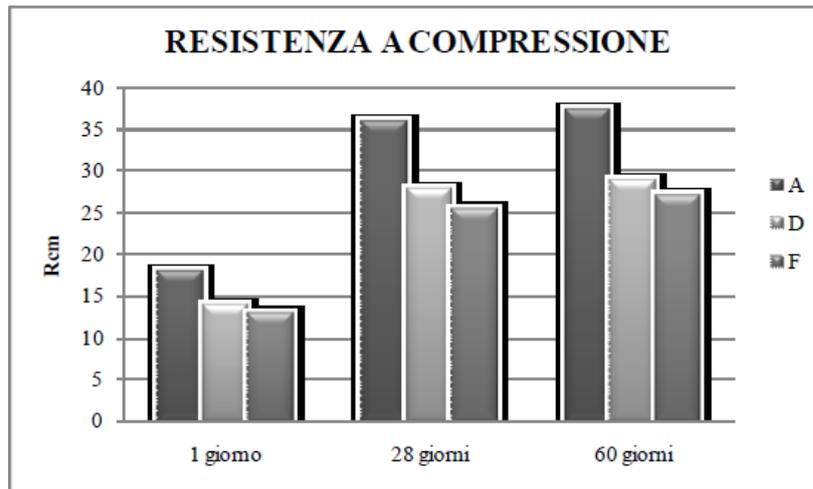


Figura 48: Variazione di resistenza a compressione (Rcm) nel tempo.

Nel grafico di Figura 48 è evidente come l'introduzione degli aggregati riciclati negli impasti (D e F) abbia portato ad una diminuzione di resistenza a compressione Rcm, che continua comunque a rimanere entro la resistenza di 25 MPa (che si era prefissati di raggiungere durante la fase di progettazione).

Dopodiché, partendo dal presupposto che una struttura in calcestruzzo asciutta o parzialmente satura è in grado di assorbire acqua per un volume pari a quello dei pori capillari non ancora occupati dall'acqua stessa, si è andati a determinare il grado di assorbimento d'acqua. Nelle prove di laboratorio questo viene condotto su provini di conglomerato cilindrici di diametro di 150 mm e altezza h pari a 300 mm essiccati in stufa a 150°C fino a raggiungere una massa costante (valori tipici dell'assorbimento sono compresi nell'intervallo 2% - 10%).

Per la sperimentazione, i campioni sono stati sigillati lateralmente in modo da essere resi impermeabili all'acqua e la faccia superiore del campione immersa in un bagno d'acqua per un'altezza di circa 5 mm alla temperatura di 20°C±2°C dove viene lasciato per 24 ore. Trascorse le 24 ore il campione viene pesato, ed in seguito nuovamente immerso sotto uno strato d'acqua che varia da 25 a 50 mm fino a raggiungere una massa costante per una durata di almeno 3 giorni. Allo scadere del terzo giorno il campione è stato pesato ancora una volta dopo aver rimosso con una spugna umida le gocce d'acqua che non sono aderite al campione. L'assorbimento d'acqua totale è stato calcolato tramite la formula seguente:

$$W_{m,a} = \frac{m_{h,c} - m_{d,s}}{m_{d,s}} \cdot 100\%$$

dove:

- $W_{m,a}$ : rappresenta l'assorbimento totale d'acqua;
- $m_{h,c}$ : la massa costante del campione dopo l'immersione in acqua;
- $m_{d,s}$ : la massa costante del campione allo stato secco.

I dati ricavati mettono in evidenza un assorbimento notevolmente maggiore per i calcestruzzi con il materiale riciclato, aspetto legato all'assorbimento degli aggregati utilizzati (maggiori per la frazione 0-30 mm rispetto alla frazione 0-6 mm).

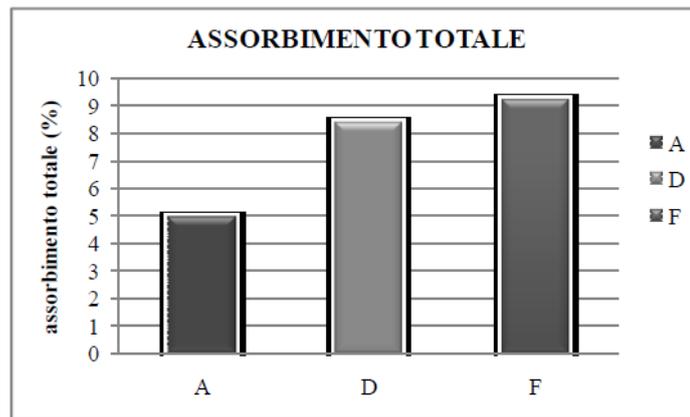


Figura 49: Assorbimento totale misurato nei diversi impasti.

L'ultima prova effettuata è stata la determinazione del ritiro igrometrico nel calcestruzzo indurito, fenomeno che si manifesta in tutti gli elementi costruttivi mantenuti ad umidità relativa minore del 95% (in pratica tutte le strutture non immerse). Tale ritiro può causare fessurazione nel calcestruzzo, effetto che talvolta può presentarsi come un grave problema sia perché costituisce la perdita di monoliticità delle strutture, che perché, nel caso di calcestruzzo armato, mette l'armatura direttamente a contatto con l'ambiente generando così esposizione e corrosione. La principale variabile che influisce sul ritiro è il contenuto d'acqua, che più aumenta e maggiore sarà il ritiro. La prova consiste nel misurare i provini a determinate scadenze fisse: 1 giorno dal confezionamento del calcestruzzo e poi a 3, 7, 14, 28 e 60 giorni. Durante la fase di maturazione i provini vengono conservati in ambiente condizionato a  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  di temperatura e con umidità relativa pari a  $50 \pm 3\%$ .

Impasto		A	D	F
Variazioni dimensionali in seguito al ritiro igrometrico valori medi [mm/m]	1 giorno	-0,028	-0,027	-0,020
	3 giorni	-0,080	-0,075	-0,067
	7 giorni	-0,155	-0,141	-0,159
	14 giorni	-0,257	-0,248	-0,301
	28 giorni	-0,365	-0,400	-0,495
	60 giorni	-0,514	-0,608	-0,709

Tabella 54: Valori di ritiro igrometrico degli impasti definitivi a 1, 3, 7, 14, 28, 60 giorni.

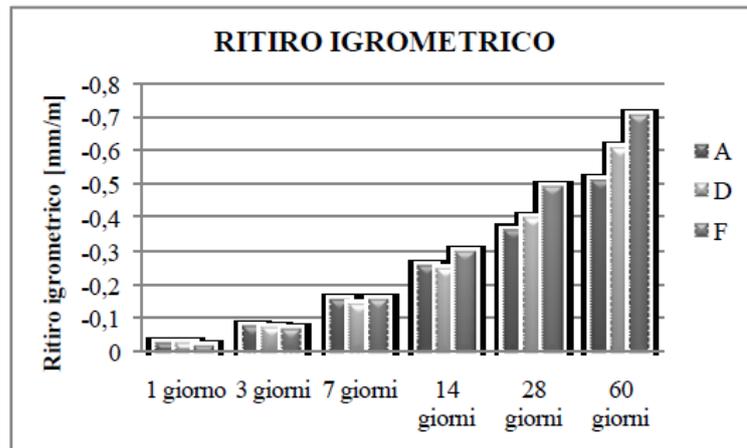


Figura 50: Variazione del ritiro igrometrico nel tempo.

I dati ottenuti evidenziano un maggiore ritiro per gli impasti realizzati con aggregati riciclati (risultato in linea con i dati sul grado di assorbimento d'acqua).

Nel corso di questo studio è stata, quindi, valutata la progettazione e realizzazione di miscele in calcestruzzo con aggregati riciclati, anche su scala di laboratorio. Gli impasti realizzati sono stati caratterizzati sulla base delle proprietà fisiche e tecnologiche dei calcestruzzi confezionati, potendo quindi affermare che l'introduzione di tali inerti - in sostituzione di parte degli aggregati naturali - nel conglomerato finale è un'operazione fattibile anche oltre i limiti consentiti dalle attuali normative, che prevedono un inserimento massimo del 5% per i calcestruzzi strutturali. È inoltre importante sottolineare che nel confezionamento del calcestruzzo, oltre agli aggregati, riveste un ruolo molto importante anche il cemento. Negli impasti realizzati è stato impiegato un cemento standard ma, per ottenere resistenze e risultati migliori, si potrebbero miscelare gli aggregati con dosi maggiori di cemento o con cementi aventi particolari caratteristiche.

## ❖ Applicazioni in scala reale degli aggregati riciclati

Tra le principali applicazioni del calcestruzzo realizzato con aggregati riciclati si annoverano: comportamento ciclico di nodi trave-pilastro, comportamento flessionale di travi in calcestruzzo armato e lastre di solaio alveolare estruso. Ne viene qui descritta l'applicazione principale per la realizzazione di nodi trave-pilastro riportando il seguente articolo sugli esiti della specifica ricerca.

- **LETELIER V., MORICONI G., "L'effetto degli aggregati in calcestruzzo riciclato sul comportamento di nodi trave-pilastro in c.a. sotto l'azione di carichi ciclici", Italia, 2015**

In premessa alla ricerca viene indicato che grazie ai dati presenti in letteratura, che dimostrano come l'impiego di modeste quantità di aggregati riciclati non modifichi sostanzialmente le proprietà del calcestruzzo, sono state sviluppate una serie di normative tecniche per le costruzioni che consentono l'utilizzo fino al 30% di aggregati grossolani di calcestruzzo riciclato nella produzione di calcestruzzo strutturale.

La caratteristica principale degli aggregati riciclati è costituita dalla malta residua sulla superficie dell'elemento da cui dipende il diverso comportamento meccanico rispetto agli aggregati naturali. All'aumentare delle quantità di malta presente sulla superficie di quest'ultimi, peggiorano le proprietà meccaniche del nuovo calcestruzzo (indipendentemente dalla classe di resistenza del calcestruzzo che ha dato origine all'aggregato riciclato). Nel merito, diversi ricercatori hanno studiato l'influenza delle diverse tecniche di riciclaggio, di stagionatura e di proporzionamento delle miscele, allo scopo di individuare procedure tali da migliorare le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi con aggregati riciclati.

Confrontando diversi studi effettuati da vari autori, si concorda, in generale, sul fatto che anche a parità di resistenza a compressione, il calcestruzzo con aggregati riciclati mostra una minore resistenza a trazione ed una minore tensione di aderenza con l'armatura; aspetti quest'ultimi di primaria importanza se riferiti al comportamento del calcestruzzo sotto l'azione di carichi ciclici, da cui emerge una variazione del modulo elastico compresa tra il 3% ed il 15% per sostituzioni di aggregato inferiori al 50%.

*Xiao et al.* hanno evidenziato come le usuali correlazioni tra resistenza a compressione e modulo elastico, in genere valide per i calcestruzzi ordinari, non siano altrettanto idonee nel caso di calcestruzzi con AR.

In questa ricerca è stato analizzato il comportamento, sotto l'azione di carichi ciclici, di tre nodi trave-pilastro in calcestruzzo armato con AR, realizzati in scala 2:3 rispetto al reale e seguendo le indicazioni dell'Eurocodice 8 che si applica nella "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica". I diversi comportamenti sono stati confrontati con quello del calcestruzzo ordinario sottoposto agli stessi carichi ciclici.

Sono state, quindi, confezionate due miscele di calcestruzzo, una con soli aggregati naturali e l'altra sostituendo il 30% dell'aggregato grossolano naturale con aggregato grossolano in calcestruzzo riciclato. Si precisa che per tale sperimentazione non sono state tenute in considerazione le caratteristiche compositive degli aggregati riciclati.

Le due miscele sono caratterizzate dalla stessa lavorabilità (slump 160-210 mm) e dallo stesso rapporto acqua/cemento.

Sono stati mantenuti costanti il dosaggio di cemento (CEM II-A/L 42.5 R), di acqua e di superfluidificante (1,0% in peso del cemento), così come le quantità di sabbia fine (0-4 mm), sabbia grossa (0-5 mm) e pietrisco (11-22 mm).

La parte che varia, nei due casi, riguarda il pietrischetto (6-12 mm), che nel calcestruzzo ordinario è pari a 525 kg/m<sup>3</sup> di aggregato naturale (massa volumica di 2580 kg/m<sup>3</sup> ed assorbimento d'acqua del 2,2%) mentre nel calcestruzzo con aggregati riciclati è pari a 500 kg/m<sup>3</sup> di aggregato riciclato da calcestruzzo frantumato (massa volumica di 2470 kg/m<sup>3</sup> ed assorbimento d'acqua del 7,0%).

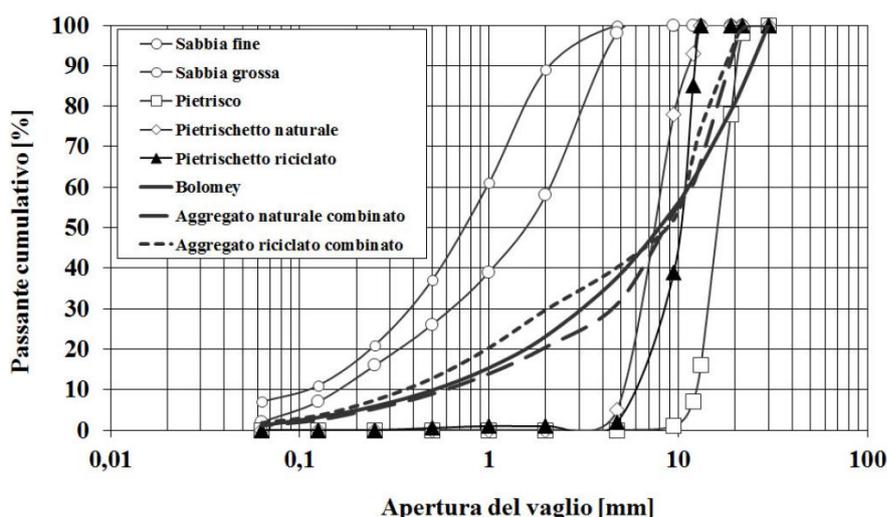


Figura 51: Distribuzione granulometrica dei singoli aggregati impiegati e dell'aggregato combinato sia per il calcestruzzo con aggregati naturali che per quello con riciclati a confronto con la distribuzione di Bolomey.

Gli aggregati riciclati sono stati utilizzati per confezionare due tipologie di nodi, il tipo A ed il tipo B, le cui miscele, sebbene preparate nello stesso identico modo, sono state considerate diverse in quanto realizzate in tempi diversi e con caratteristiche non note ma molto probabilmente diverse anche se provenienti dallo stesso impianto. In vista di ciò entrambe le miscele sono state caratterizzate meccanicamente.

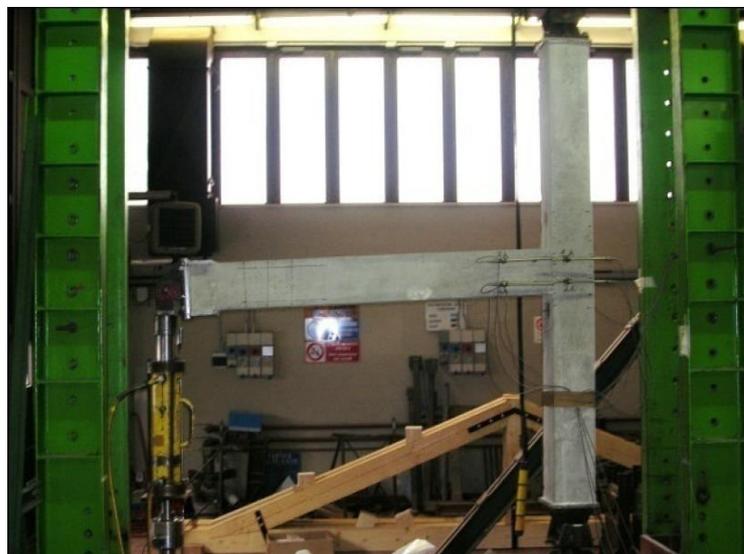
Componente	Calcestruzzo con aggregati naturali di riferimento	Calcestruzzo con aggregati riciclati Nodo tipo A	Calcestruzzo con aggregati riciclati Nodo tipo B
Cemento	350	350	350
Acqua	185	185	185
Superfluidificante	3.5	3.5	3.5
Sabbia fine	345	345	345
Sabbia grossa	345	345	345
Pietrischetto	525 (naturale)	500 (riciclato)	500 (riciclato)
Pietrisco	525	525	525

Tabella 55: Proporzionamento delle miscele di calcestruzzo (kg/m<sup>3</sup>).

Per la valutazione del comportamento sotto l'effetto di carichi ciclici del calcestruzzo armato con aggregati riciclati, sono stati considerati, come sopra anticipato, due diversi tipi di nodi

trave-pilastro (tipo A e tipo B), riprodotti entrambi in scala 2:3 (rispetto alle dimensioni reali) e caratterizzati da diversa geometria ed armatura.

Per simulare le condizioni reali, i nodi sono stati predisposti da un'impresa edile e lasciati stagionare all'aria aperta.



*Figura 52: Condizioni di prova di uno dei nodi analizzati.*

Per i due nodi di tipo A, uno in calcestruzzo ordinario e l'altro in calcestruzzo con aggregati riciclati, è stata presa in analisi una sezione di 200 x 200 mm, con un'altezza di 1950 mm ed armata con 8  $\phi 12$  longitudinali e staffe  $\phi 6$  ogni 100 mm infittite nel nodo ogni 50 mm. La sezione della trave era di 200 x 200 mm con una lunghezza di 1650 mm, con doppia armatura longitudinale (3+3 $\phi 12$ ) e staffe  $\phi 6$  ogni 100 mm infittite ogni 50 mm nel nodo. Dalla prova è risultato che il carico assiale esercitato sul pilastro del nodo A è trascurabile.

Della tipologia B è stato realizzato un solo nodo utilizzando calcestruzzo con aggregati riciclati, sostituendo il 30% degli aggregati naturali. Di questo abbiamo considerato una sezione del pilastro 250 x 280 mm con un'altezza di 1950 mm, armata con 8  $\phi 12$  longitudinali e staffe  $\phi 6$  ogni 100 mm infittite ogni 50 mm nel nodo. Per quanto riguarda, invece, la trave è stata considerata una sezione 200 x 250 mm con una lunghezza di 1650 mm, con doppia armatura longitudinale (3+3 $\phi 12$ ) e staffe  $\phi 6$  ogni 100 mm infittite ogni 50 mm nel nodo. In questo caso è stato applicato un carico assiale costante di 200 kN per tutta la durata della prova. Il nodo B a differenza del nodo A è stato progettato limitando il valore della resistenza a trazione principale sviluppata nel nucleo del nodo a quello della tensione di trazione del calcestruzzo con aggregati riciclati impiegato. Il coefficiente  $\gamma_{RD}$  (non inferiore ad 1,2), che tiene conto della sovrarresistenza dovuta all'incrudimento dell'acciaio secondo l'Eurocodice 8, nel progetto B è stato assunto tenendo in considerazione il minore modulo elastico del calcestruzzo di riciclo. Questo espediente è stato utilizzato poiché un minore modulo elastico provoca maggiori deformazioni del nucleo del nodo, inducendo tensioni più alte, e quest'effetto può essere compensato aumentando il valore del coefficiente di sovrarresistenza  $\gamma_{RD}$  ad 1,4.

Le prove di carico ciclico sono state effettuate imponendo spostamenti di 25, 50, 75, 100, 125 e 150 mm.

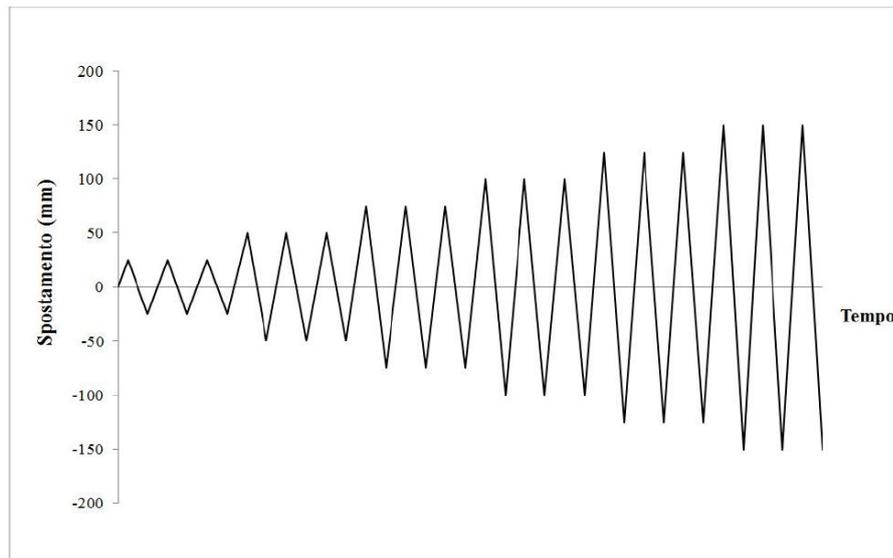


Figura 53: Spostamenti imposti nel tempo per le prove di carico ciclico.

La caratteristica principale del calcestruzzo, ovvero la resistenza a compressione, è stata valutata mediante prove su campioni cubici (100 mm) a 3, 7 e 28 giorni.

I risultati sono riassunti nella Tabella 56, nella quale viene anche riportata la deviazione percentuale media dei valori di resistenza del calcestruzzo con aggregati riciclati rispetto a quelli del calcestruzzo con aggregati naturali.

La deviazione che notiamo nel nodo di tipo A attesta una diminuzione di resistenza del 24% a 28 giorni: questo valore supera i limiti riportati in letteratura, dove la perdita di resistenza a 28 giorni per una sostituzione del 20-30% è inferiore al 5%.

Contrariamente al nodo di tipo A, che ha una resistenza più bassa, il calcestruzzo confezionato per il nodo B mostra valori di resistenza a compressione simili a quelli del calcestruzzo di riferimento. Questa variazione potrebbe essere giustificata dalla classe di resistenza del calcestruzzo originale da cui sono stati prodotti gli aggregati riciclati, che rappresenta un fattore importante in relazione alle proprietà del calcestruzzo finale. Infatti, utilizzando aggregati riciclati prodotti da calcestruzzi di bassa resistenza, anche riducendo il rapporto acqua/cemento, non si possono ottenere valori di resistenza più alti di quelli del calcestruzzo naturale di partenza, in quanto si è condizionati dalla vecchia malta aderente alla superficie dei nuovi aggregati riciclati. Al contrario, se la resistenza a compressione del calcestruzzo originale dal quale derivano gli aggregati riciclati è maggiore di quella del calcestruzzo che si intende produrre, il calcestruzzo con aggregati riciclati può raggiungere la stessa resistenza od addirittura essere maggiore di quella del calcestruzzo realizzato con aggregati naturali.

Tempo di stagionatura (giorni)	Calcestruzzo con aggregati naturali di riferimento	Calcestruzzo con aggregati riciclati Nodo tipo A	Calcestruzzo con aggregati riciclati Nodo tipo B
3	20,7	13,2 (-36%)	24,8 (+20%)
7	25,6	17,5 (-32%)	29,3 (+14%)
28	33,9	25,9 (-24%)	34,5 (+2%)

Tabella 56: Resistenza a compressione dei diversi calcestruzzi e deviazione standard in percentuale.

L'aggregato riciclato utilizzato nel seguente esperimento è stato prodotto da un impianto di riciclaggio in esercizio.

Dai risultati della Tabella 56 possiamo dedurre che il calcestruzzo con aggregato riciclato avesse una resistenza inferiore a 30 MPa per il nodo A e superiore per il nodo B.

Un ulteriore elemento che ha comportato la notevole perdita di resistenza del calcestruzzo con aggregati riciclati nel nodo A è stato il diverso metodo di vibrazione adottato, manuale per il calcestruzzo di riciclo, meccanico per quello naturale. Si precisa che in effetti la compattazione influenza in modo significativo la resistenza finale del calcestruzzo, tant'è che un piccolo aumento di vuoti conseguente ad un'insufficiente compattazione può causare una notevole diminuzione di resistenza.

Si è quindi ritenuto utile verificare, tramite il prelievo di una carota, il grado di compattazione attraverso il rapporto delle due diverse masse volumiche. Nel nodo di tipo A sono stati registrati valori di compattazione di 0,93 per il caso di riciclo e prossimo a 1 per il caso naturale. Nel nodo B è stata applicata una vibrazione meccanica ed è stato raggiunto un valore di compattazione di circa 0,99.

La resistenza a trazione è stata valutata attraverso prove di trazione indiretta su provini cubici (100 mm), alle stagionature di 3, 7 e 28 giorni.

Tempo di stagionatura (giorni)	Calcestruzzo con aggregati naturali di riferimento	Calcestruzzo con aggregati riciclati Nodo tipo A	Calcestruzzo con aggregati riciclati Nodo tipo B
3	1,96	1,31 (-33%)	1,48 (-24%)
7	2,06	1,66 (-19%)	1,70 (-17%)
28	2,46	1,87 (-24%)	2,29 (-7%)

Tabella 57: Resistenza a trazione dei diversi calcestruzzi (MPa) e deviazione standard in percentuale.

I valori riportati in Tabella 57 confermano i dati di letteratura, secondo i quali, a parità di resistenza a compressione, la resistenza a trazione del calcestruzzo con aggregati riciclati è penalizzata del 10% rispetto a quella del calcestruzzo con aggregati naturali.

Passiamo, quindi, all'analisi dei due nodi A: essendo questi progettati secondo l'Eurocodice 8, le prove di carico ciclico sono state calcolate con carico assiale trascurabile sul pilastro e l'azione ciclica continua ha causato nell'area del nodo fessure diagonali indotte da taglio e distacco del copriferro.



Figura 54: Deterioramento del nodo di tipo A sotto l'azione di carichi ciclici.

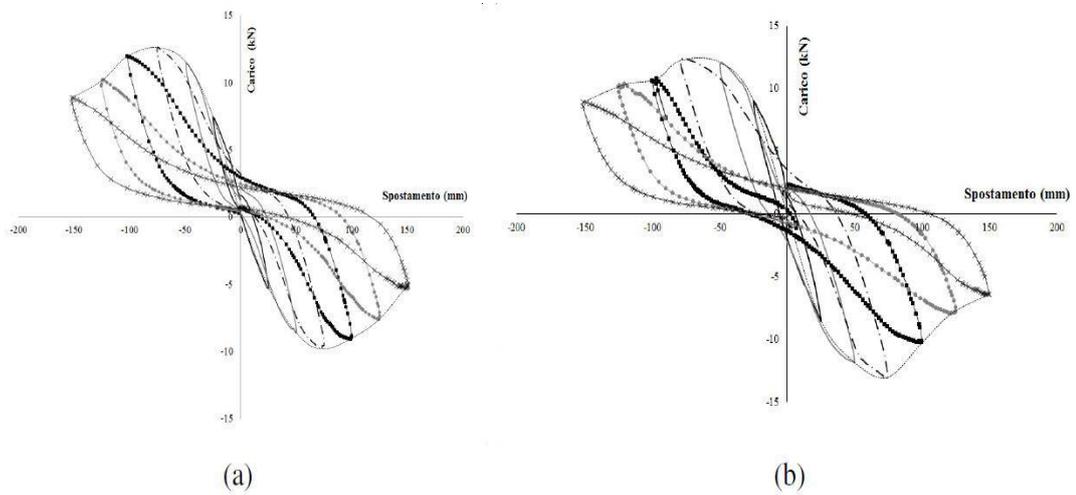


Figura 55: Cicli di isteresi delle prove di carico ciclico su nodi di tipo A nel caso di calcestruzzo con aggregati di riciclo (a) e nel caso con aggregati naturali (b)

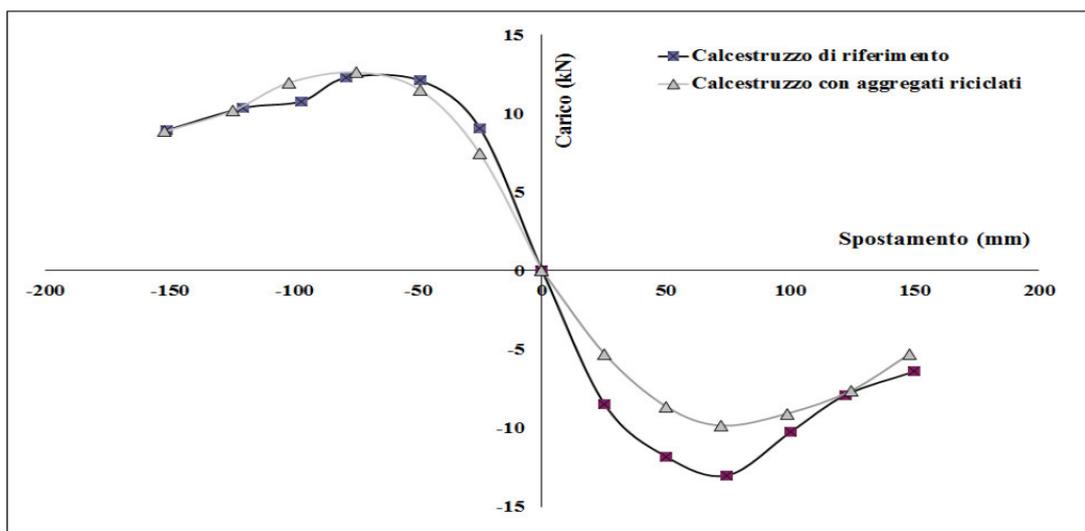


Figura 56: Involuppi delle curve di isteresi per nodi di tipo A realizzati in calcestruzzo con aggregati di riciclo e con aggregati naturali

In Figura 56, sono riportate le curve di isteresi ed il loro inviluppo: le prove mostrano comportamenti simili, con curve che indicano una rapida diminuzione di rigidità dopo il raggiungimento del carico massimo, caratteristica di nodi con fessure indotte da taglio.

Di seguito, invece, riportiamo i valori caratteristici di deformazione e relativa forza, come prima fessurazione ( $\Delta_{cr}$ ,  $P_{cr}$ ), carico massimo ( $\Delta_{max}$ ,  $P_{max}$ ) e carico ultimo ( $\Delta_u$ ,  $P_u$ ), assunto all'85% del carico massimo. Il valore del carico massimo è simile sia per il caso con aggregati naturali che per il caso con aggregati di riciclo per spostamenti positivi, mentre per spostamenti negativi tra i due vi è una differenza del 23%. Questo è molto probabilmente dovuto alla differenza di resistenza a compressione, ritenuta uno dei fattori più influenti sul comportamento a taglio del nodo.

Calcestruzzo	Spostamenti positivi		Spostamenti negativi	
	Aggregati naturali	Aggregati riciclati	Aggregati naturali	Aggregati riciclati
$\Delta_{cr}$ (mm)	-2,56	-3,37	1,95	5,45
$P_{cr}$ (kN)	2,95	2,11	-2,57	-1,32
$\Delta_{max}$ (mm)	-88,37	-75,65	74,58	74,10
$P_{max}$ (kN)	11,51	11,56	-11,34	-8,69
$\Delta_u$ (mm)	-114,5	-114,5	91,8	89,1
$P_u$ (kN)	9,78	9,83	-9,64	-7,39

Tabella 58: Valori caratteristici degli inviluppi delle curve per il nodo di tipo A

Viene, poi, valutata la variazione di rigidità per spostamenti crescenti imposti all'estremo libero della trave. Dalle curve si deduce che il calcestruzzo con aggregati riciclati mostra una maggiore perdita di rigidità a causa del maggior effetto "pinching". Quest'effetto è una conseguenza della minore resistenza a trazione del calcestruzzo di riciclo, che provoca l'apertura di fessure a tensioni più basse ed una tendenza maggiore alla fessurazione. Al di fuori del campo elastico, la differenza di comportamento tra calcestruzzo di riferimento e calcestruzzo con aggregati riciclati tende a scomparire.

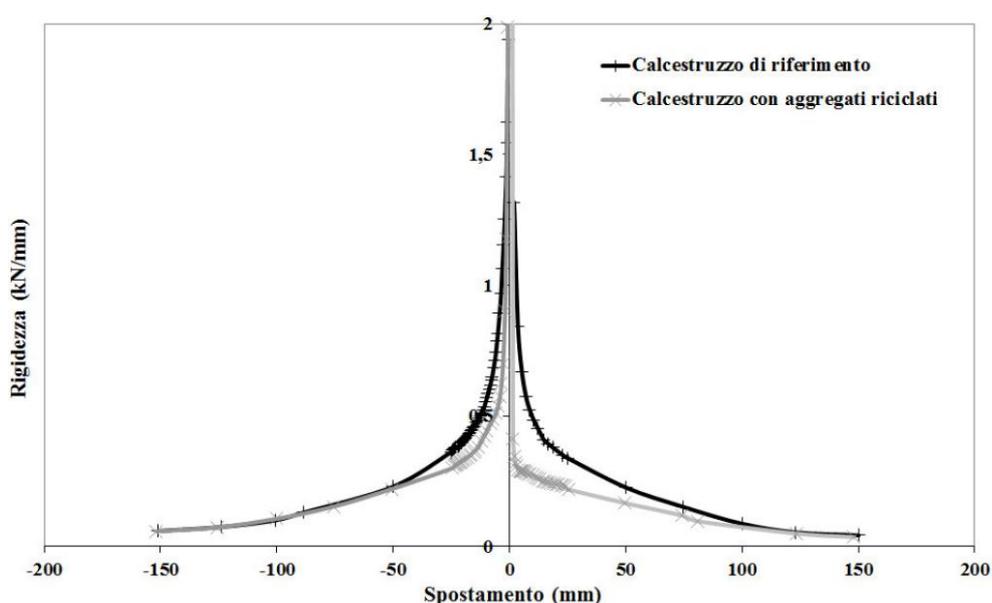


Figura 57: Variazione della rigidità in funzione dello spostamento

In merito all'analisi del comportamento dei nodi per uno spostamento leggermente superiore allo snervamento, prima della comparsa di fessure rilevabili è stato registrato che il principale meccanismo di trasferimento dello sforzo di taglio è dato dalla resistenza del calcestruzzo in compressione, che attesta il suo valore massimo per uno spostamento di 25 mm. Si spiega così il minor carico raggiunto dal nodo realizzato con calcestruzzo di riciclo, essendo la resistenza a compressione di questo inferiore a quello di riferimento.

Confrontando i due casi presentati in Figura 58, su uno spostamento massimo di 100 mm, si riscontrano comportamenti decrescenti per spostamenti crescenti, con aperture di fessura crescenti. La causa è da ricercare nel diverso comportamento a taglio, poiché fessure più ampie riducono l'effetto del meccanismo che coinvolge la resistenza a taglio in compressione. I valori di carico per spostamenti massimi di 100 mm sono gli stessi per entrambe le tipologie di calcestruzzo. L'ingranamento degli AR lungo le fessure diviene determinante nel trasferimento del taglio: quest'effetto è particolarmente influente nelle travi di basso spessore.

Un maggiore ingranamento lo notiamo anche negli aggregati del calcestruzzo di riciclo, a causa della loro rugosità superficiale dovuta alla malta ancora legata all'inerte. Questo dato, sperimentato da molti autori, permette di confermare la maggior tensione di aderenza alla matrice cementizia degli aggregati riciclati rispetto a quelli naturali.

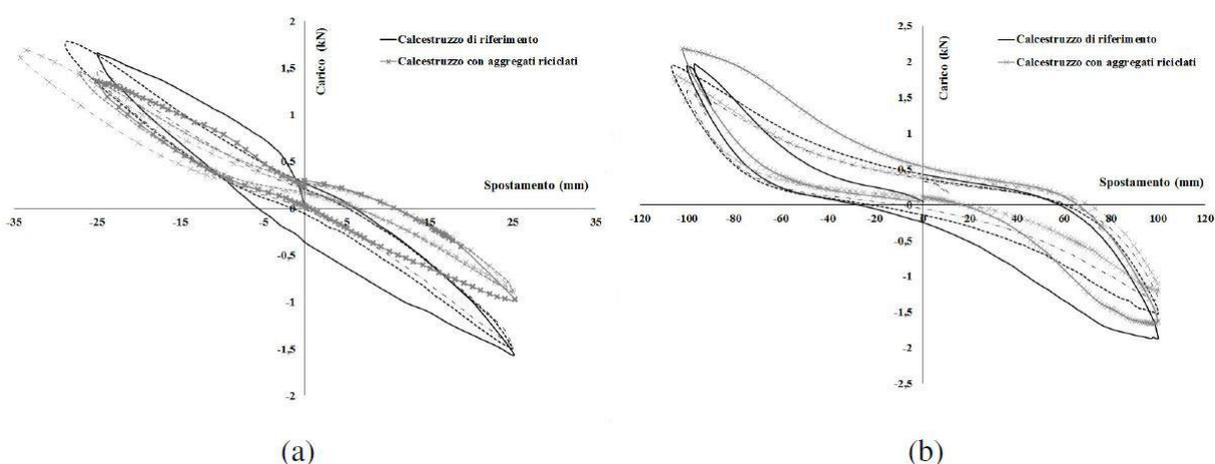


Figura 58: Risposta isteretica dei due nodi di tipo A per spostamenti massimi di (a) 25 mm e (b) 100 mm

Spostamento - Ciclo	Calcestruzzo di riferimento	Calcestruzzo con aggregati riciclati
25 mm - 1	110,9	104,7
25 mm - 2	63,1	70,0
25 mm - 3	46,6	76,8
50 mm - 1	466,6	293,2
50 mm - 2	253,9	218,8
50 mm - 3	229,2	150,5
75 mm - 1	745,0	631,9
75 mm - 2	802,4	446,3
75 mm - 3	572,5	372,9
100 mm - 1	689,6	859,2
100 mm - 2	752,6	607,2
100 mm - 3	582,7	533,9
125 mm - 1	938,3	829,5
125 mm - 2	731,6	620,0
125 mm - 3	580,3	491,5
150 mm - 1	847,2	811,6

Tabella 59: Dissipazione di energia per ogni ciclo di carico (kNm)

Dalla Tabella 59 si può dedurre l'energia dissipata in ogni ciclo per entrambe i calcestruzzi. La maggiore dissipazione la si ha per il calcestruzzo di riferimento: questo è attribuibile principalmente alla differenza di resistenza a compressione tra i due calcestruzzi che condiziona il carico raggiungibile per i diversi spostamenti imposti, oltre che alla precoce fessurazione del calcestruzzo con aggregati riciclati, che spiega l'effetto "pinching" più pronunciato e, pertanto, la minor capacità di dissipare energia di questo calcestruzzo.

Il nodo B, invece, è stato progettato tenendo conto della minore resistenza a trazione e del minor modulo elastico del calcestruzzo di riciclo, mostrando un comportamento duttile del tipo pilastro forte – trave debole, con fessure indotte da flessione nella trave e distacco del copriferro, in corrispondenza dell'ultimo ciclo di carico. Dall'esperimento è risultato che nel corso della prova il pilastro non si è fessurato.

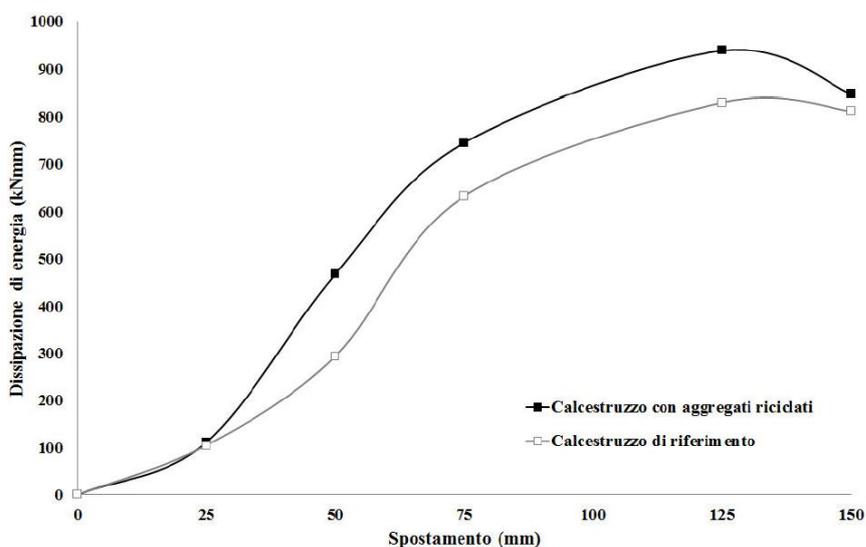


Figura 59: Dissipazione di energia nei nodi di tipo A

Dalla Figura 59, si nota come le curve ottenute siano molto ampie, con alta dissipazione di energia, tipiche di una frattura duttile. Il comportamento del nodo appare anche molto stabile fino ad uno spostamento di 125 mm, con una perdita di resistenza trascurabile per ogni ripetizione del ciclo di carico.

Nella Figura 60 viene, poi, mostrato l'involuppo delle curve di isteresi per il nodo B.

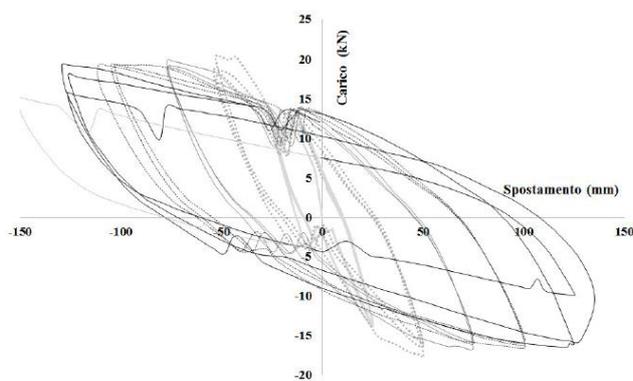
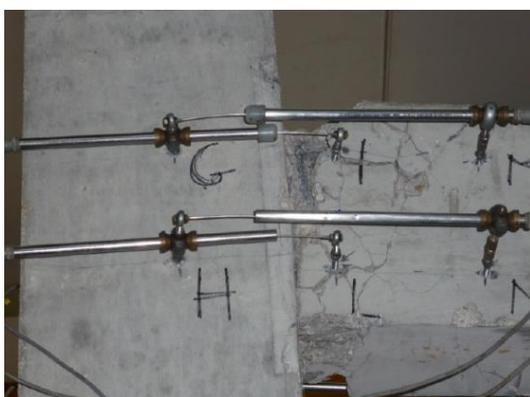


Figura 60: Fessurazione e curve di isteresi nel nodo di tipo B

Secondo *Kim et al.*, questo involucro può essere rappresentato mediante segmenti di linea retta che congiungono i tre punti corrispondenti alle variazioni di lunghezza più significative. Il punto A rappresenta la variazione di rigidezza provocata dall'apparizione di fessure diagonali nel nodo, il punto B è relativo all'inizio dello snervamento dell'armatura trasversale del nodo, mentre il punto C rappresenta la massima resistenza a taglio prima del collasso del calcestruzzo.

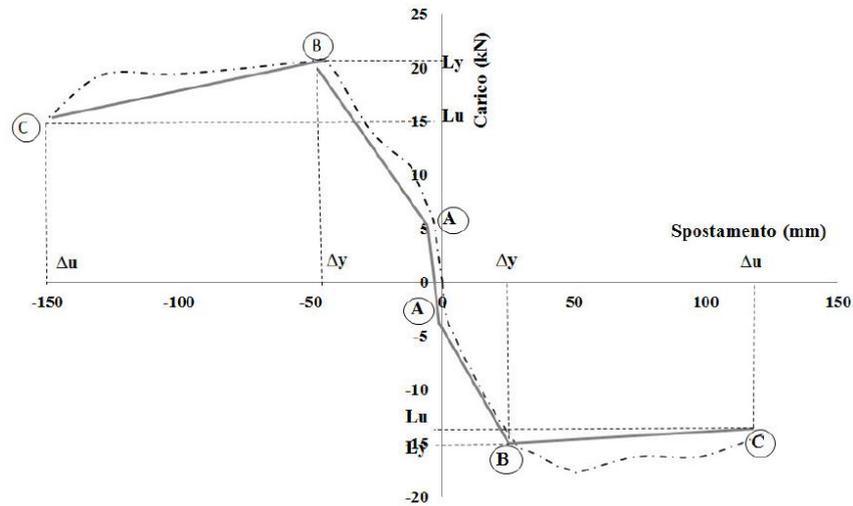


Figura 61: Involuppo del comportamento isteretico del nodo di tipo B sotto l'azione di carichi ciclici rappresentato mediante segmenti di linea retta

Nella Tabella seguente sono riportati i valori di duttilità ( $\Delta u$ ,  $\Delta y$ ) ottenuti dai cicli di isteresi.

	Spostamenti positivi	Spostamenti negativi
$\Delta_{cr}$ (mm)	-2,21	2,44
$L_{cr}$ (kN)	3,86	-3,90
$\Delta_y$ (mm)	-43,04	28,34
$L_y$ (kN)	20,35	-15,28
$\Delta_{max}$ (mm)	-52,99	50,06
$L_{max}$ (kN)	20,29	-17,78
$\Delta_u$ (mm)	-150,5	122,46
$L_u$ (kN)	15,10	-15,72
$\Delta_u/\Delta_y$	3,50	4,32

Tabella 60: Valori caratteristici della curva di involucro per il nodo B

A fronte del basso carico assiale applicato al pilastro, il nodo di tipo A ha mostrato un comportamento di tipo fragile con fessure diagonali nel nodo, scorrimento dell'armatura longitudinale nella trave e distacco del copriferro. Questa fragilità la si può notare anche dalle curve di isteresi molto ristrette che mostrano un notevole effetto "pinching".

Viceversa, il nodo di tipo B, progettato tenendo conto della minore resistenza a trazione e del minor modulo elastico del calcestruzzo realizzato con aggregati riciclati, ha mostrato un comportamento duttile del tipo pilastro forte – trave debole, con sole fessure indotte da flessione nella trave e nessuna fessura nel pilastro.

In conclusione, i risultati ottenuti dal nodo di tipo A hanno messo in evidenza un comportamento del calcestruzzo di riciclo molto simile a quello composto da aggregati naturali, nonostante si sia attestata una resistenza a compressione inferiore del 20% circa. Quando vengono imposti spostamenti non elastici, le curve di isteresi consentono di avere un maggior effetto di ingranamento nel calcestruzzo con aggregati riciclati, a causa della maggiore rugosità superficiale degli aggregati stessi. Quest'effetto contribuisce ad aumentare la resistenza a taglio del calcestruzzo di riciclo durante gli ultimi cicli di isteresi.

Il soddisfacente comportamento del nodo di tipo B sotto l'azione di carichi ciclici, consente di concludere che l'impiego del 30% di aggregati riciclati nel calcestruzzo armato per strutture in area sismica è sicuramente praticabile, a condizione che le appropriate resistenza a taglio e rigidità siano correttamente prese in considerazione.

## 4.4. Utilizzo degli aggregati riciclati per opere stradali ed altre applicazioni geotecniche

### 4.4.1. Esperienze bibliografiche

Al fine di valutare la possibilità di recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) come aggregati riciclati (AR) per l'utilizzo in opere stradali ed altre applicazioni geotecniche è stata predisposta un'analisi della letteratura di riferimento, grazie alla quale è stato possibile evidenziare i principali aspetti ambientali e le rispettive prestazioni tecniche in opera di tali materiali.

- JIMENEZ J., AYUSO J., AGRELA F., LOPEZ M., GALVIN A., "Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads", Spagna, 2011
- RAHMAN M., IMTEAZ M., ARULRAJAH A., DISFANI M., "Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials", Australia, 2013
- RAHMAN M., IMTEAZ M., ARULRAJAH A., PIRATHEEPAN J., DISFANI M., "Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics", Australia, 2014
- GALVIN A., AYUSO J., GARCIA I., JIMENEZ J., GUTIERREZ F., "The effect of compaction on the leaching and pollutant emission time of recycled aggregates from construction and demolition waste", Spagna, 2014
- CARDOSO R., SILVA R., DE BRITO J., DHIR R., "Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review", Portogallo, 2015
- VIEIRA C., PEREIRA P., "Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review", Portogallo, 2015
- CRISTELO N., SILVA C., DE LURDES LOPEZ V., "Geotechnical and geoenvironmental assessment of recycled construction and demolition waste for road embankments", Portogallo, 2016
- ENGELSEN C., VAN DER SLOOT H., PETKOVIC G., "Long-term leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction", Norvegia, 2017

### 4.4.2. Aspetti ambientali

Nei casi di utilizzo di AR in applicazioni geotecniche, la lisciviazione di composti pericolosi sul suolo sottostante risulta essere una delle principali preoccupazioni ambientali a causa delle potenziali conseguenze, ad esempio, sull'inquinamento delle falde acquifere.

*Engelsen et al. 2017*, come tanti altri autori, nella sua ricerca ha analizzato il comportamento a lisciviazione nel tempo di metalli pesanti presenti negli aggregati di calcestruzzo riciclato (RCA con un contenuto >90% di calcestruzzo e malta), utilizzati in sottofondi stradali.

Nello specifico, lo scopo della ricerca era valutare il rilascio degli inquinanti nella condizione **in sito**, dopo un periodo di 10 anni di esposizione.

Il sito in esame era collocato lungo un tratto dell'autostrada E6 (20 km a sud di Oslo in Norvegia), in corso di ricostruzione nel 2004.

Il tratto utilizzato per lo studio è stato suddiviso in 9 sezioni costituite da sottofondi differenti, poi riasfaltate; quelle analizzate nel dettaglio sono: F3W - F3E - F7 realizzate con aggregato riciclato da calcestruzzo (con sezione F7 non riasfaltata e lasciata esposta direttamente all'aria e alla pioggia) e F5 realizzata con aggregati naturali.

L'aggregato riciclato da calcestruzzo derivava dalla demolizione di un tratto della stessa autostrada (compiuta sempre nel 2004) a cui è seguito un processo di frantumazione e setacciatura fino ad ottenere una dimensione dell'AR che variava da 20 mm a 120 mm. Si indica che tali AR presentavano un basso livello di carbonatazione.

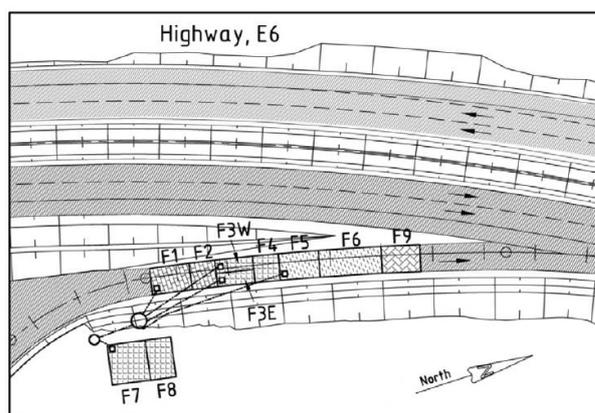


Figura 62: Configurazione del sito in esame.

La raccolta dati è avvenuta una volta al mese in un periodo compreso tra ottobre 2014 e giugno 2015. Sulla base dei dati della stazione meteorologica, collocata a 15 km a sud del tratto in esame, è stata misurata la precipitazione per un periodo di 10 anni (1.000,00 mm all'anno).

I campioni di eluato raccolti sono stati filtrati mediante filtri a membrana da 0,45 µm.

Dallo studio è emerso come il pH sia risultato stabile entro un range fra 7.5 e 8.5, anche se delle sue piccole variazioni hanno comunque influenzato il rilascio di alluminio, calcio e magnesio. Sono state, invece, riscontrate concentrazioni abbastanza elevate di arsenico, cromo e vanadio (rispetto agli aggregati naturali di confronto), dove l'alto livello di cromo viene attribuito ad un maggior contenuto di calcestruzzo frantumato (per la presenza di cemento). Per i cationi metallici di traccia, quali cadmio, rame, nichel, piombo e zinco si sono, infine, generalmente riscontrati bassi valori di concentrazione.

Field <sup>a</sup>	Year	Concentration (µg/L)								
		As	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	V	Zn
F3W	2014-2015	<0.4-5.1	<0.1	1.5-25	<1.1-9.3	4.1-62	<0.9-1.6	<32	<0.7-10	<11
F3E	2014-2015	<0.4-4.0	<0.1	0.6-15	<1.1-5.1	1.9-39	<0.9-1.1	<32	<0.4-4.9	<11
F5	2014-2015	<0.4	<0.1-1.2	<0.5	1.9-7.3	10-60	1.8-8.5	<32	<0.4-0.7	<11
F7	2014-2015	<0.4-0.6	<0.1	0.8-2.3	<1.1-1.5	<1.4-4.8	<0.9	<32	0.9-2.2	<11

Figura 63: Minime e massime concentrazioni rilevate durante il periodo di monitoraggio (Engelsen et al., 2017)

Essendo applicazioni stradali, è anche rilevante evidenziare come la presenza di sale antighiaccio nei mesi invernali (essendo questa un'analisi svolta nel lungo periodo) abbia influenzato la concentrazione di rilascio di cloruri, con un picco di 3000-8000 mg/l, e di sodio.

Attraverso lo studio di *Galvin et al. 2014*, è stato possibile confrontare i dati di lisciviazione ottenuti dal test di cessione ed i livelli di rilascio rilevati nell'eluato dopo la compattazione del materiale stesso.

L'aspetto della compattazione è fondamentale per le opere stradali e geotecniche perché garantisce un incremento di addensamento del materiale attraverso l'applicazione di energia meccanica. È importante, quindi, andare ad investigare se la tale fenomeno possa influenzare il rilascio di inquinanti, misurando la concentrazione di rilascio nell'acqua percolata attraverso gli aggregati compattati.

Le caratteristiche degli aggregati riciclati analizzati sono riportate in Tabella 61.

Composition (% in weight)	Recycled aggregates						
	M-1	M-2	M-3	M-4	C-1	C-2	C-3
Bitumen	4	9.2	0	3.4	0	0.5	0
Ceramic	28.7	21	22.5	27	3.4	0	0.6
Concrete crushed and mortar	28.9	15.2	38.1	36.2	76	99.5	69.8
Natural aggregates	37.5	52.7	39.3	33.1	20.3	0	29.6
Gypsum	0.5	1.5	0.1	0.1	0.3	0	0
Others	0.4	0.4	0	0.2	0	0	0
<b>Mechanical properties</b>							
Plasticity	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
L.A. coefficient	36	31	35.2	43	34	38.1	40.3
Total sulphur (%SO <sub>3</sub> )	1	2.3	1.2	0.9	0.6	0.7	0.5
Water absorption (%)							
0.063/4 mm	8.5	8.9	9.9	6.5	8.8	7.4	7.1
4/31.5 mm	8.3	7.9	9.4	7.7	6.7	5.1	6.0
Density-SSD (g/cm <sup>3</sup> )							
0.063/4 mm	2.15	2.18	2.34	2.48	2.14	2.40	2.32
4/31.5 mm	2.12	2.15	2.28	2.30	2.24	2.41	1.67

Tabella 61: Composizione e proprietà degli AR studiati (*Galvin et al., 2014*)

Il test, effettuato secondo la metodica UNI EN 12457-3 (non confrontabile in ambito nazionale italiano perchè utilizza una metodica a doppio stadio, al contrario di quella nazionale a singolo stadio), ha evidenziato che gli elementi rilasciati prima della compattazione, sono risultati essere prevalentemente cromo e solfato, dato confermato anche da *Jimenez et al., 2011*.

Le maggiori quantità di solfato sono state rilevate in tutti i materiali misti (principalmente composti da materiali ceramici) e nell'aggregato formato da calcestruzzo contenente alte quantità di gesso e particelle ceramiche C-1, come mostrato in Tabella 62.

	Measured concentrations in the leachate (mg/kg)													
	M-1		M-2		M-3		M-4		C-1		C-2		C-3	
	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10
C	2620	1280	3740	2240	1945	806	1138	475	1499	482	1075	925	585	340
pH	7.59	7.42	7.39	7.26	7.86	8.07	11.53	11.55	7.81	7.74	12.10	11.94	8.24	10.69
T	24.7	24.7	24.7	24.7	24.9	24.9	24.7	24.7	24.7	24.7	25.1	25.1	24.9	24.9
Cr	0.012	0.034	0.040	0.079	<b>0.563</b>	<b>0.663</b>	<b>0.860</b>	<b>1.102</b>	<b>0.586</b>	<b>0.583</b>	<b>0.272</b>	<b>0.601</b>	0.094	0.048
Ni	0.017	0.020	0.018	0.091	0.018	0.040	0.010	0.051	0.009	0.007	0.010	0.030	0.005	0.007
Cu	0.050	0.060	0.023	0.049	0.053	0.078	0.031	0.112	0.025	0.023	0.072	0.121	0.029	0.045
Zn	0	0	0.007	0.203	0.007	0.021	0.020	0.171	0	0	0.020	0.050	0.002	0.010
As	0.008	0.017	0.005	0.016	0.002	0.002	0	0.010	0.008	0.018	0	0	0.002	0.001
Se	0.014	0.033	0.007	0.017	0.010	0.042	0.066	0.1	0.018	0.010	0.061	0.101	0.001	0.002
Mo	0.040	0.062	0.047	0.072	0.069	0.086	0.062	0.081	0.043	0.045	0.051	0.160	0.020	0.027
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0.008	0.025	0.010	0.034	0	0.008	0	0.011	0.014	0.038	0	0.012	0.007	0.023
Ba	0.112	0.394	0.099	0.390	0.105	0.384	0.080	0.292	0.091	0.184	0.471	1.410	0.047	0.219
Hg	0.001	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0.002	0	0	0	0.021	0	0	0	0	0	0
Cl <sup>-</sup>	242	630	<b>694</b>	650	18	10	130	122.6	126	110	123.7	170.5	56	45
F <sup>-</sup>	2	10	2	10	2	10	2	10	2	10	2	10	2	10
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<b>2771</b>	<b>6800</b>	<b>2818</b>	<b>14,095</b>	<b>2840</b>	<b>7150</b>	<b>1942</b>	<b>2270</b>	<b>1360</b>	<b>1610</b>	58.6	270.5	225	520

Tabella 62: Risultati test di lisciviazione, i valori eccedenti i limiti sono riportati in grassetto (*Galvin et al., 2014*)

Relativamente al cromo, le concentrazioni più elevate sono state misurate nei materiali contenenti le maggiori quantità di calcestruzzo frantumato e malte (M-3 ed M-4).

Sotto effetto di compattazione è stato possibile notare come i dati confermino che il potenziale inquinante degli aggregati, originati da materiale C&D, sia direttamente proporzionale alla densità del materiale (influenzata dalla fase di compattazione).

La ricerca ha anche messo in evidenza come la compattazione influenzi la diminuzione dei livelli di cromo e solfato negli aggregati misti compattati, mentre l'aumento in quelli derivanti dal calcestruzzo. Per meglio comprendere la causa di tali differenze nella lisciviazione dopo la compattazione, si è reso necessario analizzare entrambi i campioni dal punto di vista fisico.

Ne consegue che la motivazione risiede, sostanzialmente, nella percentuale di *frazione fine*, ovvero nella differenza significativa tra il contenuto di particelle fini prima e dopo la compattazione. È stato osservato come l'aggregato misto, con un coefficiente Los Angeles di resistenza alla frammentazione maggiore rispetto all'aggregato di calcestruzzo, mostri un margine di variazione inferiore nel contenuto di particelle fini (perciò meno suscettibile alla compattazione). L'aggregato da calcestruzzo riciclato ha mostrato, invece, un margine di variazione superiore nel contenuto di particelle fini, il che ha portato all'aumento di rilascio di elementi inquinanti come cromo e solfato (Tabella 63).

		L.A. coefficient	Equivalent sand	Fine particles (%)
Mixed RA, M-4	Before compaction	43	61	3.6
	After compaction	39.2	58	7.5
Concrete RA, C-2	Before compaction	38.1	62	1.7
	After compaction	34.7	46	8.5

Tabella 63: Confronto tra coefficienti di Los Angeles e % di frazione fine in aggregati misti e da calcestruzzo dopo compattazione (Galvin et al., 2014)

È possibile, quindi, evidenziare come la compattazione rappresenti una variabile non trascurabile in quanto, agendo sulla dimensione delle particelle e sulla densità del materiale, da essa possono derivare livelli superiori di rilascio d'inquinanti che diffondendosi nel terreno comportano un potenziale rischio per l'ambiente.

Anche gli autori *Jimenez et al. 2011* hanno studiato gli effetti della compattazione in riferimento, però, alla realizzazione di una strada sterrata di campagna con aggregati riciclati (derivanti dal trattamento di rifiuti C&D provenienti da un processo di demolizione selettiva, con preselezione dei rifiuti di partenza e rimozione degli elementi metallici e di tutte le impurità sia tramite l'impianto di trattamento che manualmente). La composizione degli AR e le relative proprietà vengono mostrate nelle tabelle sottostanti.

Class	Type	Weight (%)	
		RC-1	MD-1
R <sub>A</sub>	Asphalt	0.0	4.4
R <sub>B</sub>	Ceramics	3.1	26.6
R <sub>C</sub>	Concrete and mortar <sup>a</sup>	76.0	34.8
R <sub>L</sub>	Lightweight particles	0.0	0.0
R <sub>U</sub>	Unbound aggregates <sup>b</sup>	20.8	33.4
X <sub>1</sub>	Natural soil	0.0	0.2
X <sub>2</sub>	Others <sup>c</sup>	0.0	0.1
X <sub>G</sub>	Gypsum	0.1	0.4
Total	100	100	

Tabella 64: Composizione degli aggregati riciclati (Jimenez et al., 2011)

- <sup>a</sup> Natural aggregates with cement mortar attached.  
<sup>b</sup> Natural aggregates without cement mortar attached.  
<sup>c</sup> Wood, glass, plastic, metals.

Properties	Fraction	Materials				Standard
		SG-1	MD-1	RC-1	NA-1	
Particle density $\rho_r$ (Mg/m <sup>3</sup> )	0.063/4	-	2154	2138	2399	UNE-EN 1097-6 (2001)
	4/31.5	-	2116	2243	2590	UNE-EN 1097-6 (2001)
Water absorption (%)	0.063/4	-	8.5	8.8	4.7	UNE-EN 1097-6 (2001)
	4/31.5	-	8.3	6.7	1.6	UNE-EN 1097-6 (2001)
Plasticity (IP)		NP	NP	NP	NP	UNE 103103:1994 and 103104 (1993)
Clean coefficient (%)		-	0.84	0.34	0.86	UNE 146130 (2000)
Sand equivalent (%)		-	39	51	41	UNE EN 933-8 (2000)
Los Angeles abrasion (%)		-	36	34	20	UNE EN 1097-2 (2007)
Flakiness index		-	19	8	8	UNE EN 933-3 (2004)
Crushed particles (%)		-	70	70	96	UNE EN 933-5 (1999)
Maximum dry density PM (Mg/m <sup>3</sup> )		2.11	1.91	1.88	2.21	UNE 103501 (1994)
Optimum moisture content PM (%)		8	12.7	11.6	6.3	UNE 103501 (1994)
CBR (%)		20	68	138	152	UNE 103502 (1995)
Swelling after 4 day's soaking (%)		0.004	0.05	0.01	0.03	UNE 103502 (1995)
Free swelling in oedometer (%)		0.0	0.0	0.0	0.0	UNE 103601 (1996)
Collapse (%)		0.04	0.15	0.29	0.02	NLT 254 (1999)
Organic matter (%)		0.3	0.5	0.3	0.2	UNE 103204 (1993)
Soluble salts (%)		0.05	1.3	0.8	0.1	NLT 114 (1999)
Water soluble sulphates (% SO <sub>3</sub> )		<0.01	0.7	0.3	<0.01	UNE 103201 (1996)
Gypsum content (%)		<0.01	1.2	0.5	<0.01	NLT 115 (1999)
Total sulphur compound (% SO <sub>3</sub> )		<0.01	1.0	0.6	<0.01	UNE EN (1998)

Tabella 65: Proprietà fisiche, meccaniche e chimiche degli aggregati riciclati (Jimenez et al., 2011)

Dall'analisi emerge che nell'aggregato di calcestruzzo di riciclo (RC-1) il contenuto di arsenico è superiore ai valori limite massimi per i materiali inerti (metodica 12457-1). I metalli con concentrazioni generalmente prossime al limite superiore di classificazione, sono antimonio, cadmio e mercurio; mentre tra gli anioni, la concentrazione di solfati è risultata essere quella più elevata (gli aggregati riciclati con contenuto maggiore di gesso hanno concentrazioni di inquinanti superiori rispetto agli aggregati naturali).

	L/S-2 l/kg			L/S-10 l/kg		
	MD-1	RC-1	NA-1	MD-1	RC-1	NA-1
Cr	0	0	0	0	0	0
Ni	0	0	0	0	0	0
Cu	0.0082	0.0075	0.0006	0.0166	0.0182	0.0041
Zn	0	0	0	0	0	0
As	0.0117	0.5862	0.0295	0.0336	0.5829	0.0398
Se	0.0013	0	0	0	0	0
Mo	0.0397	0.0430	0.0197	0.0620	0.0452	0.0323
Cd	0.0495	0.0251	0.0166	0.0603	0.0230	0.0225
Sb	0.1120	0.0908	0.0530	0.3937	0.1836	0.3171
Ba	0.0174	0.0088	0.0018	0.0200	0.0072	0.0014
Hg	0.0141	0.0176	0.0025	0.0335	0.0099	0
Pb	0.0084	0.0138	0.0036	0.0250	0.0379	0.0082
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	121	63	5.5	23	11	5
F <sup>-</sup> (mg/l)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	1385.5	680	175	613.5	161	41.5

Tabella 66: Concentrazione di inquinanti in seguito al test di lisciviazione (mg/kg) degli aggregati utilizzati (Jimenez et al., 2011)

Butera et al. 2015 hanno indagato tramite esperimenti di laboratorio, il comportamento di ritenzione del cromo (VI) in tre sottosuoli danesi con basso contenuto di materia organica, al fine di comprendere il rilascio causato dagli AR (originati dai rifiuti di costruzione e demolizione) nei casi di riutilizzo come materiale non legato nella costruzione stradale. L'analisi di tale fenomeno è fondamentale per la migliore protezione delle falde freatiche dalla contaminazione del cromo.

Il suolo, nelle sezioni prese in esame, ha una profondità compresa tra 50 e 100 cm. Come mostrato in Figura 64, lo scenario indagato è formato da uno strato di 30 cm di aggregati riciclati non legati (densità di circa  $1850 \text{ kg m}^{-3}$ ) adagiati sul sottosuolo. La struttura stradale comprende anche uno strato di ghiaia (base) e uno di pavimentazione in asfalto.

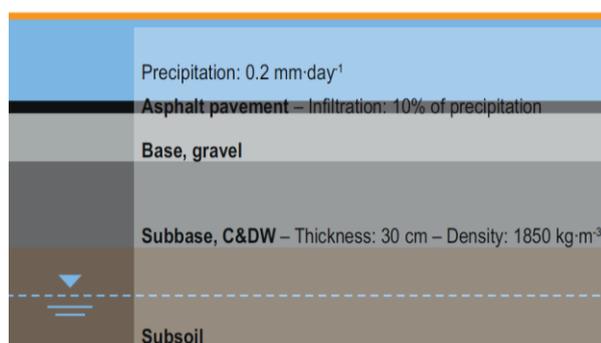


Figura 64: Stratigrafia della pavimentazione presa in esame (Butera et al., 2015)

I risultati ottenuti dai test riguardanti la presenza di cromo, sono stati utilizzati per modellare la migrazione del cromo VI nel sottosuolo. In questa ricerca è stata utilizzata la metodica EN 12457, per cui agli eluati sono stati addizionati diversi livelli di cromo VI per essere sperimentati su uno strato di base non legato.

È stata introdotta anche l'ipotesi che il cromo VI venga ridotto dal suolo, per cui precipiti come cromo III, e dall'indagine è emerso che i tre terreni hanno mostrato una capacità di trattenimento bassa, ma sufficiente per ridurre le concentrazioni di cromo (VI) riscontrate negli eluati di AR. L'effettiva riduzione di cromo (VI) si è verificata nei primi 7-70 cm di suolo. Bisogna considerare però che in climi rigidi la reazione di contenimento potrebbe essere solo rallentata ed il cromo (VI) potrebbe comunque migrare fino a 200 cm di profondità sotto il livello stradale in tempi più lunghi.

I valori ottenuti, suggeriscono, quindi, che nella maggior parte dei casi, la migrazione del cromo (VI) può essere contenuta minimizzando l'infiltrazione dell'acqua piovana durante la costruzione stradale (ad esempio pianificando i lavori in giornate non di pioggia) o assicurando una frequente manutenzione della strada stessa.

#### 4.4.3. Prestazioni tecniche

Attraverso l'analisi della letteratura di riferimento è stato possibile constatare come gli AR vengano utilizzati soprattutto per **applicazioni non legate in sottofondi stradali** e ancora molto poco in altre applicazioni geotecniche.

Per tale motivo la nostra analisi si concentrerà principalmente sul loro utilizzo in strati di

pavimentazione non legati. È necessario, pertanto, definirne, innanzitutto, la struttura di una pavimentazione stradale, in cui ogni strato ha uno scopo ben specifico, ovvero:

- manto d'usura: ha il compito di proteggere il corpo stradale dall'usura e di salvaguardarlo dalle infiltrazioni di acque meteoriche;
- struttura: ha il compito di assorbire la maggior parte delle azioni flessionali indotte dal traffico stradale e trasferirle agli strati sottostanti;
- sottofondo: è lo strato di appoggio e di portanza.

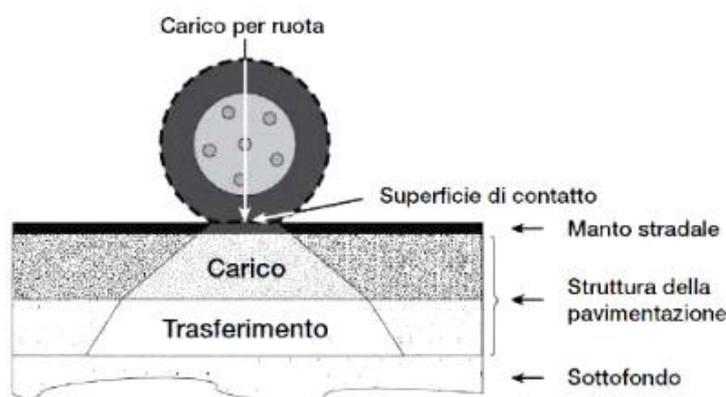


Figura 65: Struttura della pavimentazione stradale con relativo trasferimento di carico.

Riguardo al sottofondo, le caratteristiche che esso deve possedere sono:

- elevata rigidezza (portanza): capacità di deformarsi sotto l'azione dei carichi ciclici senza mostrare cedimenti significativi;
- conservazione nel tempo delle sue caratteristiche meccaniche, anche se la strada è temporaneamente soggetta all'azione d'acqua e gelo, assicurando quindi adeguate caratteristiche drenanti ed antigelo;
- regolarità dello strato superficiale (senza fenomeni/alterazione di volume).

Per garantire tali requisiti, i fattori da valutare risultano essere molteplici, in particolare:

- **Analisi di distribuzione granulometrica e costipamento**

Il tema della compattazione e del costipamento, ovvero l'aumento del grado di addensamento delle frazioni di materiale in modo artificiale, è il punto di partenza per una corretta applicazione del materiale.

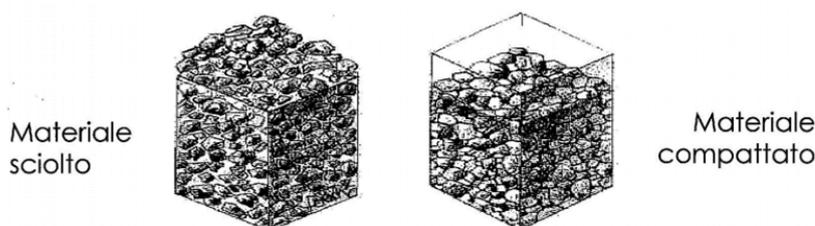


Figura 66: Compattazione del materiale

Sarà, perciò, necessario analizzare gli effetti della compattazione sulle curve granulometriche e sulla densità, e le conseguenze del processo di frantumazione.

Innanzitutto, è essenziale sottolineare come non tutti i materiali siano adatti al costipamento; l'idoneità è da valutare attraverso prove specifiche, quali la prova Proctor in ambito nazionale.

La "prova Proctor", è utilizzata per fornire la curva di riferimento per il controllo della compattazione, tramite densità massima in funzione del contenuto d'acqua ottimale.

Il materiale utilizzato per tale prova deve essere grossolano e ben gradato, in modo tale che i granuli più fini si possano allocare nei vuoti interstiziali creati dai granuli più grossi, garantendo la massima densità raggiungibile.

La verifica di come la compattazione, successivamente alla posa in opera del materiale (tramite rullo), possa cambiare la granulometria può avvenire in due modi differenti: per impatto (prova Proctor) o per vibrazione (tavola vibrante). La prima prova, tramite sforzi localizzati, porta ad un aumento della frazione fine dal 3% al 12%; la seconda tramite energia distribuita porta, invece, a valori inferiori all'8%.

Gli effetti principali del costipamento, consistono in:

- avvicinamento dei grani al fine di evitare cedimenti dovuti a carichi fissi e vibrazioni;
- incastro dei grani al fine di incrementare la resistenza al taglio;
- riduzione della permeabilità al fine di proteggere il corpo stradale.

Per un migliore controllo della curva granulometrica, si consiglia di effettuare almeno due fasi di frantumazione dei rifiuti da C&D perché tale procedura, oltre a diminuire la quantità di vecchia malta aderente all'inerte, contribuisce ad ottenere frazioni di materiale più rotonde e meno frastagliate (*Barbudo et al., 2012*); al contrario, se l'aggregato riciclato subisce solo un processo di frantumazione primaria, si presentano, di solito, indici di forma e di sfaldatura più alti di quelli degli aggregati naturali (al diminuire della densità della frazione grossolana aumenta la densità della frazione fine).

La qualità degli aggregati da calcestruzzo di riciclo (definiti come RCA) è fortemente governata dal contenuto residuo di malta, che presenta una microstruttura più porosa e meno densa degli aggregati naturali. Per cui, tanto è maggiore la malta residua, più è alta la probabilità che questi aggregati si esponano progressivamente ad una peggiore prestazione meccanica.

Da ciò ne consegue che la presenza della parte fine deve essere sempre tenuta sotto controllo anche in applicazioni stradali e geotecniche, poiché in alcuni casi può portare a fenomeni di capillarità con conseguenti problematiche. Un possibile rimedio a tale fenomeno è rappresentato dall'eventuale stabilizzazione della frazione fine tramite calce.

Nella Tabella 67 vengono presentate le principali proprietà dell'AR che possono o meno influenzare le prestazioni del materiale compattato.

Relationship between the aggregate properties and the properties of the compacted material (adapted from Saeed, 2008).

Aggregate property	Compacted material				
	Grading size distribution curve	Compaction curve (affects shear strength, CBR, stiffness and load bearing capacity)		Permeability	Freeze-thaw and soundness resistance
		Maximum dry density	Optimum water content		
Size	YES	YES	NO	YES	YES
Shape and roughness	YES	YES	NO	YES	NO
Density and porosity	NO	YES	YES	YES	NO
Crushing strength and toughness	YES	YES	YES	NO	YES
Stiffness	NO	YES	NO	NO	NO
Water retention properties	NO	NO	YES	YES	YES
Freeze-thaw resistance and soundness	YES	YES	NO	YES	YES

Tabella 67: Relazione tra le proprietà dell'aggregato e del materiale compattato.

- **Caratteristiche di resistenza meccanica**

Tramite prova California Bearing Ratio “CBR”, utilizzata nella maggior parte degli studi analizzati, è possibile ottenere informazioni in merito alla resistenza meccanica degli strati compattati indipendentemente dalla natura delle particelle utilizzate. Si precisa che la resistenza meccanica non è un parametro fondamentale in queste applicazioni perché i carichi in gioco non sono elevati, mentre il parametro da tener sotto controllo è la deformabilità. Da alcuni studi (Bennert et al., 2000) emerge che una miscela realizzata con il 25% di aggregato di calcestruzzo di riciclo ed il 75% di aggregato naturale è in grado di raggiungere le stesse proprietà di deformazione permanente e di risposta elastica di un sottofondo comunemente realizzato con aggregati naturali.

Al contrario gli aggregati provenienti dalla rimozione di conglomerati bituminosi in opera (RAP) risultano non adatti ad applicazioni come sottofondi a causa della loro bassa resistenza. Il cosiddetto “fresato d’asfalto” presenta una curva granulometrica propria caratterizzata da una elevata percentuale di fini e bitume invecchiato. Per tale motivo questa tipologia di aggregato subisce una sorta di “ciclo chiuso”, ritornando ancora all’interno dello strato superficiale d’usura.

- **Permeabilità e resistenza al gelo-disgelo**

Le deformazioni accumulate nel manto stradale e nella struttura della pavimentazione, causate dai cicli di gelo-disgelo, possono compromettere le prestazioni della pavimentazione. Per questo motivo la permeabilità è fattore importante per garantire che l'acqua non si accumuli all’interno dell’opera (di solito è garantita dalla scelta di materiali grezzi con percentuale di frazione fine inferiore al 10%).

I risultati degli studi analizzati hanno mostrato che l'utilizzo degli aggregati riciclati provenienti da calcestruzzo (fino al 75% di sostituzione) nel sottofondo e nella struttura della pavimentazione, garantisce valori di permeabilità prossimi a quelli degli aggregati naturali. Al contrario, la permeabilità diminuisce con l’utilizzo degli aggregati provenienti da pavimentazioni asfaltate (RAP) dove è presente un drenaggio di scarsa qualità dovuto alla presenza di particelle bituminose impenetrabili.

Per ottenere una misura della durabilità agli agenti esterni ed atmosferici degli aggregati riciclati per applicazioni stradali e geotecniche, viene favorito il degrado del materiale provocando una pressione di cristallizzazione tramite ripetute immersioni degli aggregati riciclati in una soluzione di solfato di sodio, seguita da essiccazione in forno, utile a disidratare il sale precipitato nei pori.

Dai risultati analizzati in letteratura è possibile evidenziare come gli aggregati da calcestruzzo di riciclo, sottoposti a tale procedura, presentino un incremento della perdita di massa circa del 66% rispetto alla condizione iniziale, portando così ad uno sgretolamento diretto dell'AR. Ciò è dovuto principalmente all'effetto distruttivo del solfato sulla componente cementizia. Diversamente, gli aggregati riciclati provenienti da muratura hanno mostrato una minor perdita di peso quando esposti allo stesso numero di cicli bagno-asciuga, a causa della minor presenza di pori nelle frazioni di muratura o delle loro dimensioni più piccole. Questo è il motivo per cui la soluzione non riesce a penetrare facilmente nella muratura, come invece accade nella pasta di cemento.

Alla luce di queste considerazioni è possibile, quindi, affermare che gli aggregati riciclati (in particolar modo quelli provenienti da calcestruzzo), in vista di future applicazioni geotecniche, rivelano proprietà simili ai materiali naturali.

Vengono qui riportate, a conclusione, le principali proprietà geotecniche degli aggregati:

	RCA	CB	WR	RAP	FRG	Regular Quarry Material
Gravel (%)	50.7	53.6	44.7	48.0	0.0	
Sand (%)	45.7	39.8	45.1	46.0	94.6	
Fines (%)	3.6	6.6	10.2	6.0	5.4	<10
USCS classification	GW	GW	SW	GW	SW	
$C_u$	31.2	44.4	74.7	25.6	7.5	
$C_c$	0.9	2.0	5.4	2.5	1.5	
Los Angeles abrasion (%)	28	36	21	42	25	<40
CBR (%)	118-160	123-138	121-204	30-35	42-46	>80
Maximum dry density ( $kN/m^3$ )	19.13	19.73	21.71	19.98	17.40	>17.5
Optimum moisture content (%)	11.0	11.25	9.25	8.0	10.5	8-15
Organic cont. (%)	2.3	2.5	1	5.1	1.3	<5
pH	11.5	9.1	10.9	7.6	9.9	7-12
Hydraulic conductivity (m/s)	$3.3 \times 10^{-8}$	$3.3 \times 10^{-9}$	$3.3 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-5}$	$>3.3 \times 10^{-9}$
Flakiness index	11	14	19	23		<35
Cohesion (kPa)	44	41	46	53	0	>35
Friction angle ( $^\circ$ )	49	48	51	37	37	>35
Resilient modulus 90% of the OMC	239-357	301-319	121-218			125-300
Resilient modulus 80% of the OMC	487-729	303-361	202-274			150-300
Resilient modulus 70% of the OMC	575-769	280-519	127-233			175-400

Tabella 68: Proprietà geotecniche dei materiali riciclati da: a) calcestruzzo, b) mattoni, c) scarti rocciosi, d) pavimentazioni asfaltate, e) vetro riciclato.

Per verificare le prestazioni tecniche in termini di capacità portante dell'opera stradale e il grado di compattazione sono necessarie delle prove in sito. I valori raggiunti da queste prove devono essere confrontati con la massima densità ottenuta da test di laboratorio in modo tale da ottenere la percentuale di compattazione in cantiere. Le prove in questione riguardano:

- *Prova di carico su piastra*

Prova pratica che consiste nel caricare con incrementi successivi e regolari una piastra rigida (generalmente circolare) appoggiata sul terreno di prova, misurando il cedimento e il modulo elastico corrispondente ad ogni gradino di carico, con possibilità di effettuare cicli di carico e scarico. Ovviamente, un minor cedimento dimostra il fatto che la procedura di compattazione durante la realizzazione è stata eseguita correttamente.

- *Prove di densità*

Per questo tipo di prova si utilizza una sabbia calibrata, di densità nota, monogranulare, perfettamente asciutta. La prova prevede il riempimento di un foro di controllo con sabbia, la cui densità viene determinata utilizzando un cilindro di volume noto, all'incirca pari a quello del foro di prova.

## 5. Esperienze

In questo capitolo vengono descritte le visite tecniche effettuate sul territorio regionale ai fini dello svolgimento della presente attività di ricerca.

### 5.1. Impianto di trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D)

#### 5.1.1. Descrizione dell'esperienza

La visita è avvenuta il 7 giugno 2017 presso un impianto di produzione di aggregati naturali e riciclati.



*Figura 67: Impianto di dragaggio all'interno dello stabilimento.*

L'impianto ha l'autorizzazione al ritiro dei seguenti rifiuti, classificati tramite codice EER: 170101, 170102, 170103, 170107, 170802, 170904, 101311, 170504. Nel 90% dei casi il materiale consegnato viene classificato come rifiuto da demolizione misto (EER 170904).

La procedura standard di ritiro del materiale da costruzione e demolizione è composta dalle seguenti fasi:

- il mezzo di trasporto contenente i rifiuti C&D giunge in impianto e viene pesato;
- il conducente presenta un formulario di identificazione dei rifiuti (FIR) all'interno del quale sono indicati produttore, cantiere di origine, destinatario e trasportatore;
- scarico del materiale e seconda pesata (vengono calcolati dal computer tara, lordo e netto);
- Pagamento e consegna della ricevuta.

Il materiale ritirato deve essere non pulverento e non pericoloso. A seguito del processo di trattamento, vengono realizzate tre granulometrie principali di aggregato riciclato:

- Sabbia fine caratterizzata da una dimensione massima di 4 mm;
- Stabilizzato intermedio con una dimensione di 8 mm;
- Ghiaione grossolano con una dimensione massima di 30 mm.

### 5.1.2. Dati forniti durante la visita

Il rifiuto da C&D scaricato sull'apposita piattaforma ed accatastato in corrispondenza del proprio codice EER subisce una prima cernita dei materiali estranei, quali legno e plastiche (operazione di recupero R5) ed una deferrizzazione (materiali ferrosi destinati ad operazioni di recupero R4), con successiva frantumazione attraverso dispositivi mobili. L'aggregato così ottenuto viene poi raggruppato in cumuli diversi a seconda della granulometria ed ogni 1000 m<sup>3</sup> di aggregato riciclato vengono eseguiti test di cessione (UNI EN 10802).



*Figura 68: Cumuli di rifiuto C&D.*



*Figura 69: Dispositivo di frantumazione mobile e deferrizzatore.*



Figura 70: Cumuli di sabbia di riciclo ottenuta da rifiuto C&D.



Figura 71: Differenti granulometrie ottenute dalla frantumazione di rifiuto C&D.

In un'altra area dell'azienda dedicata alla produzione del calcestruzzo (tradizionale) è stato possibile osservare un impianto formato da due tipologie di miscelatori, sfruttati a seconda delle esigenze:

- il primo e più complesso: formato da più torri contenenti il miscelatore, le tramogge con gli aggregati, cemento e additivo, il tutto coordinato con un sistema di miscelazione a planetari;
- il secondo a stampo tradizionale, che fornisce il calcestruzzo direttamente all'interno della betoniera.

L'impianto provvede a confezionare un calcestruzzo già premiscelato, con lavorabilità e acqua controllata (dove non vi è più la necessità che la betoniera misceli). Gli errori consentiti sono del 3% sugli aggregati, del 3% sull'acqua e del 5% sugli additivi per piccoli quantitativi. Le pesi devono essere tarate annualmente. Nelle tramogge sono presenti delle sonde che monitorano l'umidità presente nel silos.

Il materiale fornito viene controllato anche in cantiere (D.M. 17/01/2018), ovvero:

- se il cantiere prevede un quantitativo di materiale fino a 1500 m<sup>3</sup>, allora devono essere realizzati 2 cubi ogni 100 m<sup>3</sup> di materiale omogeneo. Durante un controllo

statistico la resistenza maggiore dei cubetti non deve superare il valore  $R_{ck} + 3,5 \text{ Mpa}$  del calcestruzzo di riferimento, invece quella inferiore non deve essere inferiore al valore  $R_{ck} - 3,5 \text{ MPa}$ ;

- se il quantitativo di calcestruzzo è superiore ai  $1500 \text{ m}^3$  i controlli sono più serrati ed è necessario tenere conto dello scarto quadratico medio, delle prove sul fresco e della massa volumica.

Tale impianto ha il notevole vantaggio di poter erogare il calcestruzzo confezionato direttamente sulla betoniera. Viene utilizzato anche per i misti cementati confezionati appositamente per i sottofondi stradali.

Lo slump viene calcolato automaticamente in base allo sforzo del miscelatore, a differenza delle normali pratiche in cui questo viene calcolato dalla betoniera tramite manometri.



*Figura 72: Miscelatore del calcestruzzo con tramogge contenenti i vari componenti.*

### ***Informazione generale sui costi e ricavi degli impianti di trattamento in Lombardia***

Il rifiuto da C&D ha un costo di conferimento presso l'impianto di recupero di circa  $10 \text{ €/t}$  a fronte di un costo di  $16-20 \text{ €/t}$  per il conferimento in discarica. I costi di trattamento, che incidono notevolmente sul prezzo dell'AR, per un trattamento semplice ammontano (a titolo di esempio) a circa  $7 \text{ €/t}$ . Dato variabile rispetto a: singoli impianti specifici e procedura di trattamento più o meno spinta.

I ricavi ottenuti dall'accettazione del rifiuto C&D contribuiscono alla copertura dei costi di gestione, e conseguentemente consentono di ottenere un prezzo di vendita abbastanza competitivo.

L'esecuzione di trattamenti di selezione più spinti potrebbe essere effettuata, ad esempio, nel caso di un recupero degli aggregati per la produzione di calcestruzzi. In questo caso il maggior costo di trattamento verrebbe compensato dalla vendita di un materiale di maggior pregio.

## 5.2. Raccordo A35-A4

### 5.2.1. Descrizione dell'esperienza

La visita si è svolta in data 8 Settembre 2017 presso il raccordo autostradale A35-A4 "BreBeMi" in fase di completamento. In cantiere era in fase di realizzazione lo strato portante della strada attraverso il riciclaggio a freddo del fresato della preesistente pavimentazione. Gli aggregati fresati sono stati combinati con cemento, acqua, emulsione bituminosa ed eventuali additivi, conservati all'interno di tre cisterne su tre mezzi di lavoro separati, ma collegati l'uno all'altro, in modo da formare il cosiddetto "treno di riciclaggio". La soluzione una volta posata è stata livellata, a ripristino dei piani, attraverso la macchina movimento terra "Motor Greder" tramite un sistema GPS ed in seguito compattata da rullo vibrante e rullo gommato a ruote sfalsate.



*Figura 73: Greder (mezzo movimento terra) dotato di livella collegata ad un sistema GPS.*

È stato così effettuato un riutilizzo del 100% del fresato stradale all'interno dello strato portante della nuova strada (di 15 cm di spessore). Sopra tale strato sono stati poi predisposti altri 6 cm di strato filler intermedio e 4 cm di manto di usura drenante. Questi ultimi due sono stati realizzati utilizzando una percentuale molto inferiore, se non nulla, di aggregati riciclati, soprattutto nello strato superficiale destinato a garantire una prestazionalità elevata. Per lo strato d'usura una valida alternativa agli aggregati naturali è rappresentata dalle scorie di acciaieria, grazie alle loro ottime capacità drenanti. L'unico aspetto sfavorevole di questa sostituzione riguarda il maggior peso delle scorie.



*Figura 74: Mezzi contenenti cemento, emulsione ed acqua che formano il cosiddetto "treno".*

## 5.2.2 Dati tecnici e prescrizioni del Capitolato Speciale d'appalto

Gli aggregati provenienti dal conglomerato di recupero sono definiti col termine tecnico di "conglomerati bituminosi riciclati a freddo per strati di base con emulsione bituminosa modificata sovrastabilizzata e cemento (MCAD\_EM)". Per la realizzazione della miscela finale, ai fini del raggiungimento delle caratteristiche tecniche (granulometria, resistenza, portanza), è consentita l'integrazione con aggregati frantumati di cava nella percentuale massima del 30%.

- *Leganti e acqua*

- *Legante bituminoso*

Il legante bituminoso è quello proveniente dall'emulsione formulata con bitume modificato. Il bitume proveniente dal conglomerato bituminoso riciclato non influenza il tenore di emulsione derivante dallo studio della miscela. Tale emulsione varierà dal 3% al 4% sulla base del peso degli aggregati e dei requisiti riportati nella Tabella 69.

Parametro	Normativa	Valori	Classe UNI EN 13808
Contenuto di acqua	UNI EN 1428	40 ± 1%	-
Contenuto di bitume	UNI EN 1428	60 ± 1%	5
Contenuto di legante (bitume + flussante)	UNI EN 1431	>59%	5
Contenuto flussante	UNI EN 1431	0%	-
Sedimentazione a 7 giorni	UNI EN 12847	≤10%	3
PH (grado di acidità)	UNI EN 12850	2-4	-
Indice di rottura	UNI EN 13075-1	170-230	6
Stabilità al cemento	UNI EN 12848	< 2	6
Bitume residuo (per evaporazione)			
Penetrazione a 25°	UNI EN 1426	50-70 dmm	-
Punto di rammollimento	UNI EN 1427	> 60°C	-
Punto di rottura (Fraas)	UNI EN 12593	< -13°C	-
Ritorno elastico a 25°	UNI EN 13398	≥ 50%	4

Tabella 69: Caratteristiche legante bituminoso.

- *Legante cementizio*

È stato utilizzato cemento normale di classe 32.5 tenendo conto dell'aggressività dell'ambiente, scelto tra i tipi CEM I (cemento portland), CEM III (cemento d'altoforno) e CEM IV (cemento pozzolanico). La percentuale di cemento sarà compresa tra il 2% e il 4% sul peso degli inerti asciutti. Per una buona duttilità della miscela si consiglia di non superare il 2,5%. Il cemento dovrà essere qualificato in conformità alla direttiva 89/106/CE sui prodotti da costruzione ed accompagnato da marcatura CE.

- *Acqua*

L'acqua deve essere esente da impurità dannose, alcali, oli, acidi, materia organica e altre sostanze nocive, e inserita con una percentuale tra il 3% e l'8%, valutata in sede di progettazione.

- *Aggregati*

- *Aggregato vergine*

L'aggregato, ove necessario per integrare il fresato d'asfalto, sarà costituito da materiale vergine, distinto in aggregato grosso ed aggregato fino. Qualora il bitume nel conglomerato da riciclare sia maggiore del 5%, la miscela dovrà comunque prevedere l'utilizzo di una porzione di aggregato vergine da definire in occasione dello studio della miscela. Gli aggregati vergini o da integrazione dovranno essere qualificati in conformità alla direttiva 89/106/CEE. L'aggregato grosso dovrà rispettare i dati della Tabella sottostante.

Parametro	Metodo di prova	Valori richiesti
Resistenza alla frammentazione (Los Angeles)	UNI EN 1097-2	≤30%
Percentuale di particelle frantumate	UNI EN 933-5	80%
Dimensione max	UNI EN 933-1	30 mm
Passante allo 0.063	UNI EN 933-1	≤1%
Resistenza al gelo e disgelo	UNI EN 1367-1	≤1%
Spogliamento	UNI EN 12697-12	≤30%
Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	≤30%
Assorbimento di acqua	UNI EN 1097-6	≤1.5%

Tabella 70: Requisiti aggregati grossolani vergine.

La designazione dell'aggregato fine dovrà essere effettuata secondo la norma UNI EN 13043. La frazione fine deve avere una dimensione massima di 4 mm.

Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8	≥60%
Quantità di frantumato	-	100%
Indice di plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892-12	NP
Limite liquido	UNI CEN ISO/TS 17892-12	≤25%

Tabella 71: Requisiti aggregati fini vergine.

Il possesso dei requisiti elencati nelle tabelle deve essere verificato dalla Direzione Lavori, la quale deve presentare gli attestati di conformità almeno 15 giorni prima dell'inizio dei lavori.

- *Aggregato proveniente dal conglomerato di recupero*

Per conglomerato di recupero si intende il conglomerato proveniente dalla demolizione della pavimentazione preesistente con idonee fresatrici. Se non presente il pulvimixer, se la miscelazione è avvenuta tramite impianto mobile, prima del suo impiego il conglomerato riciclato deve essere vagliato per eliminare eventuali elementi di dimensione superiore ai 32 mm.

- *Granulometria della miscela*

La miscela di aggregati, compresa quella proveniente da conglomerato bituminoso riciclato, dovrà rispondere alle prescrizioni granulometriche riportate nella Tabella 72.

<b>Serie crivelli e setacci UNI</b>	<b>mm</b>	<b>Passante %</b>
Setaccio	31.5	100
Setaccio	20	68-92
Setaccio	16	50-78
Setaccio	8	36-60
Setaccio	4	25-48
Setaccio	2	18-38
Setaccio	0.5	8-21
Setaccio	0.25	5-16
Setaccio	0.063	4-9

*Tabella 72: Prescrizioni granulometriche da rispettare.*

- *Studio della miscela*

Per una corretta valutazione del conglomerato riciclato devono essere eseguite analisi granulometriche su campioni prelevati dal sito di stoccaggio o direttamente dalla pavimentazione fresata. Prima di definire la giusta combinazione di leganti, deve essere determinato il contenuto ottimale di acqua sulla miscela granulare con il 2% in peso del cemento. Sono realizzati provini di 150 mm pesati prima e dopo la compattazione al fine di determinare l'eventuale acqua espulsa. I provini così ottenuti, testati con varie percentuali d'acqua, devono essere essiccati fino a peso costante in stufa a 40°C e sottoposti alla prova per la valutazione della massa volumica (UNI EN 12697-6/procedura D). Il contenuto ottimo di acqua sarà quello che permette di raggiungere il valore più elevato di massa volumica della miscela (secca) e un quantitativo di acqua espulsa durante la compattazione minore dell'1%. Allo stesso modo devono essere confezionati provini con differenti quantità di emulsione bituminosa e cemento. I provini così confezionati devono subire una maturazione a 40°C per 72 ore ed in seguito, dopo condizionamento per 4 ore in forno a 25°C, devono essere sottoposti a prova di trazione indiretta (UNI EN 13286-42) e compressione semplice. Quelli con la miscela ottimale devono essere testati al fine di determinare anche la perdita di resistenza in condizioni speciali, la densità geometrica ed il modulo di rigidità. La resistenza a trazione indiretta dopo imbibizione deve risultare almeno il 70% di quella ottenuta su

provini non immersi in acqua. L'impresa deve presentare almeno 15 giorni prima dall'inizio dei lavori la composizione delle miscele che intende adottare.

- *Confezione e posa in opera delle miscele*

Il conglomerato bituminoso riciclato a freddo può essere realizzato mediante un "treno" di riciclaggio costituito da: fresa, macchina stabilizzatrice (pulvimixer), autobotte per l'emulsione, autobotte per l'acqua, livellatrice e almeno 2 rulli. Il rullo vibrante è caratterizzato da un peso > 18 ton mentre quello gommato da un peso > di 25 ton. In alternativa all'impianto di riciclaggio semovente si può utilizzare un impianto mobile da installare in cantiere.

- *Controlli*

Il controllo della qualità degli strati deve essere effettuato mediante prove di laboratorio sui materiali costituenti, miscela, sulle carote estratte della pavimentazione e con prove in situ. Sui materiali costituenti devono essere verificate le caratteristiche di accettabilità. Dovranno essere effettuati controlli giornalieri sulla quantità di emulsione da impiegare, sulla composizione granulometrica, sulla densità in sito, sulle resistenze diametrali (ITS e CTI), oltre a controlli periodici sulle attrezzature e settimanali su modulo di rigidità e resistenza a trazione. Sulla miscela devono essere determinate la percentuale di bitume, la percentuale d'acqua e la granulometria degli aggregati. A compattazione ultimata la densità in sito ( $\gamma_{SITU}$ ), nel 95% dei punti analizzati, non dovrà essere inferiore al 95% del valore di riferimento misurato in laboratorio sulla miscela costipata con pressa giratoria a 100 giri. A lavoro finito ogni 200 m di fascia stesa sarà prelevato un campione di carota per la verifica degli spessori. Lo spessore verrà determinato facendo la media delle misure rilevate dalle carote estratte dalla pavimentazione per un km. I provini realizzati in cantiere, maturati in camera climatica per 72 ore a 40°C e condizionati per 4 ore a 25°C devono avere:

- Resistenza a trazione indiretta  $\geq 0.32$  MPa;
- Compressione semplice  $\geq 1.2$  MPa;
- Coefficiente di trazione indiretta  $\geq 60$  MPa;
- Modulo di rigidità a 20°C con deformazione diametrale imposta di 50 microstrain.

Per quanto riguarda il controllo prestazionale, esso sarà effettuato attraverso la valutazione del Modulo Elastico Dinamico con apparecchiatura LWD a 4 ore dalla compattazione e dovrà essere maggiore di 50 MPa.

### 5.3. Cantiere con destinazione produttiva

Il 18 Ottobre 2017 è stata effettuata la visita presso un cantiere a destinazione produttiva in cui è prevista l'edificazione di capannoni. Sul sito era in fase di realizzazione lo strato di sottofondo e di riempimento dell'intera area mediante utilizzo di aggregati riciclati (Figura 75). I quantitativi impiegati in tale operazione sono stati considerevoli: circa 35000-40000 m<sup>3</sup>. L'aggregato è stato trasportato in sito, disteso tramite bulldozer cingolati ed infine compattato tramite rullo compressore (Figura 76).



*Figura 75: AR depositati in cantiere.*



*Figura 76: Bulldozer e rullo compressore all'opera.*

### 5.4. Cantiere Garibaldi (Milano)

I dati forniti per questo cantiere di grandi dimensioni (già concluso) mostrano che l'aggregato riciclato è stato utilizzato solo come magrone di sottofondazione non strutturale. Il resto del calcestruzzo, essendo destinato a garantire alte resistenze, è stato progettato con aggregati naturali senza ricorrere, perciò, all'inerte riciclato.

## 6. Conclusioni e sviluppi futuri

Alla luce di quanto emerso dall'attività di ricerca sviluppata, è possibile individuare una serie di indicazioni tecniche ed operative in merito al recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione come aggregati riciclati all'interno del settore delle costruzioni. In particolare, durante lo svolgimento del lavoro di ricerca è stato redatto un Rapporto di sintesi, integralmente riportato in questo capitolo, che, a partire dalla definizione di rifiuto C&D, descrive e fornisce indicazioni operative sul recupero dei rifiuti C&D per la produzione di aggregati riciclati, nonché una valutazione complessiva sulla fattibilità di tale recupero.

### 6.1. Caratteristiche dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) e degli aggregati riciclati (AR)

#### 6.1.1. Rifiuti da costruzione e demolizione (C&D)

I rifiuti inerti generati da attività di costruzione e demolizione si definiscono, sulla base del D.Lgs 36/2003 art.2 come *“rifiuti solidi che non subiscono alcuna trasformazione chimica, fisica o biologica significativa; i rifiuti inerti non si dissolvono, non bruciano né sono soggetti ad altre reazioni chimiche o fisiche, non sono biodegradabili e, in caso di contatto con altre materie, non comportano effetti nocivi tali da provocare inquinamento ambientale o danno alla salute umana...”*.

Molti di questi derivano dal settore edile, per tale motivo si tende ad identificare i rifiuti inerti con i cosiddetti rifiuti da costruzione e demolizione (C&DWaste) che rientrano nella categoria di **“rifiuti speciali non pericolosi”** secondo quanto affermato nell'art.184 del D.Lgs 152/06.

La composizione dei rifiuti da costruzione e demolizione è estremamente *variabile* in funzione di diversi fattori tra cui: tecniche costruttive locali, clima, materie prime e materiali da costruzione localmente disponibili. Sono per la maggior parte costituiti da materiali molto diversi tra loro: calcestruzzo, laterizi, ceramiche, terre di scavo ed altri materiali come gesso, metalli, legno e vetro. In Tabella 1 vengono riportati i principali componenti di tali rifiuti.

Riutilizzabili per la produzione di aggregati riciclati	Da eliminare o ridurre al minimo nel processo di produzione degli aggregati riciclati
Calcestruzzo (precompresso o normale)	Terra vegetale
Cemento e malte varie	Legname
Conglomerati e misti bituminosi	Carta, cellulosa e polistirolo
Mattoni, laterizi, tegole e blocchi	Metalli
Ceramica, piastrelle, rivestimenti	Plastica
Elementi litici	Gesso
	Materiali compositi
	Vernici
	Materiali per isolamento termico ed acustico
	Amianto (smaltimento selettivo preventivo)

Tabella 5: Componenti principali dei rifiuti da costruzione e demolizione.

I rifiuti da C&D sono identificabili nel Capitolo 17 del EER (Elenco Europeo dei Rifiuti): “*Rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (compreso il terreno escavato proveniente da siti contaminati)*”.

- 17 01: Cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche;
- 17 02: Legno, vetro e plastica;
- 17 03: Miscele bituminose, catrame di carbone e prodotti contenenti catrame;
- 17 04: Metalli (incluse le loro leghe);
- 17 05: Terra (compresa quella escavata proveniente da siti contaminati), rocce e materiale di dragaggio;
- 17 06: Materiali isolanti e materiali da costruzione contenenti amianto;
- 17 08: Materiali da costruzione a base di gesso;
- **17 09**: Altri rifiuti dall’ attività di costruzione e demolizione.

Sebbene si possano individuare flussi prevalenti a base di materiali ceramici e cementizi, anche con presenza di gesso, spesso tali rifiuti sono caratterizzati da una forte **eterogeneità**, dovuta al fatto che attualmente le tecniche di demolizione adottate tendono a misurare l’efficacia del processo rispetto alla fattibilità tecnica e alla praticabilità economica dell’intervento.

### 6.1.2. Aggregati riciclati (AR)

Attraverso il trattamento dei rifiuti provenienti dalle attività di costruzione e demolizione si ottengono aggregati riciclati (AR) destinati ad essere nuovamente utilizzati nell’ambito delle costruzioni. Tali prodotti devono rispondere ai requisiti di accettazione previsti dalle norme vigenti in materia **tecnica** (requisiti geometrici, fisici, chimici, di durabilità e geotecnici), **ambientale** (deve essere verificato che le impurità presenti e il rilascio di sostanze potenzialmente inquinanti siano inferiori ai limiti stabiliti) e di idoneità all’utilizzo, in base al tipo di prodotto e destinazione (quali opere edili, stradali e recuperi ambientali).

Innanzitutto è necessario osservare come gli aggregati di riciclo siano costituiti da una miscela di grani di natura diversa e non da materiali omogenei (Figura 1).

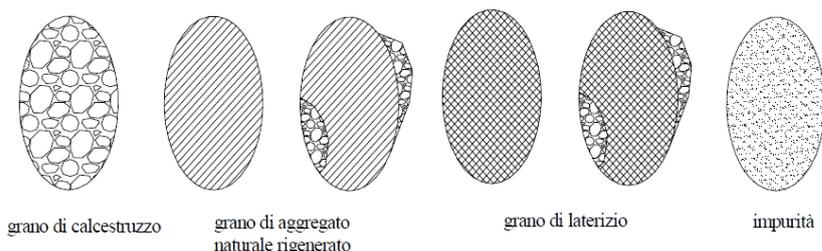


Figura 1: Tipologie di aggregati riciclati.

È quindi necessario operare una distinzione tra aggregati riciclati provenienti dalla demolizione di solo calcestruzzo ed aggregati riciclati “tout venant” provenienti da macerie eterogenee. Un’analisi visiva degli aggregati riciclati permette di distinguere tra grani di solo calcestruzzo, aggregati naturali ricoperti di vecchia malta cementizia ed aggregati naturali più puliti che possono avere piccoli residui di malta. Questo ad ulteriore conferma della eterogeneità di questi materiali, già in precedenza osservata.

La possibilità di riutilizzare questi aggregati richiede un'accurata conoscenza *preliminare* dei fattori che possono renderne difficoltoso il recupero. In primo luogo è importante individuare le frazioni che possono peggiorare la composizione merceologica e le caratteristiche qualitative del materiale, quali la presenza di elementi fisici (polveri, terreno vegetale, polistirolo, vetro, legno, plastica e metalli) e di elementi chimici principali e in traccia.

E' necessario quindi, in funzione delle potenziali applicazioni per il recupero dell'aggregato, monitorare e verificare questi parametri per garantire prestazioni tecniche adeguate ed ambientalmente sostenibili.

#### 6.1.2.1. Composizione chimica

Riguardo alla **composizione chimica** è importante individuare gli elementi principali ed in traccia, in relazione anche alle frazioni merceologiche di provenienza.

- **Eterogeneità del materiale**

Da un punto di vista chimico l'eterogeneità del materiale si traduce in una variabilità della sua composizione interna, con una conseguente variazione di concentrazione dei diversi elementi chimici. In particolare è possibile distinguere due categorie di costituenti:

- elementi *principali* (ordine  $g\ kg^{-1}$  TS) che dipendono dai componenti contenuti nelle diverse frazioni merceologiche e che variano generalmente in modo lieve (7-38%) al variare della composizione del rifiuto da costruzione e demolizione: silicio, alluminio, calcio, potassio, sodio, ferro, magnesio e zolfo (solfati);
- elementi *in traccia* (ordine  $mg\ kg^{-1}$  TS) presenti in concentrazioni decisamente inferiori rispetto ai precedenti, che variano, generalmente in modo considerevole (15-126%) al variare della composizione del rifiuto (arsenico, bario, cadmio, cloruri, cobalto, cromo, rame, litio, manganese, molibdeno, nichel, fosforo, piombo, antimonio, selenio, zinco, stronzio, e vanadio).

- **Concentrazioni in riferimento ai limiti del D.lgs 152/2006**

Su base normativa è necessario un confronto delle concentrazioni tipiche dei principali elementi presenti con i limiti per l'utilizzo in suoli con specifica destinazione d'uso (*D.lgs 152/2006 Parte IV Allegato 5, Tabella 1*). Dall'analisi dei dati si osserva come in linea generale tutti gli elementi, anche quelli presenti in una certa concentrazione, risultano inferiori ai limiti previsti per le colonne A e B.

Tra i principali contaminanti, sulla base della letteratura, sono individuabili alcune criticità, in particolare:

- arsenico, piombo, vanadio e zinco che talvolta presentano un rapporto tra valore di concentrazione e valore limite tendente al 50%. Tali parametri non risultano essere quindi del tutto trascurabili poiché un leggero aumento della concentrazione potrebbe portare ad un eccesso rispetto al limite normativo;
- cromo che, pur rispettando ampiamente il limite, richiede un'attenzione ed una verifica per quanto riguarda il cromo esavalente (VI), pericoloso per la salute umana.

- PCB (policlorobifenile) che si attesta intorno al 30% rispetto al limite di normativa, risultando quindi non del tutto trascurabile.
- [Composizione al variare delle frazioni presenti nell' aggregato riciclato AR](#)

Nonostante vi siano in letteratura pochi studi relativi alla provenienza dei contaminanti in funzione dei materiali che compongono l'AR, è possibile evidenziare una distinzione in base alla presenza prevalente di componenti **cementizie** e **ceramiche**. Infatti:

- silicio, alluminio e calcio risultano essere i componenti principali associati alla frazione cementizia;
- piombo, cromo, nichel e solfati, si denota come la loro concentrazione aumenti all'interno dei campioni misti, questo dovuto alla notevole quantità di componenti eterogenee e soprattutto *ceramiche* (talvolta in aggiunta anche a gesso);
- vanadio, presenta una netta evidenza nei campioni interamente costituiti da fresato d'asfalto; questo è dovuto alla presenza del bitume che, oltre a piccole quantità di zolfo, azoto e ossigeno, contiene inoltre tracce di metalli quali nickel, ferro ed il vanadio stesso.

#### 6.1.2.2. Rilascio di inquinanti mediante test di cessione

In riferimento al **test di cessione** è interessante notare come il rilascio di contaminanti dagli AR sia influenzato da diversi fattori che dipendono principalmente dalle caratteristiche del materiale tra cui: le frazioni di materiali presenti, la granulometria ed il livello di carbonatazione, fattore quest'ultimo che condiziona il pH del materiale, estremamente importante nel regolare i meccanismi di rilascio degli inquinanti.

Diverse sono le esperienze di letteratura riguardanti il rilascio di inquinanti da rifiuti da C&D e da AR da essi prodotti. Il principale limite di tali studi consiste nella forte eterogeneità dei materiali testati e nell'utilizzo di metodiche diverse per l'esecuzione del test di cessione (EN 12457-1, EN 12457-2, EN 12457-3) che non consentono un immediato confronto dei risultati ottenuti.

Nei Paesi europei infatti, vi sono differenti metodiche di esecuzione delle prove per la caratterizzazione della lisciviazione dei contaminanti dai rifiuti. In ambito nazionale, le modalità di esecuzione del test di cessione sono definite nell'Allegato 3 del D.M 5/02/98 e seguono la metodica prevista dalla normativa italiana UNI 12457-2, con un singolo stadio di estrazione, ottenuto su rifiuti granulari (granulometria inferiore a 4 mm), con un rapporto liquido/solido pari a 10 l/kg ed un tempo di contatto tra rifiuto e agente lisciviante (acqua demineralizzata) pari a 24 ore, trascorso il quale il liquido (che costituisce l'eluato) viene filtrato e sottoposto a caratterizzazione chimica. Le altre metodiche testate prevedono condizioni operative diverse, quali un rapporto liquido/solido pari a 2 l/kg nella UNI EN 12457-2; l'applicazione di un doppio stadio di estrazione con rapporti liquido/solido pari a 2 l/kg e 10 l/kg per la UNI EN 12457-3 e, nel caso della UNI EN 12457-4, un singolo stadio di estrazione su materiali con particelle di dimensioni inferiori a 10 mm e un rapporto liquido/solido pari a 10 l/kg.

Dall'analisi della letteratura internazionale, vi è un numero limitato di esperienze che riguardano la valutazione del rilascio di inquinanti attraverso il test di cessione di riferimento per la normativa italiana (UNI EN 12457-2), mentre sono numerose quelle che si rifanno a metodiche differenti quali, in particolare, EN 12457-1 ed EN 12457-3.

Dai dati di letteratura, sulla base di prove di rilascio su AR provenienti da materiali misti, si evidenzia un rilascio maggiore per i seguenti parametri: calcio, solfati, vanadio, cromo, cloruro, selenio, zinco, cadmio, bario e berillio.

In particolare, da alcuni studi emergono elementi che permettono di correlare il rilascio con la tipologia delle diverse frazioni di materiali contenute nell'AR:

- Il **calcio** (parametro per il quale non è previsto un limite nel test di cessione, D.Lgs. 186/2006) viene rilasciato in misura elevata, sia in campioni costituiti da calcestruzzo sia in materiali contenenti elementi di muratura. Tuttavia, concentrazioni maggiori si possono evidenziare nei campioni di calcestruzzo.
- Il **solfato** evidenzia invece un rilascio molto variabile in funzione della composizione del materiale, con un rilascio decisamente più evidente nel caso di campioni contenenti gesso, campioni misti di calcestruzzo e muratura e nelle frazioni di materiali ceramici e laterizi. Nei campioni di calcestruzzo, questo non sembra rappresentare la fonte primaria di rilascio dei solfati la cui presenza, in alcuni casi, è imputabile alle malte che rivestono la superficie del calcestruzzo.
- Il **cromo** può risultare un parametro critico, tanto nelle frazioni composte da calcestruzzo quanto in quelle con materiali ceramici e laterizi. Nel calcestruzzo, il rilascio è imputabile alla presenza nel cemento e alla presenza di fattori favorevoli al rilascio di Cr(VI), quali il pH fortemente basico (tipico delle componenti cementizie) e la presenza in ambiente basico di cromo ossidato, che risulta più solubile del Cr(III). Va precisato che il comportamento a rilascio può essere condizionato dall'età della struttura che può favorire il livello di carbonatazione del calcestruzzo con conseguente riduzione del pH e, quindi, un minore rilascio di cromo (a pH minore prevale il Cr(III) che è insolubile) che risulta anche meno tossico. Nelle frazioni composte da materiali ceramici e laterizi il rilascio di cromo può essere significativo per la presenza non trascurabile in tali componenti (il cromo è utilizzato ad es. in miscela con l'argilla per la produzione di tali materiali).
- Il **vanadio**, seppur con rilasci in genere contenuti, può rappresentare un parametro critico nel caso di campioni contenenti materiali ceramici e laterizi, nei quali la presenza di tale elemento è imputabile al suo contenuto nelle argille primarie per la produzione di ceramiche/laterizi o nei pigmenti di rivestimento.
- I **cloruri** possono presentare un rilascio elevato sia per effetto della presenza nel cemento sia per rilascio da materiali ceramici.
- Elementi presenti in misura minore ma non trascurabile sono nichel, selenio, piombo e COD.
- Elementi presenti in misura minore e trascurabile sono mercurio e cadmio.

## 6.2. Indicazioni tecniche per la produzione dell'aggregato riciclato (AR)

Al fine di ottenere un AR di buona qualità, in grado di garantire specifici requisiti e prestazioni tecniche, è necessario, sottoporre i rifiuti d'origine a specifici pretrattamenti atti a garantire idonee caratteristiche qualitative al prodotto ottenuto.

### 6.2.1. Pretrattamenti

Al fine di migliorare la qualità dell'aggregato riciclato si possono adottare diverse misure sia in fase di demolizione sia durante il trattamento del rifiuto C&D finalizzato a produrre l'AR.

#### 6.2.1.1. Procedura di demolizione selettiva

La demolizione rappresenta un processo di abbattimento di un edificio, una struttura o un manufatto che porta alla produzione di un flusso indifferenziato di macerie per le quali le operazioni di recupero risultano in genere complesse e costose. A fronte di questo è necessario favorire quindi il riciclo dei materiali edili attraverso adeguate tecniche di demolizione che consentano di ottenere la separazione dei rifiuti per frazioni omogenee. A tal fine, risultano particolarmente efficaci soprattutto per interventi di grandi dimensioni sia la demolizione selettiva, che la de-costruzione per fasi successive dell'intero edificio, in quanto assicurano una maggiore omogeneità dei rifiuti prodotti, la riduzione di materiali eterogenei e la dispersione delle impurità.

Per una *buona pratica* di demolizione selettiva sono raccomandabili due fasi esecutive:

- **Progettazione della demolizione:** tramite la conoscenza delle tecnologie costruttive e dei materiali utilizzati nell'opera, la stima delle quantità per ogni singolo rifiuto ed una programmazione delle fasi operative;
- **Esecuzione della demolizione:** ovvero un recupero degli elementi riutilizzabili, separazione dei rifiuti pericolosi, smontaggio degli impianti, demolizione per parti omogenee, demolizione finale della struttura con controllo finale dell'intero processo.

Tale tecnica attualmente è ancora poco praticata a causa di costi elevati, dovuti al massiccio impiego di manodopera e ai tempi lunghi di esecuzione.

Nella realtà accade infatti che la tecnica di demolizione venga adottata considerando come prioritari l'aspetto economico e la velocità di smantellamento senza tenere conto della necessità di ricollocare nel processo produttivo le diverse tipologie di rifiuti e componenti. Queste considerazioni spingono a demolire soprattutto in maniera tradizionale, con tecniche non selettive, che rendono difficile la valorizzazione dei rifiuti edili. I materiali di risulta infatti presentano una composizione fortemente eterogenea (come dimostra anche la composizione chimica degli stessi) che male si presta ad essere recuperata e riutilizzata.

Proprio per questo la fase di demolizione deve essere quindi **organizzata e controllata** in modo selettivo per dare avvio ad un processo di ottimizzazione che altrimenti verrebbe immediatamente vanificato a monte.

### 6.2.1.2. Selezione di frazioni specifiche

La demolizione selettiva permette di ottenere rifiuti da demolizione omogenei, senza la presenza di eventuali frazioni pericolose che è stato possibile rimuovere nelle fasi preliminari. A fronte di questo, il loro accumulo e deposito temporaneo dovrebbe essere effettuato per categorie omogenee (es. mattoni, mattonelle, componenti cementizie) attribuendo a ciascuna frazione il rispettivo codice EER in modo tale da evitare, per quanto possibile, cumuli di rifiuti misti che verranno successivamente avviati agli impianti di recupero. Questo processo offre diversi vantaggi tra cui l'elevato livello di qualità delle frazioni maggiormente idonee al recupero e il minore rischio di contaminazione di tali frazioni con componenti pericolose.

### 6.2.2. Trattamenti

Le operazioni di recupero dei rifiuti da C&D prevedono l'applicazione di trattamenti più o meno spinti, al fine di ottenere un AR riutilizzabile come sostitutivo degli aggregati naturali di cava. Le operazioni di trattamento possono essere svolte:

- direttamente nel sito dove sono generati (cantiere di demolizione) attraverso l'utilizzo di **impianti di trattamento "mobili"**;
- oppure presso uno specifico stabilimento di recupero e trattamento, definito come **"impianto fisso"**.

Entrambi sono costituiti da componenti meccaniche necessarie per la selezione, frantumazione e pulizia dalle impurità. A seconda dei rifiuti trattati e del tipo di impianto utilizzato ovviamente è possibile ottenere differenti tipi di prodotti riciclati. In particolare, gli impianti di trattamento fissi, caratterizzandosi per una maggiore complessità legata alla contemporanea presenza di diversi sistemi di macinazione in grado di produrre granulometrie diverse di materiale, garantiscono un migliore livello qualitativo dell'aggregato riciclato in uscita.

#### 6.2.2.1. Procedura di doppia frantumazione del rifiuto da C&D

Le operazioni di frantumazione in fase di trattamento del rifiuto C&D sono necessarie per controllare alcuni parametri fondamentali per il futuro utilizzo dell'aggregato riciclato ottenuto. Questo perché permettono il controllo della granulometria, il miglioramento della forma (con il solo processo di frantumazione primaria, di solito si presentano indici di forma e di sfaldatura più alti di quelli degli aggregati naturali) e l'eliminazione dei contaminanti residui. Ovviamente il processo di rimozione totale di questi contaminanti risulta essere ancora piuttosto precario nella maggior parte delle strutture, dal momento che l'output è spesso un AR misto che può presentare componenti indesiderate.

Con l'aumento a 2 stadi di frantumazione, si nota anche come la quantità della pasta di cemento aderente alla superficie dell'aggregato riciclato da calcestruzzo grossolano diminuisca, favorendo in questo modo l'aumento della densità della frazione grossolana, a fronte di una riduzione di densità della frazione fine, parametro questo che deve essere sempre tenuto sotto controllo in quanto responsabile del maggior assorbimento d'acqua

dell'aggregato.

#### 6.2.2.2. Trattamento di pulizia del rifiuto C&D

A seconda della provenienza del materiale d'origine, può risultare utile effettuare adeguate operazioni di pulizia dei rifiuti da C&D. Questo per:

- eliminare le impurità indesiderate;
- favorire una diminuzione di sali (es. cloruri), a fronte di un possibile riutilizzo per il confezionamento di calcestruzzi.

Per la pulizia possono essere applicate diverse tipologie di macchinari, sia ad aria che ad acqua. In particolare:

- ad **aria**: attraverso dei *separatori ad aria*, i materiali più leggeri quali carte, plastiche e legno, vengono separati sfruttandone la densità e forma differente. La selezione viene pertanto ottenuta sottoponendo il materiale ad un flusso di corrente d'aria in grado di trascinare con sé la frazione flessibile più leggera e di lasciare depositata quella rigida più pesante.
- ad **acqua**: vi è, a titolo di esempio, la *lavatrice a spruzzo* (nei vagli piani vengono inseriti degli spruzzatori) in cui la corrente d'acqua lava le pezzature più grosse trascinando con sé le particelle più piccole. A valle occorre poi provvedere alla separazione delle parti più fini dall'acqua ed alla successiva asciugatura del materiale stesso.

## 6.3. Indicazioni tecniche per l'utilizzo dell'aggregato riciclato (AR)

### 6.3.1. Calcestruzzo e manufatti cementizi

#### 6.3.1.1. Aspetti chimici

Per il confezionamento di calcestruzzi con aggregati riciclati, dal punto di vista chimico ed ambientale sono necessari accorgimenti utili a garantire un prodotto finale con le caratteristiche e prestazioni attese.

La composizione chimica degli aggregati riciclati (AR) risulta essere un fattore di notevole importanza, questo perché l'origine del rifiuto che costituirà poi l'aggregato riciclato e le proprietà del materiale riciclato non sempre sono conosciute. In generale, si registra un comportamento di minore resistenza agli attacchi chimici (carbonatazione, attacco solfatico, attacco dei cloruri, ecc) del calcestruzzo con AR peggiore rispetto al calcestruzzo confezionato con aggregati naturali. Infatti, l'aumento della percentuale di AR in sostituzione agli aggregati naturali provoca un aumento della vulnerabilità del conglomerato cementizio a causa della maggiore porosità e permeabilità degli AR. Pertanto, è necessario mantenere sotto controllo diversi parametri tra cui quelli nel seguito analizzati.

- **Contenuto di solfati**

I solfati, composti chimici provenienti prevalentemente dall'intonaco di gesso e dal cemento della malta aderente agli aggregati riciclati, se messi a contatto con i componenti del calcestruzzo risultano essere potenzialmente reattivi e in grado quindi di dare origine a reazioni espansive e degradanti, come ad esempio fessurazioni o espulsioni di porzioni consistenti di struttura.

Per questo motivo è indispensabile sottoporre gli AR destinati al confezionamento del calcestruzzo ad un preventivo esame teso ad accertare l'assenza od un contenuto massimo di minerali solfatici potenzialmente pericolosi.

La norma UNI 8520-2 suggerisce, a tale scopo, di effettuare un preliminare esame petrografico e, qualora venisse accertata la presenza di gesso, di determinare il contenuto di solfati solubili in acido per cui è previsto un valore limite dello 0,2% in massa, inteso come valore di concentrazione della sostanza secca. Dai dati riportati in letteratura e da esperienze pratiche risulta una concentrazione di solfati estraibili variabile tra 0,1 e 0,5%, che quindi, in funzione della natura del rifiuto, può risultare superiore al limite indicato. Questo sottolinea nuovamente l'importanza di effettuare trattamenti di selezione tali da garantire la separazione di materiali, come il gesso, che possono contribuire alla maggiore presenza di tale composto.

- **Contenuto di cloruri**

Il contenuto di cloruri deve essere sempre controllato, in quanto può portare alla corrosione delle barre di rinforzo utilizzate all'interno del calcestruzzo. Tale parametro deve essere mantenuto sotto controllo, anche se generalmente rispetta i limiti previsti dalla normativa UNI 12620 per l'impiego come aggregati per calcestruzzo. Tuttavia, in caso di necessità, sono state studiate diverse possibili soluzioni per ridurre i quantitativi di cloruri.

Tra le più semplici vi è quella con il lavaggio ad acqua come mostrato precedentemente, un metodo rapido ed efficace per ridurre la concentrazione di questo elemento. Tale metodo è realizzabile in quanto i cloruri non sono legati alla microstruttura cementizia e quindi sono facilmente rimovibili.

Dopo accurato lavaggio o la totale immersione in acqua per almeno 2 settimane (*Martín-Morales et al., 2010*), la quantità di cloruro decrementa fino al punto tale che gli aggregati riciclati ottenuti possono essere utilizzati nel calcestruzzo strutturale senza rischio di corrosione.

La norma UNI 8520-2 stabilisce un valore limite dello 0,03%, inteso come valore di concentrazione della soluzione secca. Sulla base dei dati di rilascio di cloruri in acqua (range di 0,014% - 0,035%) questo limite sembra tendenzialmente verificato. Per il limite previsto per i calcestruzzi armati, pari a  $0,2 \div 0,4\%$ , l'apporto di cloruri dall'AR si stima in misura anche dello 0,4% in funzione naturalmente della qualità dell'AR ma anche del dosaggio impiegato nella miscela cementizia. Al fine di contenere tale parametro, potrebbero essere necessarie operazioni di lavaggio, unitamente ad una limitazione dei quantitativi recuperati nella miscela.

- **Contenuto di alcali**

La presenza di alcali, generalmente provenienti dal cemento e della silice reattiva all'interno degli aggregati, può portare ad una reazione espansiva alcali-aggregato, una delle cause di degrado chimico del calcestruzzo.

Prime valutazioni riportate in letteratura evidenziano che gli AR derivanti da calcestruzzo possono essere considerati come dei normali aggregati che non generano preoccupazioni riguardo al contenuto di alcali. In generale, per precauzione, è opportuno monitorare il contenuto di tali sostanze negli AR prima del loro impiego.

### 6.3.1.2. Condizioni operative ottimali

La possibilità di utilizzare gli aggregati riciclati in sostituzione degli aggregati naturali nel calcestruzzo si è ultimamente consolidata e ha dato risultati promettenti in diverse applicazioni strutturali. Oggi si dispone di informazioni e di dati sulle caratteristiche e sul comportamento di tale materiale che consentono di considerarlo, con la dovuta attenzione, nella definizione di impasti e soluzioni tecniche differenti.

Il settore della ricerca in particolare ha analizzato l'ottimizzazione di alcuni parametri che rappresentano gli elementi chiave per utilizzare al meglio gli aggregati riciclati.

Innanzitutto è necessario identificare la **percentuale di sostituzione ottimale**, poiché, come è emerso una sostituzione totale degli aggregati naturali con quelli di riciclo ha portato a risultati non soddisfacenti dal punto di vista meccanico mentre sostituzioni minime del 10% o 20% hanno generato un calcestruzzo di migliore qualità. La percentuale ottimale identificata è del 30%, la quale rappresenta il miglior compromesso tra un soddisfacente utilizzo di materiale e buone prestazioni meccaniche, che però ha coinvolto solamente gli inerti grossolani.

Tra questi la maggiore criticità è legata senza dubbio all'**assorbimento d'acqua** da parte del materiale riciclato.

La presenza della malta aderente ai granuli determina, oltre ad una ridotta massa volumica, anche valori di assorbimento d'acqua superiori rispetto a quello degli aggregati naturali. L'assorbimento degli aggregati grossi riciclati varia tra il 4% ed il 9% e sembra essere indipendente dalla qualità del calcestruzzo di origine; l'assorbimento degli aggregati fini riciclati può invece raggiungere valori dell'ordine del 12%. A confronto, i valori di assorbimento degli aggregati naturali si attestano invece tra 0,5% e 2,5%.

Per questo gli aggregati riciclati necessitano di tempi lunghi per portarsi in condizione satura a superficie asciutta. La velocità di assorbimento dell'acqua degli aggregati inoltre varia sensibilmente da un tipo a un altro. Questa situazione rende difficoltoso il controllo della lavorabilità, quindi dell'effettivo rapporto acqua/cemento.

A causa della maggiore richiesta di acqua libera delle miscele con aggregati da riciclo e per evitare questi inconvenienti, si ritiene opportuno prevedere:

- contenuti di cemento più elevati per i calcestruzzi con aggregati da riciclo rispetto ai corrispondenti calcestruzzi convenzionali.
- una pre-saturazione degli aggregati mediante bagnatura, ovvero una fase di miscelazione degli aggregati con il solo quantitativo d'acqua necessario a portarli in condizione SSA (superficie satura asciutta). Lo scopo di questo accorgimento è quello di far sì che gli aggregati assorbano quanta più acqua possibile per il raggiungimento della condizione SSA, evitando così l'alterazione del rapporto a/c definito in fase di progettazione e migliorando notevolmente la lavorabilità del calcestruzzo, in conseguenza ad una maggiore disponibilità di acqua non assorbita dagli aggregati stessi.

La maggiore percentuale di pasta di cemento originaria aderente agli inerti, oltre a ridurre la massa volumica e ad aumentare l'assorbimento d'acqua, è causa anche di quello che viene considerato il principale fattore di deterioramento della qualità dei calcestruzzi confezionati con aggregati da riciclo: la **produzione poco controllata di frazioni fini** generate dallo sgretolamento della vecchia malta durante la miscelazione.

Tale fenomeno tende ad alterare la curva granulometrica di partenza e si traduce in una perdita di lavorabilità determinando tempi di inizio e fine presa inferiori rispetto a quelli del calcestruzzo tradizionale.

È interessante inoltre far notare come anche il processo di lavaggio dei rifiuti C&D di partenza (prima specificato) possa contribuire a ridurre l'assorbimento d'acqua dell'AR. In particolare, i risultati di alcuni studi hanno dimostrato che, dopo il lavaggio del rifiuto, i valori di assorbimento d'acqua sono diminuiti addirittura del 35% - 55%, a seguito della rimozione delle particelle fini.

Per tale ragione, le norme tecniche di settore (D.M. 17/01/2018) vietano comunque l'utilizzo delle frazioni riciclate più fini che presentano una maggiore percentuale di malta vecchia rispetto alle granulometrie maggiori.

### 6.3.1.3. Durabilità

La durabilità è la proprietà di un materiale di conservare nel tempo un adeguato livello prestazionale per garantire alla struttura il periodo di esercizio stabilito al momento della progettazione.

Essa è correlata all'interazione materiale-ambiente e quindi alle proprietà microstrutturali del materiale ed all'**aggressività dell'ambiente esterno**. Infatti, il degrado delle strutture in conglomerato cementizio armato è legato anche al processo di corrosione delle armature, che si manifesta, in generale, per il raggiungimento di possibili condizioni limite quali: la carbonatazione del calcestruzzo e l'attacco di cloruri. Proprio per questo sarebbero necessari determinati trattamenti a monte del processo di produzione dell'aggregato atti a prevenire tali fenomeni, come ad esempio il lavaggio del rifiuto C&D in modo tale da ridurre il contenuto di cloruri nell'aggregato da essi ottenuto.

E' possibile affermare inoltre come il comportamento del calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati sottoposto a **cicli di gelo-disgelo**, e quindi soggetto ad invecchiamento accelerato, risulti meno performante rispetto a quello del calcestruzzo confezionato con aggregati naturali. Questo perché la durabilità del calcestruzzo dipende essenzialmente dalla sua *porosità e permeabilità*, proprietà che favoriscono la possibilità da parte degli agenti aggressivi (acqua, ioni salini, etc.) di penetrare nel materiale e quindi di deteriorarlo, in riferimento anche alle considerazioni sopra citate.

Alla luce di ciò, è possibile evidenziare come all'aumento del quantitativo di aggregato riciclato si presenti un aumento di permeabilità, questo spiegato dal fatto che il processo di frantumazione tende a creare fratture nella malta cementizia (generalmente più debole rispetto all'aggregato comune).

Per questo, utilizzando percentuali inferiori di riciclato (ad esempio sino ad un massimo del 50%), si possono ottenere calcestruzzi con maggiori qualità prestazionali ed una durabilità superiore. Ciò a favore anche al fenomeno di **ritiro igrometrico**, che nel caso di calcestruzzi riciclati risulta maggiore rispetto a quelli tradizionali e aumenta con l'aumentare della percentuale di sostituzione degli aggregati. Per avere un dato di riferimento, su di un calcestruzzo con una sostituzione del 70% dell'aggregato naturale con quello di riciclo, a 100 giorni dal getto e senza l'aggiunta di additivi riduttori del ritiro, è stato rilevato un accorciamento notevole di 250  $\mu\text{m}/\text{m}$  del campione di riferimento.

Importante risulta essere anche il fatto che alcune forme di silice presenti negli elementi lapidei e quindi negli aggregati non sono stabili in presenza di alcali provenienti dal cemento (sodio e potassio) e possono dar luogo a fessurazioni irregolari o espulsioni localizzate di materiale (pop - out) nei manufatti. Questo si verifica attraverso una reazione chimica, detta **ASR (Alkali-Silica Reaction)**, che porta alla formazione di silicati idrati alcalini a struttura gelatinosa che si depositano all'interno delle porosità del materiale, all'interfaccia pasta-aggregato.

Gli alcali sono sempre presenti nel calcestruzzo in quanto contenuti nei cementi o provenienti dall'ambiente esterno (acqua di mare ricca in cloruro di sodio). Pertanto, l'impiego di aggregati contenenti una particolare forma di silice capace di reagire con gli alcali e la cui presenza può essere accertata con difficoltà e tempi lunghi, espone il calcestruzzo ad un forte rischio di dissesto.

Per questo motivo la norma UNI 8520-2 impone che gli aggregati per calcestruzzo (naturali,

industriali o riciclati) vengano sottoposti prima del loro impiego ad un esame petrografico da condursi in accordo alla norma UNI-EN 932-3, per accertare la presenza di minerali alcali reattivi. Nella eventualità che venga rilevata la presenza di una delle forme silicee pericolose, tuttavia, prima di scartare l'aggregato si procede ad effettuare una prova di espansione accelerata su prismi di malta confezionati con l'aggregato in esame e con un cemento volutamente ricco in alcali ( $\text{Na}_2\text{O} > 1\%$ ), mantenuti in una soluzione di idrossido di sodio alla temperatura di  $80^\circ\text{C}$ : trascorsi 16 giorni, l'espansione deve risultare al massimo pari allo 0.1%. In presenza di espansioni superiori a quella massima prevista nella prova accelerata, l'aggregato ancora non è da ritenersi inidoneo, ma deve essere sottoposto ad una ulteriore verifica che consiste nel misurare l'espansione in condizioni meno severe. Solo nell'eventualità che anche questa prova dovesse fornire esito negativo l'aggregato (nel nostro caso riciclato) viene scartato.

Al fine di minimizzare o possibilmente annullare la possibilità che la reazione insorga, è possibile ricorrere, durante il confezionamento del calcestruzzo, all'utilizzo di cementi pozzolanici contenenti ceneri volanti oppure ai cementi d'altoforno; se questi non fossero disponibili, come sovente avviene in alcune aree del Paese, soprattutto durante il periodo invernale, una regola pratica è quella di aggiungere al cemento disponibile (generalmente Portland al calcare) per ogni grammo di alcali in eccesso rispetto ai  $3 \text{ kg/m}^3$  (ritenuti il limite critico al di sotto del quale la reazione non si manifesta):

- 40 g di cenere volante, oppure,
- 15 g di fumo di silice.

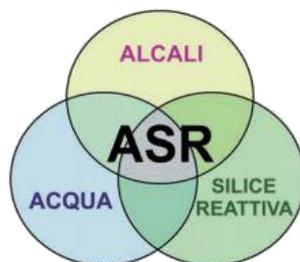


Figura 6: Alkali-Silica Reaction.

## 6.3.2. Opere stradali e geotecniche

### 6.3.2.1. Aspetti ambientali

Nell' utilizzo di aggregati riciclati in applicazioni stradali e geotecniche, la lisciviazione di composti pericolosi sul suolo sottostante risulta essere una delle principali preoccupazioni ambientali, con potenziali conseguenze quali ad esempio l'inquinamento delle falde acquifere. Pertanto, si rende necessario valutare il comportamento di rilascio degli inquinanti, sia prima che a seguito della **compattazione**, fenomeno che garantisce, in generale, un incremento della densità del materiale.

Quest'ultimo aspetto è importante al fine di verificare se e in quale misura la compattazione

in sito possa influenzare il rilascio di inquinanti all'interno dell'acqua percolata attraverso gli aggregati compattati.

In particolare si evidenzia come **prima della compattazione** gli elementi rilasciati in maggiore misura risultino essere:

- solfati, rilevati in tutti i materiali misti (principalmente composti da materiali ceramici e gesso);
- cloruri, che possono presentare un rilascio elevato sia nei materiali cementizi che ceramici;
- cromo, rilasciato prevalentemente negli AR contenenti le maggiori quantità di calcestruzzo frantumato e malte.

In seguito alla compattazione si osserva, invece, una *diminuzione* dei livelli di cromo e solfato per gli aggregati misti, mentre si ha un *aumento* di rilascio (anche di solfati) per quelli derivanti dal calcestruzzo, per i quali si osserva anche un maggiore rilascio cumulativo di metalli.

È stato osservato come il materiale misto, con una resistenza alla frammentazione (coefficiente di Los Angeles) maggiore rispetto all'aggregato di cemento, mostri un contenuto inferiore di particelle fini (quindi meno suscettibile alla compattazione); mentre al contrario, l'aggregato da calcestruzzo presenti un aumento della frazione fine, il che porta all'aumento di rilascio di elementi inquinanti come cromo e solfato.

È possibile quindi evidenziare come la compattazione risulti essere una variabile non trascurabile, in quanto agendo sulla dimensione delle particelle e sulla densità del materiale può portare ad un incremento del rilascio d'inquinanti con un potenziale rischio per l'ambiente.

#### 6.3.2.2. Condizioni operative ottimali

In riferimento ad un possibile utilizzo degli aggregati riciclati all'interno di **opere stradali e geotecniche**, nella fattispecie in sottofondi stradali non legati, al fine di garantire condizioni ottimali di utilizzo è necessario valutare diversi aspetti. Innanzitutto, un sottofondo deve possedere determinate caratteristiche quali:

- elevata rigidità (portanza): capacità di deformarsi sotto l'azione dei carichi ciclici senza mostrare cedimenti significativi;
- conservazione nel tempo delle caratteristiche meccaniche, anche se la strada è temporaneamente soggetta all'azione dell'acqua e del gelo, assicurando quindi adeguate caratteristiche drenanti ed antigelo;
- regolarità dello strato superficiale (senza fenomeni/alterazione di volume).

Per questo, al fine di garantire tali requisiti, è necessario che il materiale sia:

- **grossolano e ben gradato**, in modo tale che i granuli più fini si possano allocare nei vuoti interstiziali creati dai granuli più grossi, garantendo la massima densità raggiungibile;

- sottoposto, preferibilmente, ad un processo di **doppia frantumazione**. Questo per eliminare la malta aderente agli aggregati e ridurre la percentuale di frazione fine, che possono favorire la diffusione dell'acqua per capillarità all'interno dell'opera con conseguenti problematiche quali fessurazioni ed espansioni;
- sottoposto a **compattazione** in modo tale da aumentarne la resistenza.

Gli aggregati provenienti da *solo calcestruzzo*, secondo gli studi analizzati, possono essere classificati come buoni sostituti dei classici aggregati naturali da cava, questo perché sotto l'azione di carichi ciclici presentano una deformabilità simile. Va peraltro osservato che, rispetto agli aggregati riciclati misti, questi mostrano valori di permeabilità tali da ridurre l'accumulo di acqua e, conseguentemente, la fessurazione dell'opera. Diversamente, gli aggregati provenienti dalla rimozione di conglomerati bituminosi in opera presentano caratteristiche più scadenti e l'utilizzo per applicazioni geotecniche richiede procedure di riciclaggio adeguate, come evidenziato anche da alcune esperienze pratiche (paragrafo 5.2).

Sulla base di questo si sottolinea come la presenza della parte fine debba comunque essere tenuta sotto controllo, poiché in alcuni casi può portare a fenomeni di capillarità con conseguenti problematiche. Rimedio possibile, spesso utilizzato in applicazioni geotecniche, è rappresentato dall'eventuale stabilizzazione della frazione fine tramite aggiunta di calce o bassi dosaggi di cemento.

Si rende necessario poi verificare le prestazioni tecniche delle opere stradali attraverso prove specifiche, quali prova di carico su piastra e prove di densità.

### 6.3.2.3. Durabilità

Rispetto all'utilizzo in applicazioni geotecniche, in particolar modo per opere stradali, la porosità tra i grani (che all'interno dei manufatti cementizi, come si è visto, è risultata essere un parametro critico ai fini della durabilità dell'opera) garantisce buone caratteristiche di permeabilità in grado di evitare l'accumulo d'acqua all'interno dell'opera, limitando quindi i fenomeni di espansione e di degrado della struttura stessa. Si è osservato infatti come l'utilizzo degli aggregati riciclati provenienti da calcestruzzo, impiegati in miscela con aggregati naturali, mostri valori di permeabilità più vicini a quelli degli aggregati naturali. Al contrario, questo parametro diminuisce con l'utilizzo degli aggregati provenienti da fresato d'asfalto, dove è presente un drenaggio di scarsa qualità, dovuto alla presenza di particelle bituminose impenetrabili. Nei casi particolari, questi aggregati da fresato d'asfalto possono presentare delle problematiche di durabilità legate all'assorbimento d'acqua che, per effetto delle basse temperature, può portare a degrado della struttura con conseguenti fessurazioni. Per ottenere una misura relativa della durabilità degli aggregati riciclati per applicazioni stradali - geotecniche, viene favorito il degrado del materiale provocando una **pressione di cristallizzazione** tramite ripetute immersioni degli aggregati in una soluzione di solfato di sodio seguita da essiccazione in forno, utile a disidratare il sale precipitato nei pori.

Dai risultati analizzati in letteratura è possibile evidenziare come gli aggregati riciclati da calcestruzzo, sottoposti a tale procedura, presentino un incremento della perdita di massa circa del 66% rispetto all'iniziale, portando così ad uno sgretolamento del materiale. Ciò è dovuto principalmente all'effetto distruttivo del solfato sui materiali cementizi.

Diversamente, gli aggregati provenienti da muratura hanno mostrato una minor perdita di peso quando esposti allo stesso numero di cicli bagno-asciuga, a causa della minor presenza di pori accessibili nelle particelle in muratura o delle loro dimensioni più piccole. Per questo la soluzione non riesce a penetrare facilmente nella muratura come invece farebbe nella pasta di cemento.

Alla luce di queste considerazioni è possibile comunque affermare che questi aggregati riciclati, in vista di future applicazioni geotecniche, rivelano proprietà ingegneristiche simili ai materiali granulari di cava. Inoltre, la bassa permeabilità del fresato d'asfalto può essere migliorata con l'aggiunta di additivi o la miscelazione con aggregati di alta qualità per consentire l'utilizzo in opere stradali.

#### 6.4. Certificazione dell'aggregato (AR)

In ottemperanza alla direttiva europea sui prodotti da costruzione 89/106/CE, recepita in Italia con il D.P.R. n. 246 del 21 Aprile 1993 ed applicata tramite il Decreto del Ministero delle Infrastrutture 11 aprile 2007, sono entrate in vigore le norme armonizzate riguardanti diverse categorie di aggregati (*naturali, artificiali o riciclati*), in base alle quali è fatto obbligo ai produttori di applicare la marcatura CE ai prodotti da costruzione.

Questo porta un cambiamento sostanziale nel mercato, passando da un approccio prescrittivo ad un **approccio prestazionale**, in cui i vari materiali vengono classificati in funzione delle prestazioni tecniche che sono in grado di offrire, piuttosto che in funzione della loro provenienza. Successivamente, è stato introdotto, il 9 marzo 2011, il Regolamento n. 305/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e che abroga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio. Questo nuovo regolamento ha cercato di semplificare e chiarire la direttiva precedente e anche di superare alcune limitazioni che aveva mostrato durante la sua applicazione.

In quest'ambito di certificazione, la marcatura assume quindi un ruolo fondamentale nel garantire *qualità, sicurezza e controllo* per i materiali impiegati nella costruzione, a maggior ragione per quelli riciclati. Tali norme comprendono riferimenti ad aggregati per calcestruzzo, malte, miscele non legate per lavori stradali, ecc., e fanno riferimento ai requisiti essenziali che devono soddisfare. Le norme armonizzate per aggregati da noi trattati sono:

- calcestruzzo (UNI EN 12620);
- miscele non legate per lavori stradali (UNI EN 13242);
- conglomerati bituminosi (UNI EN 13043).

## 6.5. Linee guida italiane ed estere per la corretta gestione dei rifiuti C&D

Per favorire l'utilizzo degli aggregati riciclati sono state sviluppate, nel corso degli anni, numerose linee guida atte a fornire indicazioni di carattere *operativo-gestionale* relative sia alla produzione che alla gestione dei rifiuti nell'ambito delle attività di costruzione e demolizione, a partire dal luogo di produzione (cantiere), sino alle attività di trattamento in cui questi rifiuti vengono recuperati e trasformati in nuovi prodotti quali aggregati riciclati. A livello italiano, diverse sono le linee guida prodotte sia in ambito regionale (Veneto, Lazio, Liguria) che provinciale (Bologna, Trento, Bolzano), nonché le attività di coordinamento promosse dal Sistema Nazionale di Protezione dell'Ambiente con l'obiettivo di definire criteri ed indirizzi tecnici condivisi per il recupero dei rifiuti inerti.

A livello estero sono stati sviluppati criteri in merito a prescrizioni tecniche, verifiche e monitoraggi necessari ad una corretta gestione dei C&D (quali ad esempio: Protocollo Europeo e linee guida riferite al Portogallo e documenti emanati da Germania e Regno Unito), fino ad arrivare al recente documento dei Paesi Nordici (2016) che, sul piano ambientale, ha introdotto l'approccio basato *sull'analisi di rischio*, finalizzato a valutare la fattibilità del recupero in condizioni reali ed in riferimento a determinati scenari di recupero.

## 6.6. Fattibilità del recupero

Nel corso degli ultimi anni diversi studi hanno riguardato l'utilizzo di materiali provenienti dal recupero di rifiuti quali risorse valorizzabili nel settore delle costruzioni. Tra i materiali di maggiore interesse, oltre agli aggregati industriali (scorie da metallurgia, scorie da termovalorizzazione dei rifiuti, ecc.), vi sono anche gli AR prodotti dai rifiuti da C&D.

L'analisi delle esperienze di letteratura, unitamente alla valutazione di casi reali, ha fornito elementi utili per una valutazione complessiva sulla fattibilità del recupero di tali rifiuti. Ovviamente, tali giudizi di fattibilità risultano essere valutazioni preliminari che necessitano di futuri ed ulteriori approfondimenti.

### 6.6.1. Fattibilità ambientale

Vi sono alcune criticità in merito alla natura chimica degli AR e, in particolare, al rilascio di inquinanti se messi a contatto con l'acqua. In particolare, in merito a questo secondo punto, la maggiore criticità è legata alla presenza di costituenti, quali i solfati, e di inquinanti (cromo e vanadio) che possono presentare rilasci superiori ai limiti dell'Allegato 3 del D.M. 5/02/98 come modificato dal D.M. 186/2006 per il recupero "diretto" in forma semplificata.

Tra i fattori maggiormente responsabili di tale criticità vi sono: la notevole eterogeneità nella composizione dell'AR, la bassa qualità dell'AR ottenuto a seguito di trattamenti poco spinti (quali ad esempio la singola frantumazione e la semplice vagliatura), la pezzatura fine del materiale. Va peraltro aggiunta la necessità di effettuare una caratterizzazione del comportamento a lisciviazione mediante test adeguati, in grado di simulare in laboratorio le condizioni "reali" di recupero e di verificare/validare in situ il comportamento del materiale in condizioni reali. Infine, un approccio basato sull'analisi di rischio consentirebbe di effettuare

una valutazione dei rischi specifici su target ambientali, valutati in riferimento a specifici scenari di recupero.

### 6.6.2. Fattibilità tecnica

Dal punto di vista tecnico, soprattutto per quanto riguarda la produzione ed il confezionamento di calcestruzzi in riferimento alle norme UNI EN 12620-2008 “*Aggregati per calcestruzzo*” e Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018) che affermano la possibilità di utilizzo di aggregati grossi provenienti da riciclo, secondo i limiti presentati in Tabella 2, è possibile garantire buone prestazioni tecniche e meccaniche.

A confronto con gli aggregati naturali ovviamente presentano ancora dei leggeri decrementi in termini di resistenza ma che possono essere sopperiti attraverso un miglioramento della qualità dell’aggregato e con la riduzione della percentuale di sostituzione.

Attualmente l’applicazione principale risiede nei calcestruzzi a basse resistenze; ciò nonostante, tramite future ricerche e sviluppi, si potrà provvedere all’implementazione di questi materiali anche in campi più delicati che per il momento gli sono preclusi.

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

Tabella 2: Percentuale consentita per gli aggregati di riciclo in relazione alla classe di resistenza del calcestruzzo

A dimostrazione di questo, le applicazioni realizzate con i calcestruzzi di riciclo (nodi trave-pilastro, travi, ...), hanno mostrato un comportamento generale inferiore a quello del calcestruzzo naturale; tuttavia i risultati sono comunque promettenti ed una loro applicazione, con i dovuti accorgimenti, si ritiene sia possibile ed attuabile.

Lo stesso per quanto riguarda le applicazioni geotecniche, dove gli aggregati riciclati (con un consolidato utilizzo nelle opere stradali), garantiscono caratteristiche prestazionali confrontabili con quelle degli aggregati naturali.

Attualmente, infatti, i lavori stradali sono sicuramente il settore dove l’utilizzo degli AR trova larga applicazione con buoni risultati e senza pregiudicare la qualità e le caratteristiche tecniche delle opere realizzate.

### 6.6.3. Fattibilità economica

Nonostante i buoni risultati delle sperimentazioni finora sviluppate ed una concreta possibilità di recupero di questi materiali, si è ancora lontani dalla creazione di un mercato di prodotti edilizi con materiale riciclato. Questo principalmente a causa di ostacoli normativi

nell'uso di materiale riciclato, in controtendenza con quanto avviene a livello europeo; inoltre la sperimentazione relativa all'impiego di tali materiali in applicazioni strutturali, come si è detto, deve essere ulteriormente consolidata e il mondo della produzione dovrebbe essere maggiormente sensibilizzato in questo senso.

Dall'analisi della letteratura emerge che numerosi Stati, quali ad esempio la Svezia (1983), Danimarca (1990) e Regno Unito (2002) e in ambito nazionale la Lombardia stessa, hanno dei diritti di escavazione sui quantitativi di materiale estratto e commerciabile. Tuttavia, la restrizione nell'identificazione di nuove cave di aggregati naturali potrebbe contribuire a spostare l'attenzione verso nuove opportunità per gli aggregati riciclati: l'inevitabile incremento dei prezzi degli aggregati naturali determina come conseguenza la ricerca di nuove strategie per il riutilizzo dei materiali recuperati.

Dalle esperienze pratiche, è stato possibile riscontrare come a fronte di uno smaltimento dei rifiuti da C&D in discarica ad un costo di circa 16-20 €/t, il conferimento presso impianti di recupero prevede generalmente un costo di circa 10 €/t.

Di rilievo risultano essere anche i processi di **demolizione selettiva** e di separazione in opera dei materiali, nonché di decostruzione, che identificano una serie di tecniche impiegate per produrre un rifiuto di demolizione di maggior qualità, con elevate potenzialità di riutilizzo come materiale da costruzione.

A causa del lavoro aggiuntivo per la separazione delle frazioni, il processo risulta necessariamente più lungo e costoso, ma anche potenzialmente promotore di nuovi livelli professionali ed occupazionali. E' ormai noto che i costi associati alla demolizione selettiva siano decisamente maggiori rispetto alla normale demolizione e valutabili caso per caso in base al contesto.

Appare evidente quindi come, nonostante la fattibilità tecnica del recupero di tali materiali, il problema attuale del mancato decollo dell'uso di aggregati riciclati non sia tanto riconducibile ad aspetti tecnici o tecnologici, quanto normativi, economici e ambientali.

È, in realtà, innegabile che, se da un lato le norme autorizzano l'utilizzo di aggregati riciclati, dall'altro lo rendono quanto meno complicato con indicazioni specifiche spesso protezionistiche.

## 6.7. Proposte future

Al fine di superare un pregiudizio non più difendibile, soprattutto nell'ottica di uno sviluppo realmente sostenibile, è possibile presentare alcune proposte per ulteriori approfondimenti sul tema del recupero di materiali da C&D. In particolare:

- **Dislocazione di impianti fissi su tutto il territorio**

Una corretta dislocazione sul territorio nazionale di ulteriori impianti fissi per il trattamento dei materiali da C&D sarebbe auspicabile e permetterebbe di ottenere materiali inerti di migliore qualità e favorirebbe il *conferimento a recupero* i rifiuti da C&D (a costi più bassi) in alternativa allo smaltimento in discarica.

Con particolare riferimento alla Lombardia questa necessità attualmente non sussiste poiché sono già numerosi gli impianti fissi localizzati sul territorio regionale.

- **Politiche di sensibilizzazione al recupero**

E' necessario sviluppare politiche di sensibilizzazione al recupero, di sostegno alle imprese che effettuano recupero ed incentivi per favorire la demolizione selettiva.

- **Maggiore chiarezza sul passaggio da Rifiuto a Prodotto**

I rifiuti che non hanno completato con successo il loro trattamento di recupero possono, se utilizzati al posto dei tradizionali materiali da costruzione, creare seri problemi all'impresa di costruzione di natura sia *legale* (traffico illecito di rifiuti) sia *tecnica* (mancata accettazione dei materiali da parte dei direttori lavori delle opere).

L'obiettivo deve essere quindi quello di fissare criteri tecnici e ambientali chiari, per stabilire quando, a valle di determinate operazioni di recupero, un rifiuto cessa di essere tale e diventi un prodotto, non più soggetto alla normativa sui rifiuti a completamento delle disposizioni di cui all'art. 184 Ter del D.Lgs 152/06.

- **Test di cessione**

Nell'All. 3 del D.M. 5/02/98 s.m.i., sono fissate le modalità di esecuzione del test di cessione e i limiti da rispettare per l'eluato, ma entrambi sono poco adatti per fissare la compatibilità ambientale degli aggregati riciclati. Infatti, l'elenco dei parametri da ricercare nell'eluato e i limiti imposti non possono essere adottati anche nel caso del recupero dei rifiuti inerti che, in molti casi, contengono elementi come calce, gesso, cemento, terra naturale, etc., che non possono essere considerati dei contaminanti (in quanto costituenti) e che non dovrebbero essere ricercati nell'eluato o, comunque, avere limiti così restrittivi da dichiarare gli aggregati riciclati non ecocompatibili (si pensi in particolare ai parametri quali solfati e cromo).

Inoltre, essendo l'aggregato riciclato utilizzato nella sua frazione grossolana, un'analisi su tale granulometria sarebbe necessaria a garantire una condizione più realistica per le condizioni d'utilizzo. Considerando quindi la particolare natura dei rifiuti provenienti dal settore delle

costruzioni, sarebbe necessario rivedere modalità di esecuzione e limiti del test di cessione su questi materiali in modo tale da valutarne la corretta ecocompatibilità.

- **Controlli e monitoraggio dei flussi dei rifiuti da C&D e degli AR**

L'ISPRA "Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale" certifica, in riferimento alla Direttiva Europea 2008/98/CE che stabilisce il recupero del 70% di materiali inerti entro il 2020, che l'Italia ha già superato tale percentuale di recupero attestandosi a circa il 76% nel 2015.

La percentuale di riciclo viene calcolata dall'ISPRA attraverso le informazioni contenute nel Modello Unico di Dichiarazione Ambientale (MUD). Ma la sua compilazione è obbligatoria solo per i soggetti che effettuano operazioni di recupero e smaltimento di tali inerti, mentre le imprese di costruzione ne sono esentate.

Pertanto, al fine di indirizzare al meglio le politiche regionali e nazionali sul recupero dei rifiuti è opportuno che tutte le regioni provvedano al costante controllo e monitoraggio dei flussi dei rifiuti C&D e degli aggregati riciclati.

- **Approfondimenti sperimentali**

Lo sviluppo di attività di ricerca **sperimentali** risulta senza dubbio un importante strumento per approfondire e acquisire dati sulle caratteristiche degli AR e sulle opere derivanti dalla loro applicazione. Numerosi sono gli aspetti di ricerca che meritano un approfondimento relativamente a:

- caratterizzazione chimica e comportamento ambientale: studio delle caratteristiche chimiche e del rilascio di inquinanti degli AR in funzione delle diverse tipologie di materiali in esso presenti; studio del comportamento a rilascio di inquinanti mediante diversi test di cessione e in funzione della natura fisica e chimica degli AR; studio del rilascio di inquinanti in condizioni di laboratorio simulate e riferite a specifici scenari di recupero; studio del rilascio di inquinanti in condizioni reali;
- utilizzo degli AR nel calcestruzzo (attualmente per confezionamento di calcestruzzi a basse resistenze quali, ad esempio, magroni di sottofondazione): valutazione della miscela ottimale con possibile riscontro applicativo in manufatti di prefabbricazione leggera; verifica dell'idoneità in applicazioni civili;
- utilizzo degli AR nelle opere geotecniche: valutare l'influenza delle diverse tipologie di materiali che compongono l'aggregato riciclato, del livello di costipamento sulla stabilità chimica dei manufatti e sul rilascio di inquinanti in condizioni reali;
- ulteriore proposta di approfondimento può essere, inoltre, lo studio sulle caratteristiche qualitative degli AR provenienti da impianti fissi e mobili, al fine anche di individuare fasi di trattamento aggiuntive atte a migliorare la qualità dell'aggregato riciclato prodotto.

## Riferimenti Bibliografici

### ▪ Bibliografia scientifica

- Barbudo, A., Galvín, A. P., Agrela, F., Ayuso, J., & Jiménez, J. R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Management* .
- Bressi, G., Pagani. (2004). La marcatura CE degli aggregati riciclati.
- Butera, S., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2014). Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds. *Journal of Hazardous Materials* .
- Butera, S., Hyks, J., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2015). Construction and demolition waste: Comparison of standard up-flow column and down-flow lysimeter leaching tests. *Waste Management* .
- Butera, S., Trapp, S., Astrup, T. F., & Christensen, T. H. (2015). Soil retention of hexavalent chromium released from construction and demolition waste in a road-base-application scenario. *Journal of Hazardous Materials* .
- Cappellaro, F., Mason, M., Buonamici, R. (2011). Applicazione della metodologia Life-Cycle Assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione.
- Cardoso, R., Silva, R.V., de Brito, J., & Dhir, R. (2015). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*.
- Coppola, L., Monosi, S., Sadri, S., Borsoi, A. (1995). Riciclaggio delle strutture di c.a. e c.a.p. demolite per il confezionamento di nuovi calcestruzzi.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2007). Utilizzazione di aggregati in calcestruzzo riciclato in prefabbricazione.
- Couto A., Couto J.P., (2010). Guidelines to Improve Construction and Demolition Waste Management in Portugal.

- Del Rey, I., Ayuso, J., Galvín, A.P., Jiménez, J.R., López, M., & García-Garrido, M.L. (2015). Analysis of chromium and sulphate origins in construction recycled materials based on leaching test results. *Waste Management* .
- Engelsen, C. J., van der Sloot, H. A., & Petkovic, G. (2017). Long-term leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Science of the Total Environment* .
- Ferrari, G., Morotti, A. (2008). Prospettive d'impiego dei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati.
- Galvín, A. P., Ayuso, J., García, I., & Jiménez, J. R. (2014). The effect of compaction on the leaching and pollutant emission time of recycled aggregates from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*.
- Germania (2015). European Commission, Resource Efficient Use of Mixed Wastes. Construction and Demolition Waste management in Germany.
- ISPRA (2017). Rapporto Rifiuti Speciali.
- Jiménez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., & Galvín, A. P. (2011). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling* .
- La Marca, F., Marcoccio, C., Zambito, P. (2011). Calcestruzzo strutturale con aggregati riciclati.
- Legambiente (2017). Rapporto cave.
- Mancuso, M., Morabito, R. (2012). La green economy nel panorama delle strategie internazionali.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2017). Il nuovo ruolo della certificazione nel GPP.
- Provincia di Bologna (2004). Accordo di Programma, Delibera n. 70 24/07/2001. Manuale per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione in Provincia di Bologna in applicazione dell'Accordo di Programma.

- Provincia autonoma di Bolzano (2016). Delibera Giunta Provinciale n. 1030 del 27 Settembre 2016. Disposizioni per il recupero dei resti di costruzione e per la qualità dei materiali edili riciclati.
- Provincia autonoma di Bolzano (2017). Delibera Giunta Provinciale n. 398 del 11 Aprile 2017. Linee Guida sulla qualità e l'utilizzo dei materiali riciclati.
- Provincia autonoma di Trento (2011). Deliberazione Giunta Provinciale n. 1333 del 24 Giugno 2011. Linee guida per la corretta gestione di un impianto di recupero e trattamento dei rifiuti e per la produzione di materiali riciclati da impiegare nelle costruzioni (edili, stradali e recuperi ambientali).
- Provincia autonoma di Trento (2011). Deliberazione Giunta Provinciale n. 1333 del 24 Giugno 2011. Norme tecniche per la produzione dei materiali riciclati e posa nella costruzione e manutenzione di opere edili, stradali e recuperi ambientali.
- Regione Veneto (2012). DGRV n. 1773 del 28 Agosto 2012 e DGRV n. 1060 del 24 Giugno 2014. Modalità operative per la gestione dei rifiuti da attività di costruzione e demolizione.
- Regno Unito (2016). European Commission, Resource Efficient Use of Mixed Wastes. Construction and Demolition Waste management in United Kingdom.
- Richardson, A., Allain, P., Veuille M.. (2010). Concrete with crushed, graded and washed recycled construction demolition waste as a coarse aggregate replacement.
- Rigamonti, L., Pantini, S., Borghi, G. (2017). Valutazione complessiva degli impatti ambientali connessi al ciclo di vita dei materiali recuperati dai rifiuti C&D.
- Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials* .
- Silva Vieira, C., Pereira, P.M. (2015). Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (2016). Criteri e indirizzi tecnici condivisi per il recupero dei rifiuti inerti.

- Thomas, C., Setien, J., Polanco, J.A., Alaejos, P., Sanchez De Juan, M. (2012). Durability of recycled aggregate concrete.
- Toffano, A., (2006)., Caratterizzazione petrochimica e petrofisica di materiali inerti secondari da costruzione e demolizione, per la realizzazione di impasti ceramici ordinari e calcestruzzi.

#### ▪ Normativa

- Gazzetta Ufficiale (2003). DECRETO MINISTERIALE 8 MAGGIO 2003, n. 203. Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo.
- Gazzetta Ufficiale (2005). CIRCOLARE 15/7/2005, Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n. 203.
- Gazzetta Ufficiale (2006). DECRETO LEGISLATIVO 152/2006, Norme in materia ambientale.
- Gazzetta Ufficiale (2006). DECRETO LEGISLATIVO 186/2006, Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero, ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22.
- Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, (2008.) DIRETTIVA 2008/98/CE, Direttiva quadro rifiuti.
- Gazzetta Ufficiale, (2015). DECRETO MINISTERIALE 24/12/2015 e s.m.i., Adozione dei criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione e criteri ambientali minimi per le forniture di ausili per l'incontinenza.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018). Norme tecniche per le costruzioni - Ntc 2018.
- UNI EN 13043 (2004). Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico.

- UNI EN 13242 (2008). Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade.
- UNI EN 12620 (2008). Aggregati per calcestruzzo.
- UNI EN 8520-1 (2015). Aggregati per calcestruzzo – istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 – Parte 1: Designazione dei criteri di conformità.
- UNI EN 8520-2 (2005-2016). Aggregati per calcestruzzo – istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 – Parte 2: Requisiti.

#### ▪ Sitografia

- Scopus - [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- Science Direct - [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Legambiente - [www.legambiente.it/](http://www.legambiente.it/)
- ISPRA Ambiente - [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it)
- Eurostat - <http://ec.europa.eu/eurostat>
- Arpa Lombardia - <http://www.arpalombardia.it>
- Ingenio - [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it)

## ALLEGATI

### A) LINEE GUIDA ANALIZZATE

- **Provincia di Bologna – Accordo di Programma, Delibera n. 70 24/07/2001**

“Manuale per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione in Provincia di Bologna in applicazione dell’Accordo di Programma”, Anno 2004.

L’Accordo di Programma si applica nell’ambito territoriale della Provincia di Bologna:

- alle attività di produzione, gestione, trattamento, riutilizzo o recupero dei residui delle attività di costruzione e demolizione di edifici e infrastrutture;
- al recupero di rifiuti provenienti da altre attività produttive, limitatamente a quelli passibili di essere impiegati, quali materiali da costruzione in sostituzione degli inerti naturali, in base alla normativa vigente e previo idoneo trattamento.

Per dare contenuto operativo agli Obiettivi fissati dall’Accordo, i sottoscrittori hanno individuato una serie di misure ed azioni, che sono parte integrante degli impegni assunti e definiscono le modalità attuative dell’Accordo:

- la demolizione selettiva degli edifici;
- l’adozione di tecniche costruttive che limitano il ricorso alle materie vergini e privilegiano l’utilizzo di materiali che non producono rifiuti pericolosi alla fine del loro ciclo di vita;
- le iniziative utili ad aumentare la quota di rifiuti conferiti ad idonei centri di trattamento e riciclaggio, tramite la creazione di reti efficienti e diffuse di centri di raccolta a servizio delle imprese e tramite la razionalizzazione ed il potenziamento della rete degli impianti di trattamento attivi, concepiti e gestiti in modo da minimizzarne l’impatto ambientale e opportunamente e razionalmente dislocati sul territorio;
- la selezione e avvio a riutilizzo dei residui che possano essere utilmente re-impiegati quali materiali e componenti di nuovi processi di costruzione;

...

Per facilitare l’applicazione di queste misure, il Comitato Tecnico costituito nell’ambito dell’Accordo ha predisposto dei documenti tecnici (“Direttive e Specifiche Tecniche di attuazione”) che forniscono gli strumenti operativi per l’applicazione dei contenuti dell’Accordo stesso:

- Direttiva Tecnica 1. Rifiuti oggetto dell’Accordo;
- Direttiva Tecnica 2. Linee guida e istruzioni tecniche per la demolizione e la differenziazione in frazioni omogenee dei residui all’origine;
- Direttiva Tecnica 3. Specifiche tecniche per la gestione dei materiali e componenti direttamente riusabili (esclusi dal campo di applicazione della normativa sui rifiuti);
- Direttiva Tecnica 4. Modalità di gestione dei depositi temporanei a servizio di più cantieri della stessa impresa e dei depositi temporanei collettivi a servizio di più imprese;

- Direttiva Tecnica 5. Linee guida per la gestione degli impianti di riciclaggio rifiuti inerti;
- Direttiva Tecnica 6. Specifiche tecniche per l'identificazione delle caratteristiche e degli standard qualitativi dei materiali prodotti dal riciclaggio e destinati ad impieghi nelle costruzioni;
- Direttiva Tecnica 7. Linee di indirizzo per i Comuni.

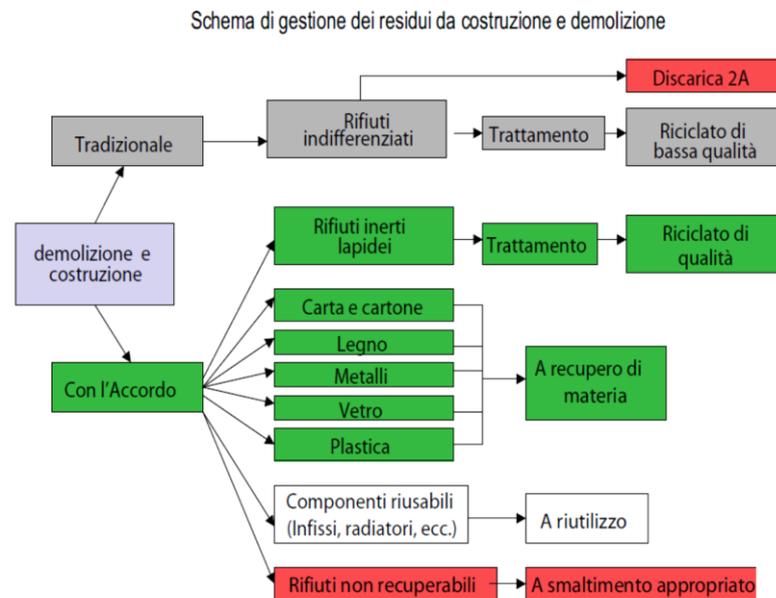


Figura 77: Schema di gestione dei residui da costruzione e demolizione.

Segue una breve presentazione di alcune delle Direttive Tecniche sopra elencate.

### **DIRETTIVA TECNICA 1: Rifiuti oggetto dell'Accordo**

I rifiuti passibili di essere recuperati per essere riutilizzati quali materiali da costruzione in sostituzione degli inerti naturali sono identificati dal DM 5 febbraio 1998, che stabilisce anche le modalità di trattamento e i requisiti di idoneità all'impiego.

Si forniscono due elenchi:

#### **A: Rifiuti derivanti dalle attività di costruzione e demolizione di edifici e infrastrutture**

L'elenco comprende:

- i rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione, aventi codici EER 17.00.00, escluso il terreno proveniente da siti contaminati in quanto regolato dalla specifica norma sulle bonifiche, ex D.M. 471/99;
- i rifiuti, aventi codici EER diversi dai 17.00.00, che possono essere prodotti nelle normali attività di costruzione e demolizioni (esempio, i rifiuti da imballaggi);
- i rifiuti speciali pericolosi derivanti da attività di costruzione e demolizione, singolarmente individuati e regolamentati, come ad esempio l'amianto in matrice cementizia o polimerica.

**B: Rifiuti derivanti da attività produttive di cui all'Allegato 1, subAllegato 1 del D.M. 05.02.98, recuperabili nella produzione di materiali da costruzione nel rispetto delle norme ivi contenute**

Si definiscono le tipologie di rifiuti inerti che possono essere recuperati nelle seguenti attività:

- produzione di MPS per l'edilizia
- per la produzione di materiale per rilevati e sottofondi stradali
- produzione di conglomerati cementizi
- produzione di conglomerati bituminosi
- utilizzati nell'industria della ceramica
- utilizzati nell'industria dei laterizi
- utilizzati nei cementifici

***DIRETTIVA TECNICA 2: Linee guida e istruzioni tecniche per la demolizione e la differenziazione in frazioni omogenee dei residui all'origine***

Le migliori esperienze di demolizione selettiva realizzate con successo nel mondo suggeriscono il metodo più efficace da seguire, ossia separare e poi stoccare i materiali organizzando la demolizione in quattro fasi successive:

- *materiali e componenti pericolosi*: per evitare di provocare inquinamenti e per proteggere gli operatori è indispensabile verificare se nell'edificio sono presenti materiali e componenti pericolosi (es: materiali contenenti amianto, interruttori contenenti PCB ecc.). Una volta identificati e localizzati questi materiali (con l'aiuto del progettista o di un tecnico esperto) si procederà con la bonifica dell'edificio, rimuovendoli e smaltendoli nel rispetto delle modalità previste dalle specifiche norme.
- *componenti riusabili*: dopo la bonifica dagli eventuali materiali pericolosi, si passerà allo smontaggio di tutti quegli elementi che possono essere impiegati di nuovo nello stesso edificio o in un nuovo cantiere (es. coppi, tegole, travi, elementi inferriate e parapetti, serramenti ecc.), se smontati con cura senza essere danneggiati. Questi possono essere riutilizzati tali e quali, oppure, dopo semplici trattamenti (pulitura, revisione del funzionamento, riparazione, verniciatura) necessari per l'adattamento al un nuovo utilizzo.
- *materiali riciclabili*: una volta asportati i materiali pericolosi e i componenti riusabili, si può continuare il lavoro demolendo le parti di edificio costituite da altri materiali riciclabili.
- *rifiuti non riciclabili*: tutto quello che resta dopo le selezioni è l'insieme di quei materiali che tecnicamente o economicamente (o per la eventuale presenza di elementi estranei o eterogenei) non è possibile valorizzare. Materiali che, quindi, devono necessariamente essere avviati allo smaltimento.

Per ottenere il massimo dell'efficienza, la demolizione va eseguita ripercorrendo in ordine inverso il processo che è stato realizzato al momento della costruzione dell'edificio.

Il documento precisa, inoltre, la suddivisione dei compiti tra i soggetti coinvolti nelle operazioni (committente, progettista e direttore dei lavori, impresa esecutrice) nelle diverse fasi del processo (fase preliminare, progettazione, affidamento lavori, esecuzione).

### ***DIRETTIVA TECNICA 3: Specifiche tecniche per la gestione dei materiali componenti direttamente riusabili***

I componenti riusabili sono residui (cioè elementi costruttivi dismessi da un edificio esistente) che possono essere riadattati ad un nuovo impiego nelle costruzioni senza modificarne sostanzialmente le caratteristiche geometriche. Essi possono essere riutilizzati facendo loro svolgere, in un nuovo contesto, le stesse funzioni assolte in precedenza oppure declassificati a funzioni analoghe ma di minore impegno prestazionale.

Il riutilizzo integrale di elementi edilizi è la procedura di recupero più vantaggiosa dal punto di vista ambientale. Questa pratica può essere efficacemente adottata solo a condizione che le caratteristiche di ciascun elemento smontato da una precedente collocazione siano compatibili con il suo nuovo impiego. Il criterio utilizzato per valutare questa idoneità è quello della “prestazione residua”, cioè la verifica delle proprietà che l’elemento smontato possiede ancora.

Il documento elenca materiali o componenti riusabili di più frequente reperimento nelle demolizioni di edifici e fornisce le specifiche tecniche (tramite schede) per assicurarne un reimpiego ottimale. Nelle schede vengono, pertanto, riportate alcune indicazioni di massima utili alla diagnosi dello stato di conservazione e della prestazione residua, a seconda della funzionalità, dell’aspetto e della geometria. In esse è, inoltre, inserita una tabella in cui sono indicate le caratteristiche fondamentali, i requisiti e le prestazioni corrispondenti, i principali metodi di valutazione del componente.

### ***DIRETTIVA TECNICA 5: Linee guida per la gestione degli impianti di riciclaggio rifiuti inerti***

I gestori degli impianti che aderiscono al presente Accordo si impegnano ad adottare sistemi tecnologici e gestionali che:

- minimizzino gli impatti ambientali prodotti dalla propria attività;
- permettano di documentare la provenienza dei materiali trattati, nel pieno rispetto delle normative vigenti;
- producano dei materiali riciclati rispondenti ai requisiti tecnici fissati dalla UNI 10006 e dal CEN (norma CEN 13242) per la marcatura CE degli aggregati riciclati.

Presso tali impianti possono essere conferite e trattate due tipologie di rifiuti che devono rimanere sempre ben distinte sia nella fase di trasporto verso l’impianto che all’interno dell’impianto stesso:

A) i rifiuti provenienti dai cantieri di costruzione o demolizione passibili di essere recuperati al fine di produrre materiali inerti riciclati destinati alle attività del settore costruzioni, in conformità con quanto previsto dalla normativa vigente;

B) quei rifiuti speciali (es.: sabbie esauste, conglomerati bituminosi, ecc.) che, se miscelati ai rifiuti inerti della tipologia A) durante il processo di recupero, possono migliorare le prestazioni degli aggregati riciclati prodotti nell’impianto.

Al solo scopo di facilitare i trasporti di rifiuti da parte delle imprese edili, è ammessa la possibilità, previa autorizzazione, di accogliere e di stoccare presso gli impianti quantità minime della seguente terza tipologia di rifiuti:

C) materiali non lapidei provenienti dalle attività di costruzione e demolizione (legno, plastica, ferro, carta e cartone, ecc.).

Lo schema logico di funzionamento del processo prevede tre principali fasi operative:

- 1) Preparazione e classificazione dei rifiuti in ingresso;
- 2) Frantumazione e vagliatura;
- 3) Classificazione e cumulo del materiale riciclato prodotto.

Ogni fase è costituita da sotto-fasi e, per ognuna di esse, si descrivono obiettivi e strumenti per soddisfarli.

Per migliorare l'efficienza del processo e la qualità dei materiali prodotti è previsto:

- stoccaggio separato dei rifiuti: i materiali conferiti saranno stoccati separatamente in ciascuna delle zone di stoccaggio ed in ragione della prevalente presenza di, rispettivamente:
  - o materiali a matrice cementizia (elementi strutturali in cls e loro frammenti, blocchi lastre, tubi, pali in cls);
  - o materiali a matrice laterizia (mattoni e blocchi in laterizio, mattonelle da rivestimento in ceramica, ecc.);
  - o materiali a matrice lapidea naturale (blocchi da muratura, paramento o rivestimento, lastre, soglie, gradini, davanzali, ecc.)
  - o materiale lapidei misti (materiali indifferenziati da demolizione non selettiva).
- deposito separato dei prodotti riciclati: analogamente a quanto predisposto nella zona di stoccaggio preliminare, anche il deposito dei materiali riciclati sarà suddiviso in zone separate.

Per ogni tipo macchinario utilizzato e/o fase di trattamento si fornisce una descrizione e si esplicita se essa costituisce uno standard minimo.

Per le attrezzature complementari, i servizi e gli interventi di mitigazione degli impatti si descrivono le soluzioni adottabili, gli effetti di mitigazione e si esplicita se costituiscono uno standard minimo.

Per quanto concerne i requisiti gestionali minimi, si individuano le principali procedure che dovranno essere adottate per le seguenti fasi del processo: accettazione dei rifiuti in ingresso; stoccaggio e trattamento dei rifiuti; carico e uscita dei materiali dall'impianto.

Per ogni procedura se ne riporta una descrizione e si esplicita se essa costituisce uno standard minimo.

***DIRETTIVA TECNICA 6: Specifiche tecniche per l'identificazione delle caratteristiche e degli standard qualitativi dei materiali prodotti dal riciclaggio e destinati ad impieghi nelle costruzioni***

Le prescrizioni contenute nel documento devono essere considerate complementari (e non sostitutive) di quanto contenuto nella Direttiva CNR - UNI 10006/2002, che si intende qui completamente richiamata.

Per garantire un costante e ottimale standard di qualità occorre prevedere prove di caratterizzazione dei materiali almeno ogni 20.000 m<sup>3</sup> di materiale prodotto o, se la produzione dell'impianto è inferiore ai 2.000 m<sup>3</sup>/mese, almeno una volta all'anno, salvo condizioni più restrittive dettate dalle specifiche particolari di impiego.

Quando si ha a che fare con materiali granulari, prima di realizzare la suddivisione occorre eliminare le rimanenti aggregazioni senza creare fratture tra le singole particelle. Le prove vanno effettuate su campioni di quantità differenti in base al diametro del materiale da esaminare.

Il campionamento rappresentativo, lo stoccaggio, la lavorazione e la preparazione del campione vanno eseguiti conformemente alle norme vigenti.

La valutazione sulla compatibilità ambientale del materiale da C&D destinato a recupero deve essere verificato non solo sul prodotto finito, risultante sovente dalla miscelazione con altri materiali aggiuntivi, ma soprattutto sulle singole frazioni ottenute all'impianto. Non è consentita la miscelazione di prodotti di riciclaggio al fine di diluire sostanze inquinanti in essi contenute.

In base poi alla tipologia di rifiuto C&D trattato, alle caratteristiche e alle performances degli impianti, si possono ottenere numerosi diversi prodotti riciclati, aventi destinazioni d'uso differenti. Per ogni tipologia in uscita (stabilizzato, Tout Venant, pietrischetto, sabbia, conglomerato cementizio) si riporta la granulometria, la classificazione (CNR-UNI 10006), l'origine e gli usi (costruzioni ferroviarie, costruzioni stradali e costruzioni edili).

Per la caratterizzazione delle diverse frazioni risultanti dalla lavorazione, è necessario valutare, in base al loro utilizzo, le caratteristiche primarie delle diverse frazioni ottenute dal processo di lavorazione. Nel documento sono indicate le tipologie di prova cui sottoporre i materiali destinati agli usi previsti, la descrizione delle prove ovvero la normativa di riferimento, i requisiti minimi, i valori e le prestazioni.

In particolare, per il test di cessione, la normativa di riferimento è il DM 05/02/98 il quale stabilisce che, qualora siano richiesti, i test devono essere eseguiti su un campione rappresentativo e nella stessa forma fisica prevista nelle condizioni finali d'uso del prodotto. Inoltre, la procedura da seguire è quella specificata nell'Allegato 3 del decreto stesso. I test devono essere effettuati ad ogni inizio di attività e poi ogni due anni o comunque ogni volta che sopraggiungano modifiche sostanziali nel processo di recupero dei rifiuti.

Il materiale deve essere analizzato con la distribuzione granulometrica corrispondente a quella di effettivo utilizzo. La frantumazione è consentita solo quando è indispensabile ai fini dell'analisi.

Per i componenti contenuti nei materiali e potenzialmente a rischio per l'ambiente devono essere rispettati i limiti previsti dall'All. 3 al DM 05/02/98.

- **Provincia autonoma di Bolzano – Delibera Giunta Provinciale n. 1030 del 27 Settembre 2016**

“Disposizioni per il recupero dei resti di costruzione e per la qualità dei materiali edili riciclati”, Anno 2016.

### ***Definizioni***

Per materiali da costruzione e demolizione si intendono rifiuti inerti, prodotti da cantieri edili, quali:

- materiale di scavo
- demolizioni stradali
- materiale proveniente dalle demolizioni di opere edili e non edili

All'interno dei rifiuti inerti è possibile trovare anche materiale di scarto, ovvero:

- materiale estraneo: sostanza minerale di resistenza inferiore (vetro, gesso, cemento cellulare, calcestruzzo poroso), che determina una riduzione del valore della frazione principale.
- materiale incompatibile: sostanza per lo più non minerale, come ad es. legno, plastica e materiali di scarto simili, che determina un deprezzamento del materiale.

Dal recupero delle tre tipologie di materiali da C&D sopra citati si ottengono:

- RA granulato di asfalto riciclato
- RB granulato di calcestruzzo riciclato
- RM granulato misto riciclato

### ***Origine dei materiali***

È necessaria, direttamente nel luogo di produzione, una prima cernita dei materiali da demolizione in gruppi di materiali omogenei puliti. Durante le demolizioni è da preferire il cosiddetto smontaggio selettivo.

Un utile strumento per lo smontaggio è un piano di smaltimento che indichi i quantitativi e i tipi dei rifiuti prodotti, mostri le modalità di stoccaggio provvisorio, di trasporto dal cantiere (camion, benne/container) e le possibilità di recupero e smaltimento. Il maggiore impegno richiesto viene compensato dai minori costi di conferimento presso l'impianto di riciclaggio.

### ***Accettazione***

Per le tre tipologie di rifiuti da C&D definite in precedenza si individuano categorie di accettazione agli impianti di riciclaggio sulla base del codice EER, come riportato nella figura successiva.

CATEGORIE DI ACCETTAZIONE					
1.	MATERIALE DI SCAVO	2.	DEMOLIZIONI STRADALI	3.	MATERIALI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE
1.1	Materiale di scavo pulito e sottofondi stradali senza leganti bituminosi e idraulici (delibera della Giunta provinciale 189/2009)	2.1	Sottofondi stradali, strati di binder e di usura con leganti bituminosi e idraulici (codice CER 170504 o 170302)	3.1	Materiale da costruzione e demolizione pulito, privo di impurità (codice CER 170101 cemento 170102 mattoni 170103 mattonelle e ceramica 170107 rifiuti misti di costruzioni e demolizioni)
1.2	Materiale di scavo non compatibile con la delibera della Giunta provinciale 189/2009 (codice CER 170504)	2.2	Manti d'asfalto o fresato (codice CER 170302)	3.2	Materiale da costruzione e demolizione con impurità fino al 10% vol. (codice CER 170101 cemento 170102 mattoni 170103 mattonelle e ceramica 170107 rifiuti misti di costruzioni e demolizioni)
		2.3	Cemento (codice CER 170101)	3.3	Materiale da costruzione e demolizione con impurità fino al 20% vol. (codice CER 170101 cemento 170102 mattoni 170103 mattonelle e ceramica 170107 rifiuti misti di costruzioni e demolizioni)
		2.4	Pietrisco per massicciate ferroviarie (codice CER 170508)	3.4	Materiale da costruzione e demolizione con impurità fino al 30% vol. (codice CER 170101 cemento 170102 mattoni 170103 mattonelle e ceramica 170107 rifiuti misti di costruzioni e demolizioni; 170904 rifiuti edili)
				3.5	Materiale da costruzione e demolizione con impurità superiore al 30% vol. (codice CER 170101 cemento 170102 mattoni 170103 mattonelle e ceramica 170107 rifiuti misti di costruzioni e demolizioni; 170904 rifiuti edili)

Figura 78: Categorie di accettazione agli impianti di riciclaggio.

Il documento fornisce, inoltre, un elenco di materiali contenenti sostanze nocive che non possono essere conferite agli impianti ma devono essere separate in cantiere e smaltite secondo le normative vigenti.

### **Controlli in entrata**

Del materiale da costruzione e demolizione vengono valutati l'aspetto, il colore e l'odore; in questa fase può, inoltre, essere utile la misurazione in sito della conducibilità elettrica, del pH e della durezza. In caso di sospetto inquinamento occorre eseguire un'analisi. Se mediante un'analisi organolettica (odore, aspetto) o chimica viene accertato un inquinamento chimico del materiale, questo non può essere accettato e deve essere smaltito o stoccato provvisoriamente (in R13) in attesa di caratterizzazione a carico del conferente.

Durante il controllo in entrata, i materiali da C&D vengono esaminati e classificati in base alle loro possibilità di utilizzo in varie categorie di accettazione e destinati in luoghi di stoccaggio distinti.

### **Qualità dei materiali edili riciclati**

Per la caratterizzazione delle diverse frazioni risultanti dalla lavorazione è necessario valutare, in vista di una loro eventuale ulteriore lavorazione/miscelazione, le caratteristiche primarie delle diverse

frazioni ottenute dal processo di lavorazione. La determinazione della presenza di materiale estraneo e incompatibile deve essere fatta ai sensi della norma UNI EN 13242. Le frazioni da dichiarare sono le seguenti:

- Calcestruzzo, prodotti in calcestruzzo, malta, muratura di calcestruzzo;
- Aggregati non legati, pietre naturali, aggregati idraulici legati;
- Muratura in argilla (mattoni e piastrelle), silicati di calcio, particelle non galleggianti;
- Conglomerato bituminoso (asfalto);
- Vetro;
- Altro: materiali coesivi argilla e terreno, materiali ferrosi e non, particelle non galleggianti, legno, plastica e gomma, intonaco di gesso;
- Materiale flottante (inerte e non).

### ***Compatibilità ambientale dei prodotti riciclati***

La valutazione della compatibilità ambientale deve essere effettuata su ogni singola frazione ottenuta dopo la vagliatura. Non è consentita la miscelazione di prodotti di riciclaggio al fine di diluire le sostanze inquinanti in esse contenute. Il prelevamento dei campioni deve essere effettuato di volta in volta dopo la vagliatura e prima dell'eventuale miscelazione.

Per ottenere l'eluato deve essere utilizzata la metodica prevista dall'allegato 1 alla deliberazione del Comitato interministeriale 27 luglio 1984, lettera b), "Test di cessione con acqua satura di CO<sub>2</sub>", in forma leggermente modificata, laddove il tempo di eluizione è fissato in 24 ore. Il materiale deve essere analizzato con la distribuzione granulometrica corrispondente a quella di effettivo utilizzo. La frantumazione è consentita solo quando è indispensabile ai fini dell'analisi. La quantità di campione da analizzare varia in funzione della granulometria.

### ***Limiti***

Si prescrivono valori limite da rispettare per il test di cessione, con valori distinti tra lista 1 e lista 2. Il materiale che supera tali limiti necessita di autorizzazione provinciale, altrimenti deve essere smaltito come rifiuto speciale.

### ***Controllo interno***

Le aziende che effettuano il riciclaggio devono effettuare controlli sugli impianti e su qualità e compatibilità ambientale dei materiali recuperati. Prelievo e analisi devono essere effettuati da laboratori riconosciuti a livello statale. Per ogni tipologia di materiale recuperato si prescrivono il tipo di esame e la frequenza.

Per il granulato di asfalto riciclato RA si distingue tra impiego sciolto, che necessita di analisi dell'eluato e delle frazioni presenti, e impiego legato, che non necessita di test di cessione.

Per il granulato di calcestruzzo riciclato (RB) e per il misto (RM) (con max 15% vol. di conglomerato bituminoso) si prescrivono sia test di cessione che analisi delle frazioni presenti.

Materiale edile riciclato	Tipo di esame	Frequenza dell'esame	Protocollo
RB	eluato: Tab.3, lista 1 analisi: Tabella 2	ogni 5.000 t (3.600 m <sup>3</sup> ), ma min. una volta/anno su ogni singola frazione ottenuta dal ciclo produttivo	rapporto sull'esame
RA per impiego sciolto	eluato: Tab.3, lista 2 analisi: Tabella 2	ogni 5.000 t (3.600 m <sup>3</sup> ), ma min. una volta/anno su ogni singola frazione ottenuta dal ciclo produttivo	rapporto sull'esame
RA per impiego legato a caldo o a freddo	analisi: Tabella 2	ogni 5.000 t (3.600 m <sup>3</sup> ), ma min. una volta/anno su ogni singola frazione ottenuta dal ciclo produttivo	rapporto sull'esame
RM (con al massimo 15% vol di conglomerato bituminoso)	eluato: Tab.3, lista 1 analisi: Tabella 2	ogni 5.000 t (3.600 m <sup>3</sup> ), ma min. una volta/anno, su ogni singola frazione ottenuta dal ciclo produttivo.	rapporto sull'esame

Figura 79: Prove e frequenze per tipologia di materiale.

### Campi di applicazione

Si presenta una lista di ambiti in cui l'utilizzo di materiale edile riciclato è consentito, in particolare:

- Ambito civile non edile
- Costruzioni stradali
- Costruzioni di discariche
- Opere edili

Applicazione		granulato d'asfalto	granulato di calcestruzzo	granulato misto
civile non edile	miglioramento sottofondo		X	X
	stabilizzazione terreno		X	X
	letto per tubazioni		X	X
	riempimento di scavi per condutture		X	X
	riempimenti e rinterrì		X	X
	costruzione campi sportivi		X	X
	opere di protezione		X	X
costruzioni stradali	sottofondi stradali	X	X	X
	strati portanti	X	X	X
	strati binder (provenienti da impianti autorizzati ai sensi dell'art. 2 del d.p.p. n. 23/2012)	X		
	strati d'usura (provenienti da impianti autorizzati ai sensi dell'art. 2 del d.p.p. n. 23/2012)	X		
strade senza superficie sigillata	sottofondi per strade rurali ed aree di passaggio		X	X
	sottofondi per strade forestali		X	X
	inghiaiatore strade rurali escluse strade forestali e di alpeggio		X	X
	piste ciclabili	X sotto superfici sigillate	X	X come sottofondo stradale o per strati portanti

Figura 80: Ambiti di utilizzo del materiale riciclato.

Applicazione		granulato d'asfalto	granulato di calcestruzzo	granulato misto
	letto per strati lastricati		X	X
	barriera insonorizzante		X	X
costruzione di discariche	sottofondi	X	X	
	strati di drenaggio		X	X
	materiale di copertura		X	X
	viabilità interna	X	X	X
industria materiali da costruzione	mattoni in calcestruzzo e pietre artificiali		X	
opere edili	strato di compensazione		X	X
	strato di drenaggio		X	X
	calcestruzzo e magrone per fondazioni		X	
	inerti per massetti e pavimenti		X	

Figura 81: Ambiti di utilizzo del materiale riciclato.

Per il recupero diretto è necessaria l'autorizzazione provinciale e sono da rispettare i valori limite indicati in precedenza.

#### **Divieto di impiego dei materiali edili riciclati in zone di rispetto idrico**

È vietato l'impiego di materiali edili riciclati nelle zone di tutela dell'acqua potabile I e II di cui all'art. 15 della legge provinciale 18 giugno 2002, n. 8, in prossimità di falde acquifere fino ad 1 m sopra all'escursione massima della falda, in una fascia di 5 m dalle acque superficiali, a una distanza inferiore a 100 m da pozzi per acque potabili ovvero 200 m in caso di sorgenti situate più a valle, in zone destinate ad aree di tutela idrica dal piano urbanistico comunale, in zone umide e in prati o aree sottoposti a drenaggio.

#### **Standard tecnici minimi per gli impianti di riciclaggio**

Si prevedono 4 categorie di impianti:

**A:** centralizzato con impiantistica avanzata avente come bacino di utenza un grande agglomerato urbano;

**B:** stazione periferica con limitata impiantistica avente bacino di utenza rurale;

**C:** per asfalti con attrezzature speciali per fresato e riciclaggio di asfalto;

Impianti mobili: per la lavorazione di materiali prodotti in cantiere da riutilizzare preferibilmente nel cantiere stesso. Per ogni categoria si prevedono le misure di accettazione, le aree di stoccaggio e l'impiantistica tecnica minima.

- **Provincia autonoma di Bolzano – Delibera Giunta Provinciale n. 398 del 11 Aprile 2017**

“Linee Guida sulla qualità e l’utilizzo dei materiali riciclati”, Anno 2017.

Al fine di incentivare l’utilizzo del materiale riciclato in tutto l’Alto Adige, la Giunta Provinciale di Bolzano, nell’anno 2017, ha emanato le nuove direttive, aggiornate allo stato dell’arte, in merito alla qualità dei prodotti riciclati ottenuti dal trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione, nonché le possibilità di utilizzo e applicazione. Questo perché il presupposto per immettere nuovamente i materiali edili riciclati nel ciclo dei materiali da costruzione è la definizione di un loro standard qualitativo uniforme. I materiali edili riciclati devono, quindi, poter rispondere, nelle caratteristiche d’uso e di durata, agli stessi requisiti richiesti alle materie prime da costruzione naturali comunemente usate.

La delibera in oggetto deve essere utilizzata in sincronia con la delibera D.G.P. 27/09/2016, n. 1030, *“Disposizioni per il recupero dei resti di costruzione e per la qualità dei materiali edili riciclati”* che regola la gestione del materiale edile riciclato come rifiuto e fissa i limiti e le caratteristiche fisico-chimiche alle quali tale materiale deve ottemperare per non essere considerato rifiuto.

Il documento, insieme alle schede tecniche allegate, descrive le caratteristiche di qualità richieste ai prodotti riciclati sotto il profilo della tecnica edilizia e della compatibilità ambientale e individua possibili ambiti d’impiego nelle costruzioni, ovvero:

- lavori di nuova costruzione o manutenzione del corpo stradale;
- interventi per la realizzazione o manutenzione di opere strutturali edili in generale;
- recuperi ambientali;
- opere di mitigazione di pericoli idrogeologici.

- **Regione Veneto – DGRV n. 1773 del 28 Agosto 2012 e DGRV n. 1060 del 24 Giugno 2014**

“Modalità operative per la gestione dei rifiuti da attività di costruzione e demolizione”, Anno 2012.

### **Definizioni**

Si definiscono “rifiuti generati da attività di costruzione e demolizione” quelli a cui sono attribuiti i codici EER del capitolo 17 e rifiuti diversi che possono essere prodotti nelle normali attività di costruzione e demolizione (esempio, rifiuti da imballaggi) a cui sono attribuiti EER diversi dai 17.

Si definisce “aggregato riciclato” il prodotto derivante dal recupero di rifiuti non pericolosi da operazioni di costruzione e demolizione conforme a quanto previsto dall’art. 1 della circolare del ministero dell’ambiente 15/7/2005, n. UL/2005/5205 e dotato di sistema di attestazione di conformità (marcatura CE) secondo le specifiche norme di riferimento applicabili in funzione dell’utilizzo (UNI EN 13242 e 12620).

Si definisce “lotto” il quantitativo di aggregato riciclato prodotto in condizioni omogenee e conforme alle note 3 riportate negli allegati alla Circolare del Ministero dell’Ambiente 15/7/2005, n. UL/2005/5205.

### **Gestione dei rifiuti nel cantiere**

Per le attività di demolizione la soluzione più efficace è quella di procedere attraverso operazioni di “*demolizione selettiva*” separando le varie tipologie di rifiuti dai componenti riutilizzabili e avviandole a idonei impianti di trattamento.

La demolizione selettiva prevede un insieme di fasi operative di seguito schematizzate (Figura 82):

- indagine preliminare;
- rimozione eventuali criticità;
- demolizione struttura con accumulo di rifiuti omogenei a seconda dei EER.

Il documento riporta la descrizione delle modalità di gestione di alcune tipologie di rifiuti che possono essere prodotte nel corso dell’esecuzione di una demolizione selettiva, quali:

- materiali con presenza di amianto;
- serbatoi interrati;
- pavimentazioni in asfalto;
- guaine bituminose e altri materiali di rivestimento e isolanti potenzialmente pericolosi;
- impianti contenenti PCB;
- rifiuti pericolosi e non abbandonati;
- rifiuti rimossi dalla struttura.

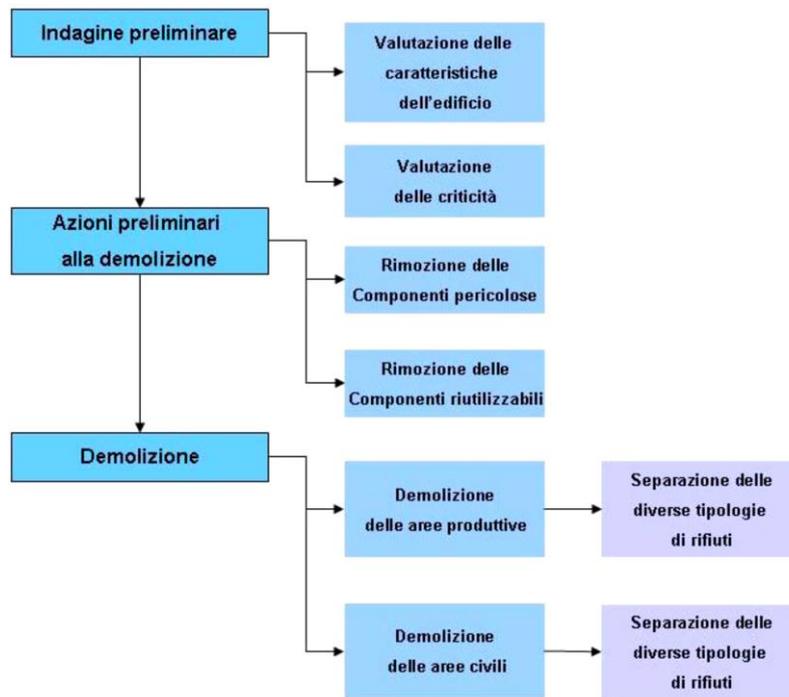


Figura 82: Fasi operative della demolizione.

### **Analisi dei rifiuti da costruzione demolizione da parte del produttore**

Per le attività di demolizione, nei casi in cui sono previsti codici a specchio, l'obbligo di effettuare le analisi da parte del produttore dei rifiuti va differenziato a seconda che il rifiuto venga generato nel corso di: demolizione selettiva o demolizione non selettiva.

1) Qualora la demolizione sia eseguita con **modalità selettiva** e riguardi:

- a) **fabbricati civili o commerciali o parti di fabbricati industriali non destinati ad uso produttivo** (ad es. uffici, mense, magazzini): non vi è necessità di effettuazione di analisi per l'attribuzione del EER, anche se a specchio, qualora si attesti preventivamente che le aree da demolire non presentano alcuna delle casistiche o criticità descritte nel capitolo dedicato alla demolizione selettiva. Al rifiuto ottenuto dalla demolizione selettiva delle strutture in muratura o calcestruzzo, nel caso ricorrano le condizioni sopradette, verrà attribuito il codice EER 170107 "miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse da quelle di cui alla voce 170106\*" senza verifiche analitiche. Qualora, invece, non sia possibile attestare preventivamente che non ricorra alcuna delle condizioni descritte, gli eventuali rifiuti classificabili con codice a specchio dovranno essere sottoposti ad analisi per i parametri correlabili alle specifiche sostanze pericolose potenzialmente presenti. Trattandosi di rifiuti che si possono considerare omogenei, le analisi dovranno essere effettuate su una massa di rifiuti sufficientemente significativa ai fini della rappresentatività dei rifiuti che saranno prodotti (tale analisi andrà ripetuta ogni massimo 3000 mc di rifiuto prodotto).
- b) **fabbricati artigianali o industriali**: per l'attribuzione del EER andranno effettuate le analisi. Trattandosi di rifiuti che si possono considerare omogenei, le analisi dovranno essere effettuate su una massa di rifiuti sufficientemente significativa ai fini della rappresentatività dei rifiuti che saranno prodotti (tale analisi andrà ripetuta ogni massimo 3000 mc di rifiuto prodotto).

La dimostrazione che la demolizione è stata condotta con modalità selettiva è effettuata predisponendo un'apposita dichiarazione resa dal titolare dell'impresa che effettua la demolizione.

2) Qualora la demolizione sia eseguita con **modalità non selettiva**: dovranno essere effettuate le analisi a prescindere dalle destinazioni d'uso del fabbricato o di porzione dello stesso. Trattandosi di rifiuti che non si possono considerare omogenei, la totalità dei rifiuti prodotti dovrà essere caratterizzata analiticamente per partite di volume massimo pari a 500 m<sup>3</sup> (il campionamento andrà eseguito sull'intero volume di rifiuti da caratterizzare).

Nel caso di demolizione non selettiva, il profilo chimico minimo richiesto deve essere comunque valutato in funzione della tipologia dell'edificio e potrebbe prevedere delle analisi sui seguenti parametri: pH, Piombo, Nichel, Rame, Cromo totale, Cromo VI, Mercurio, Arsenico, Cadmio, Zinco, Cianuri, Idrocarburi pesanti C>12, IPA, PCB.

Deve, altresì, essere dimostrato che il rifiuto da costruzione e demolizione sia privo di amianto.

### **Impianti di recupero dei rifiuti da C&D**

Il documento propone uno schema a blocchi indicativo dell'impianto:

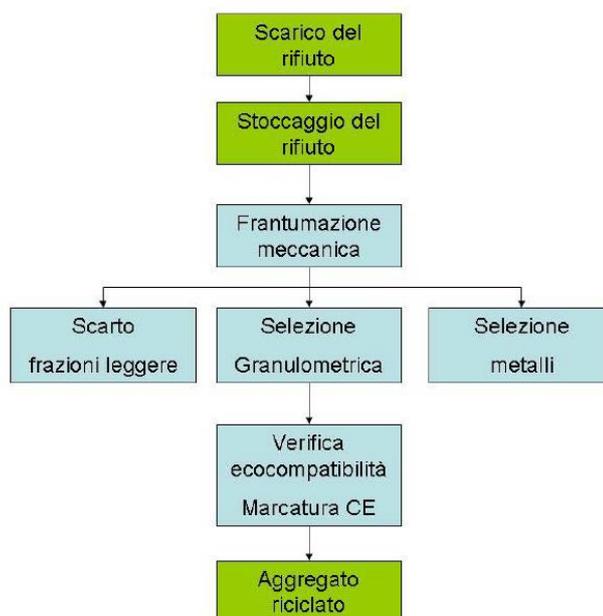


Figura 83: Fasi operative degli impianti di trattamento.

Gli impianti sono divisibili in due macrocategorie:

- Impianti fissi;
- Impianti mobili.

Gli impianti fissi si caratterizzano per la maggiore complessità, legata alla contemporanea presenza di diversi sistemi di macinazione in grado di produrre granulometrie diverse di materiale. Gli impianti fissi sono in genere dotati di sistemi di trasporto su nastro delle diverse frazioni verso aree definite dell'impianto.

Per ogni fase gestionale è previsto un obiettivo e un mezzo per raggiungere tale obiettivo:

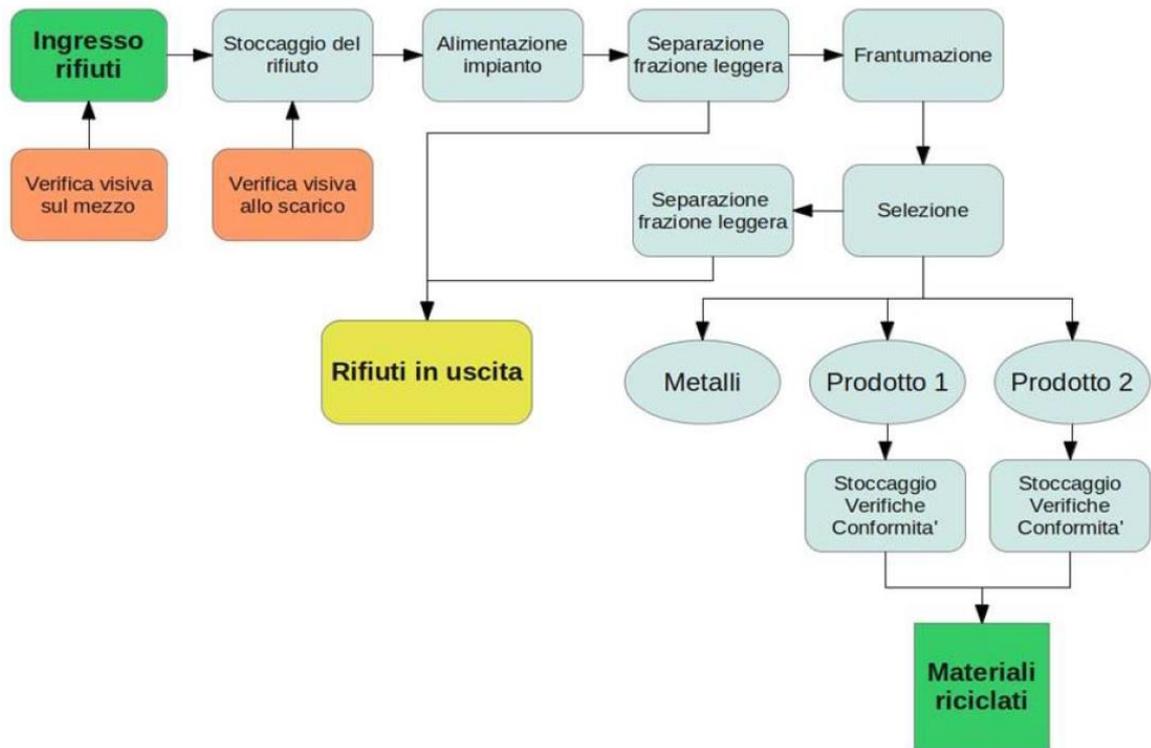


Figura 84: Obiettivi e metodologie per ogni fase del processo.

### **Procedure di accettazione**

Sono da prevedere sia controlli di tipo amministrativo sulla documentazione necessaria, che controlli di tipo qualitativo, come il controllo visivo.

### **Dotazioni per la mitigazione ambientale**

Gli impatti ambientali degli impianti di recupero degli inerti sono correlati principalmente a due fattori:

- il rumore prodotto dalla fase di macinazione;
- la produzione di polveri.

A seconda dell'effetto di mitigazione che si vuole ottenere si propongono delle soluzioni che fanno capo a quanto previsto dal D.M. 5/2/98 e s.m.i..

### **Campionamento dei rifiuti in ingresso**

Il documento indica che il campionamento dei rifiuti in ingresso deve essere effettuato sul rifiuto tal quale.

### **Caratteristiche dei prodotti provenienti dal recupero dei rifiuti da C&D**

I prodotti derivanti dalle attività di recupero di rifiuti inerti devono possedere almeno le caratteristiche indicate ai seguenti punti :

- a) **Caratteristiche ambientali e di qualità dei prodotti:** per gli aggregati riciclati l'impianto è tenuto a predisporre, per ogni lotto di materiale, la qualificazione dello stesso seguendo le

procedure e i metodi previsti dalla Norma UNI EN 13285:2010 “Miscele non legate - Specifiche”. Le caratteristiche che devono essere rispettate da tali prodotti sono contenute all’Allegato C della Circolare Ministeriale 15 luglio 2005, n. UL/2005/5205.

- b) **Caratteristiche prestazionali dei prodotti:** I prodotti derivanti dal recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione devono riportare obbligatoriamente la marcatura CE, il livello di attestazione di conformità deve rispondere ai contenuti del “sistema 4” o del “sistema 2+” in funzione del tipo di uso previsto e delle specifiche norme di riferimento applicabili (UNI EN 12620, 13242, 13043).

Relativamente agli aggregati per calcestruzzi, a quanto sopra vanno aggiunte le prescrizioni previste dal D.M. 14/1/2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”.

### ***Frequenza delle prove***

Occorre prevedere prove di caratterizzazione dei materiali per lotti secondo la frequenza e così come definiti nella nota 3 degli allegati C alla Circolare del Ministero dell’ambiente 15/7/2005, n. 5205.

- **Provincia autonoma di Trento – Deliberazione Giunta Provinciale n. 1333 del 24 Giugno 2011**

**A:** Linee guida per la corretta gestione di un impianto di recupero e trattamento dei rifiuti e per la produzione di materiali riciclati da impiegare nelle costruzioni (edili, stradali e recuperi ambientali), Anno 2011.

### ***Ispezioni e prove***

Il prelevamento dei campioni dovrà essere conforme alle seguenti norme:

- UNI 10802, per i rifiuti;
- UNI EN 932-1, per gli aggregati prodotti.

I controlli e le ispezioni sono:

- in ingresso sui rifiuti;
- in produzione;
- finali sui prodotti riciclati.

### ***Controlli***

I materiali ed i rifiuti in ingresso all'impianto di trattamento e recupero devono essere sottoposti a verifiche e controlli finalizzati a:

- ritiro esclusivo dei rifiuti autorizzati riportati nell'Elenco Europeo rifiuti;
- accertamento della corretta attribuzione dei codici EER;
- accertamento quantitativo (peso) e qualitativo (presenza di impurità);
- corretta destinazione a deposito - messa in riserva.

Per assicurare la conformità dei prodotti alle prescrizioni di natura tecnica ed ambientale, i materiali in uscita dall'impianto di trattamento e lavorazione dovranno essere sottoposti a controlli strumentali.

### ***Verifica di conformità***

Al ricevimento dei rapporti delle analisi effettuate sui materiali, il responsabile incaricato dovrà verificare la conformità dei requisiti analizzati rispetto alle prescrizioni tecniche, prestazionali ed ambientali. I limiti delle singole prescrizioni sono riportati nelle norme tecniche e nelle schede prodotto di ogni materiale.

Nel caso in cui le non conformità riguardino le caratteristiche tecniche dei materiali riciclati il trattamento potrà prevedere, in base al tipo di non conformità, la rilavorazione o il declassamento del materiale. Qualora l'anomalia sia riferita a requisiti di ecocompatibilità, il materiale non potrà essere consegnato. In caso di rilascio di sostanze superiore ai limiti consentiti (test di cessione) il materiale deve essere confinato ed inviato a smaltimento o ulteriore trattamento.

### Caratteristiche dell'impianto di recupero e trattamento

Si riporta un diagramma di flusso descrittivo del funzionamento di un impianto di recupero e trattamento.

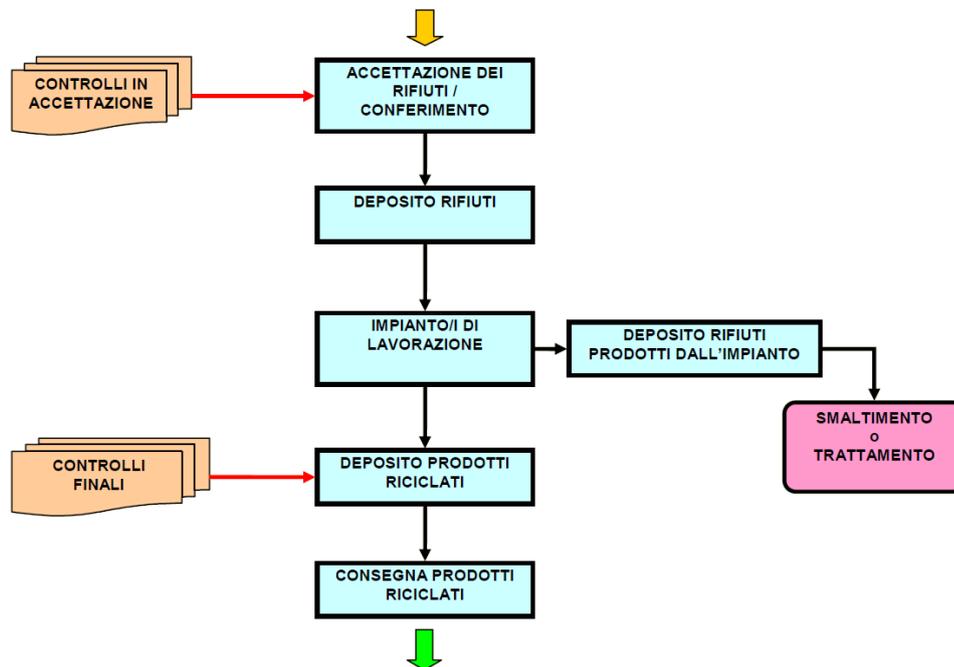


Figura 85: Caratteristiche dell'impianto di recupero e trattamento.

Il documento riporta prescrizioni e specifiche costruttive per le seguenti aree dell'impianto:

- Area di ingresso – conferimento
- Area di deposito rifiuti
- Impianto di trattamento
- Area di deposito dei rifiuti prodotti dall'impianto di trattamento
- Area di deposito dei prodotti
- Spazi di supporto

Gli impianti sono classificati in funzione del vincolo strutturale esistente nel terreno, come mostrato in Figura 86.

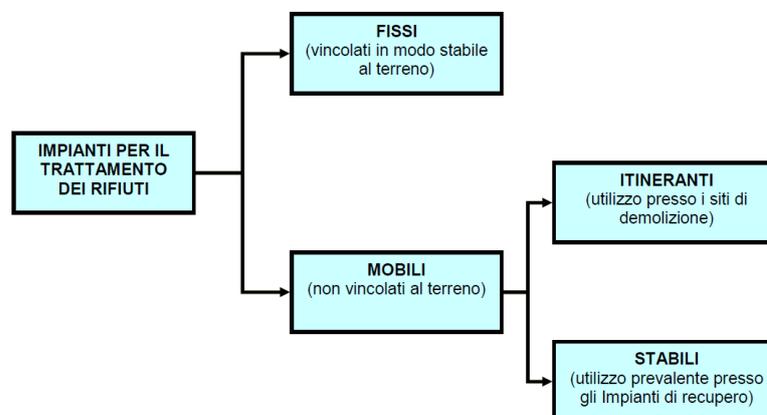


Figura 86: Vincoli strutturali nel terreno che incidono sulla classificazione degli impianti.

Le caratteristiche tecniche di un impianto di trattamento sono determinate in funzione dei rifiuti da trattare e dei requisiti richiesti per i prodotti riciclati. A titolo informativo, nella seguente tabella sono riportate le possibili componenti di un impianto.

SETTORE	COMPONENTI	FUNZIONE	OSSERVAZIONI
ALIMENTAZIONE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tramoggia di carico;</li> <li>- alimentatore;</li> <li>- eventuale separatore delle frazioni organiche.</li> </ul>	Raccolta del rifiuto in una vasca di metallo e trasporto alla frantumazione primaria (eventuale possibilità di separare le componenti terrose – argillose).	L'alimentazione avviene mediante mezzo meccanico (pala o escavatore). Normalmente è possibile modulare la portata in funzione della tipologia di rifiuto immesso
FRANTUMAZIONE PRIMARIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- frantoio a mascelle o</li> <li>- mulino giratorio.</li> </ul>	Demolizione delle componenti di maggiori dimensioni.	La scelta del tipo di frantumazione è in funzione delle dimensioni e della natura dei blocchi da demolire (cls, pietra, laterizio).
FRANTUMAZIONE SECONDARIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mulino giratorio.</li> </ul>	Riduzione delle dimensioni dei granuli e produzione della frazione fine.	La frantumazione secondaria consente la continuità della composizione granulometrica negli aggregati misti.
FRANTUMAZIONE TERZIARIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mulino giratorio.</li> </ul>	Aumento della produzione delle frazioni fini e omogeneizzazione della composizione granulometrica.	La frantumazione terziaria favorisce la produzioni di classi granulometriche con limitati scostamenti della composizione granulometrica.
SELEZIONE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vaglio vibrante (a secco o con acqua).</li> </ul>	Classificazione dimensionale degli aggregati e separazione delle frazioni granulometriche.	I vagli sono dotati di reti in materiali diversi a seconda del materiale da selezionare (metallo, gomma o poliuretano).
MOVIMENTAZIONE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nastri trasportatori.</li> </ul>	Trasporto del materiale.	La dimensione dipende dalla portata del materiale; in caso di materiali polverosi è necessaria la copertura.
ACCESSORIO	COMPONENTI	FUNZIONE	OSSERVAZIONI
SISTEMA DI ELIMINAZIONE DELLE FRAZIONI LEGGERE (pvc, legno, polistirene,...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aspiratori.</li> </ul>	Riduzione delle impurità presenti nei rifiuti nei limiti ammessi dalle prescrizioni tecniche e prestazionali.	Il sistema consente di trattare anche i rifiuti contenenti quantità rilevanti di impurità.
ABBATTIMENTO POLVERI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cofanature;</li> <li>- nebulizzatori;</li> <li>- irrigatori;</li> <li>- .</li> </ul>	Contenimento della dispersione di polveri fini prodotte dagli organi in movimento	La scelta del tipo di sistema di abbattimento è correlata alla morfologia del sito ed alle macchine installate privilegiando, comunque, la cofanatura.
SELEZIONE MAGNETICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- deferrizzatori.</li> </ul>	Prelievo delle frazioni metalliche presenti nel rifiuto.	Le frazioni metalliche presenti nei rifiuti e captate dai sistemi adottati devono essere depositate e conferite a trattamento.
TRATTAMENTO DEI FANGHI (se la vagliatura è ad umido)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- separatori;</li> <li>- nastro pressa;</li> <li>- filtropressa</li> </ul>	L'acqua di lavaggio viene recuperata e separata dalle parti fini.	L'impiego di acqua nelle fasi di lavaggio favorisce la selezione dei materiali e ne assicura la pulizia, ove richiesto dalle Norme Tecniche.

Figura 87a: Esempio di filiera di trattamento.

Esempio di filiera di trattamento:

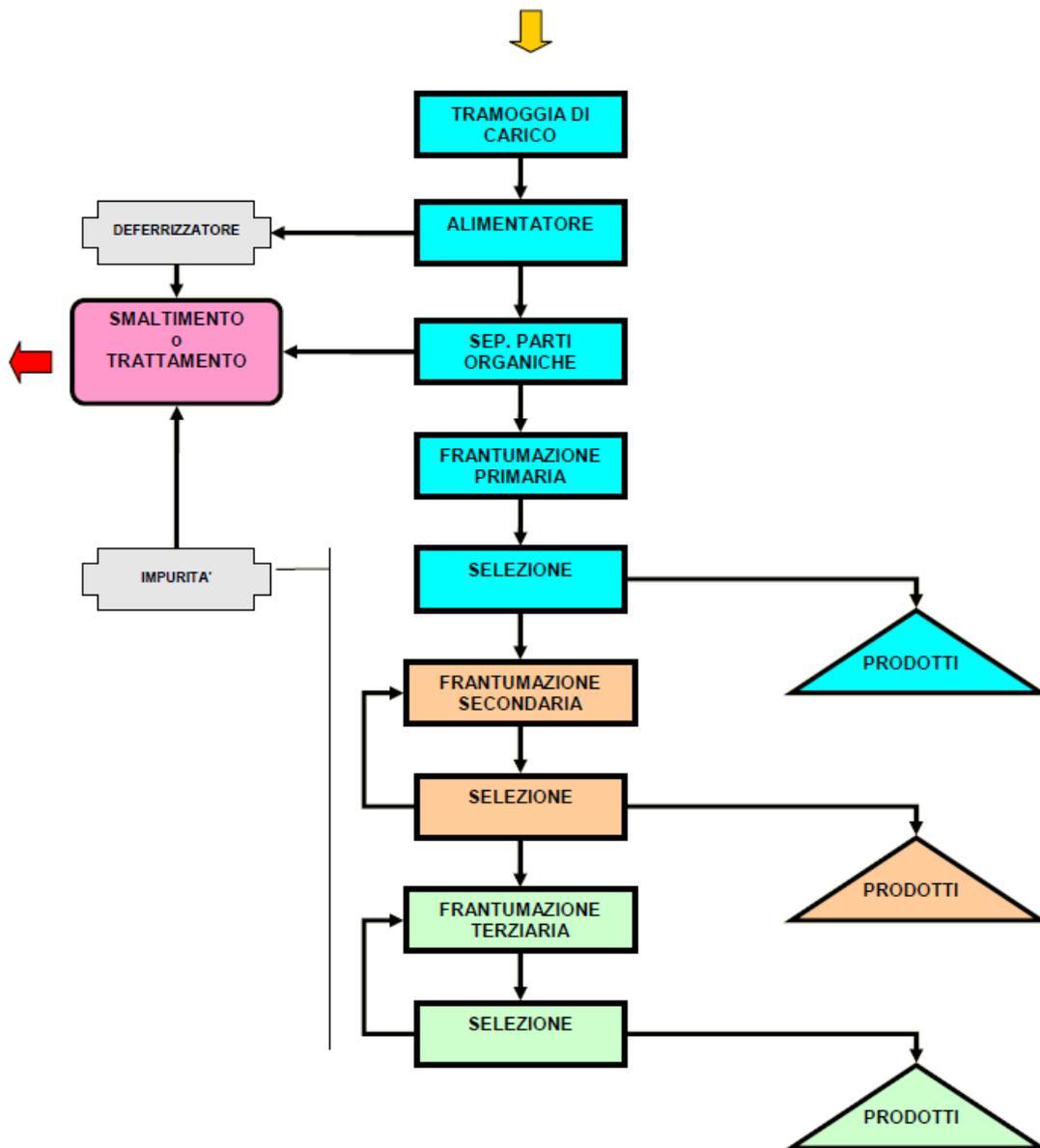


Figura 87b: Esempio di filiera di trattamento.

### **Prodotti riciclati**

Le categorie dei prodotti riciclati ottenuti dal trattamento dei rifiuti provenienti dalle attività di costruzione e demolizione (C&D) e dalle attività industriali sono:

1. prodotti per la realizzazione di opere di costruzione edile e stradale (R 5);
2. materiali costituenti per la produzione di altri prodotti (R 5);
3. prodotti per opere di recupero ambientale (R 10).

Nel diagramma successivo è descritto il flusso per la realizzazione dei prodotti riciclati:

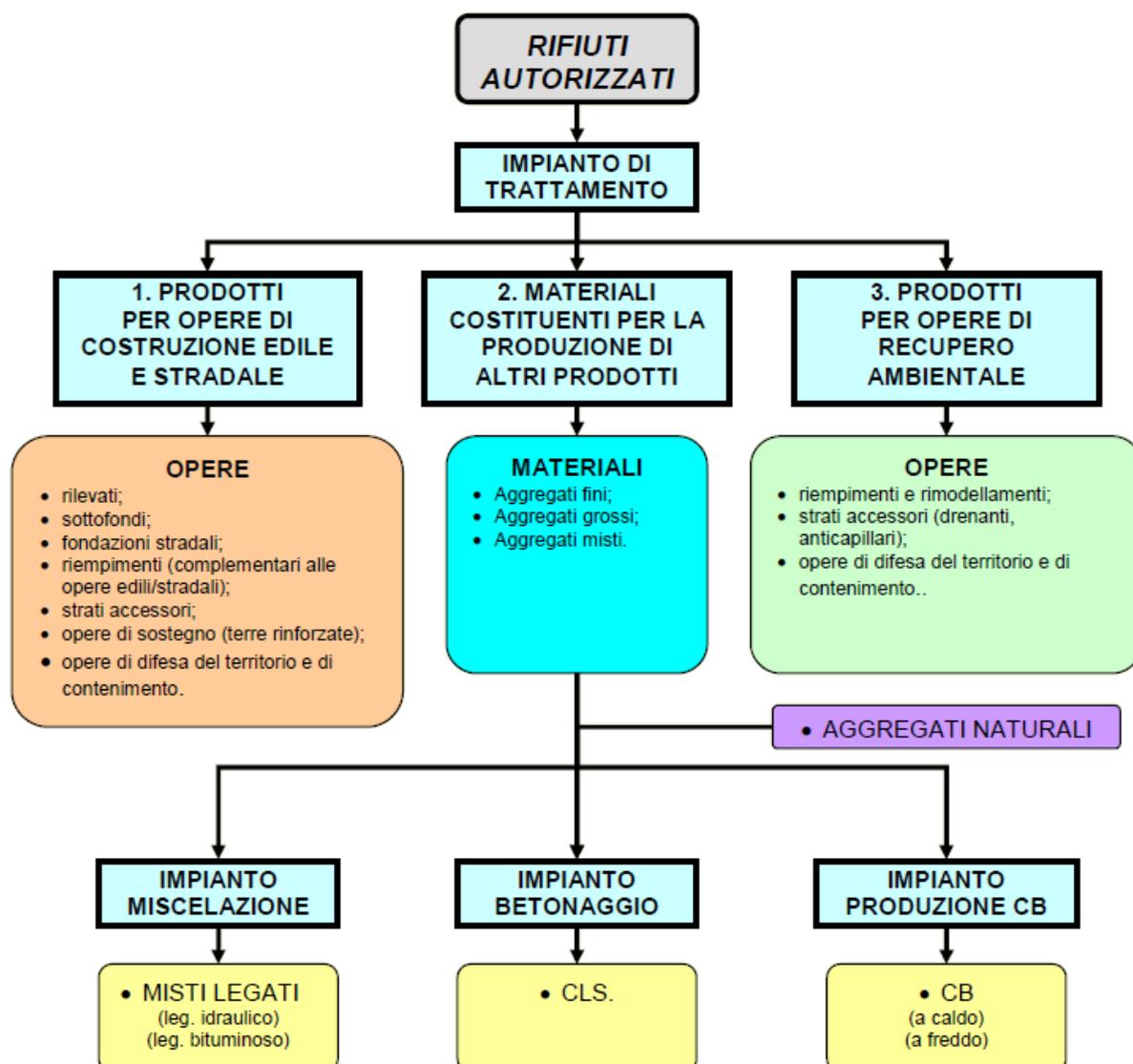


Figura 88: Schema di flusso per la produzione di prodotti riciclati.

### Modalità di alimentazione

In linea generale non è ammessa la miscelazione di differenti tipologie di rifiuto così come classificate ai sensi dell'Allegato 1, subAllegato 1 del DM 5 febbraio 1998 e s.m.i. Pertanto l'impianto di trattamento dovrà prevedere la messa in riserva dei rifiuti distinti per tipologia così come descritto nel capitolo 2 della presente Linea guida.

Qualora l'impianto sia autorizzato all'esercizio dell'attività di recupero e trattamento dei rifiuti con procedura ordinaria secondo l'art. 208 del D.Lgs. 152/2006, è ammessa la possibilità di miscelare tipologie diverse di rifiuto per ottenere dei prodotti di migliore prestazione e conformi a quanto prescritto dalle norme tecniche ed ambientali (CM 5205/2005), purché:

- i prodotti ottenuti non siano destinati all'utilizzo in opere di recupero ambientale;

- sia dimostrato che ogni tipologia di rifiuto sia preventivamente stato sottoposto all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto tal quale secondo il metodo in Allegato 3 del DM 5 febbraio 1998 e s.m.i.;
- sia elaborata una procedura operativa che specifichi le modalità di alimentazione e la composizione della miscela.

### Norme di accettazione

CATEGORIA	PRODOTTO RICICLATO	DESTINAZIONE	NORME PER L'ACCETTAZIONE DEI PRODOTTI RICICLATI (*)			
			REQUISITI TECNICI	IDONEITA' ALL'UTILIZZO (CE)	REQUISITI AMBIENTALI E PRESTAZIONALI	NORME PAT
PRODOTTI DA IMPIEGARE NELLE OPERE EDILI E STRADALI	AGGREGATI: • fini; • grossi; • misti.	• Rilevati stradali; • Sottofondi stradali; • Fondazioni stradali; • Riempimenti; • Strati accessori.	• UNI EN 13285 • UNI EN 14688-1 • UNI EN 13242 •	• UNI EN 13242 • DM 11/04/2007	• DM 05/02/1998 (e s.m.i.) • CM 5205/2003 (**) (Allegati C1-2-3-4-5)	• Norme Tecniche ed ambientali per la produzione dei materiali riciclati
MATERIALI COSTITUENTI PER LA PRODUZIONE DI ALTRI PRODOTTI PER L'EDILIZIA	AGGREGATI: • fini; • grossi.	Produzione di: • CB prodotti a caldo; • CB prodotti a freddo.	• UNI EN 13043 • DM 16/11/2009	• UNI EN 13043 • DM 16/11/2009	• DM 05/02/1998 (e s.m.i.)	-
	AGGREGATI: • fini; • grossi.	Produzione di: • CLS.	• UNI EN 12620 • UNI EN 8520-1-2 • DM 14/01/2008	• UNI EN 12620 • DM 11/04/2007	• DM 05/02/1998 (e s.m.i.)	-
	AGGREGATI: • fini; • grossi; • misti.	Produzione di: • misti granulari legati (legante idraulico).  Produzione di: • misti granulari legati (legante bituminoso).	• UNI EN 14227-1 • UNI EN 13242 • DM 11/04/2007  -	• UNI EN 13242 • DM 11/04/2007  -	• DM 05/02/1998 (e s.m.i.)  • DM 05/02/1998 (e s.m.i.)	• Norme Tecniche ed ambientali per la produzione dei materiali riciclati
PRODOTTI DA IMPIEGARE NELLE OPERE DI RECUPERO AMBIENTALE	AGGREGATI: • fini; • grossi; • misti.	• Recupero ambientale; • Sistemazioni agrarie; • Opere a verde.	-	-	• DM 05/02/1998 (e s.m.i.) • CM 5205/2003 (All. C4-5) (**) • D.Lgs. 152, Parte IV, All.5, Tab.1 (A/B a seconda della destinazione d'uso)	• Norme Tecniche ed ambientali per la produzione dei materiali riciclati

Figura 89: Norme di accettazione.

### Attività di recupero

RIFIUTO				ATTIVITA' DI RECUPERO					
CODICI CER	TIP.	DESCRIZIONE DEL RIFIUTO	PROVENIENZA	PRODOTTI PER LE COSTRUZIONI EDILI E STRADALI	MATERIALI COSTITUENTI PER LA PRODUZIONE DI:				PRODOTTI PER I RECUPERI AMBIENTALI
					CB a caldo	CB a freddo	CLS	MISTI GRANULARI legati Ildr. Bit.	
10 11 12 - 15 01 07 - 16 01 20 - 17 02 02 - 19 12 05 - 20 01 02	2.1	Imballaggi, vetro di scarto e altri rifiuti e frammenti di vetro; rottami di vetro	raccolta differenziata	X					
10 11 99	2.3	Rottame fine di cristallo	industria del cristallo				X	X	
06 09 02 - 10 06 01 - 10 06 02 - 10 08 09 - 10 10 03	4.1	Scorie provenienti dall'industria della metallurgia dei metalli non ferrosi	industria metallurgica		X	X	X	X	X
10 07 01	4.2	Scorie di fusione da recupero di metalli preziosi	forno di fusione dei rifiuti contenenti metalli preziosi		X	X			X
10 02 01 - 10 02 02 - 10 09 03	4.4	Scorie di acciaieria, scorie provenienti dalla fusione in forni	industria siderurgica	X	X	X	X	X	X
10 13 11 - 17 01 01 - 17 01 02 - 17 01 03 - 17 01 07 - 17 08 02 - 17 09 04 - 20 03 01	7.1	Rifiuti costituiti da laterizi, intonaci e conglomerati di cemento armato e non... purché privi di amianto	demolizione e/o costruzione, manutenzione reti	X				X	X
01 03 99 - 01 04 08 - 01 04 10 - 01 04 13	7.2	Rifiuti di rocce di cave autorizzate	attività di lavorazione dei materiali lapidei	X	X	X	X	X	X
10 12 03 - 10 12 06 - 10 12 08	7.4	Sfridi di laterizio cotto ed argilla espansa	attività di produzione di laterizi e di argilla espansa e perlite espansa	X					X
10 10 99 - 10 12 99	7.5	Sabbie esauste	produzione di refrattari elettrofusi	X	X	X	X	X	X
17 03 02 - 20 03 01	7.6	Conglomerato bituminoso (fresato), frammenti di piattelli per il tiro al volo	scarifica del manto stradale mediante fresatura a freddo	X	X	X			X
06 03 16 - 07 01 99 - 16 11 02 - 16 11 04 - 16 11 06	7.8	Rifiuti di refrattari, rifiuti di refrattari da forni per processi ad alta temperatura	rifiuti di refrattari		X	X	X	X	X

Figura 90: Attività di recupero.

RIFIUTO				ATTIVITA' DI RECUPERO						
CODICI CER	TIP.	DESCRIZIONE DEL RIFIUTO	PROVENIENZA	PRODOTTI PER LE COSTRUZIONI EDILI E STRADALI	MATERIALI COSTITUENTI PER LA PRODUZIONE DI:				PRODOTTI PER I RECUPERI AMBIENTALI	
					CB a caldo	CB a freddo	CLS	MISTI GRANULARI legati		
								Idr.		Bit.
16 11 06	7.9	Scarti di refrattari a base di carburo di silicio	Industria ceramica e refrattari		X	X	X	X	X	
12 01 01 - 12 01 02 - 12 01 03 - 12 01 04 - 12 01 17 - 12 01 21	7.10	Sabbie abrasive di scarto e granulati, rottami e scarti di mole abrasive	processi di pulizia, lavorazioni meccaniche e sabbiatura delle superfici di manufatti metallici, produzione di moli abrasive.	X	X	X			X	
17 05 08	7.11	Pietrisco tolto d'opera	Manutenzione delle strutture ferroviarie	X			X	X	X	X
01 01 02 - 01 03 08 - 01 04 08 - 01 04 10 - 02 04 02 - 02 04 99 - 02 07 01 - 02 07 99 - 10 02 99	7.17	Rifiuti costituiti da pietrisco di vagliatura del calcare	attività industriali dello zucchero, dell'alcool, del lievito e dell'estrazione, lavorazione e taglio del calcare, industria siderurgica.	X			X	X		X
05 06 99 - 06 13 99 - 10 01 99	7.24	Scorie vetrose da gassificazione di carbone	gassificazione di carbone, anche ad elevato tenore di zolfo, in impianti di produzione energia elettrica od in impianti	X	X	X	X	X	X	
			chimici di sintesi.							
10 02 99 - 10 09 06 - 10 09 08 - 10 09 10 - 10 09 12 - 16 11 04	7.25	Terre e sabbie esauste da fonderia di seconda fusione dei metalli ferrosi	fonderie di seconda fusione di ghisa e di acciaio.	X	X	X	X	X	X	
10 02 08 - 10 02 99	7.27	Materiali fini da filtri aspirazioni polveri di fonderia di ghisa...	fonderie di seconda fusione di ghisa.		X	X	X	X	X	
02 01 99 - 02 04 01	7.31	Terre da coltivo, derivanti da pulizia di materiali vegetali ...	industria agroalimentare in genere e industria laniera	X						X
17 05 04	7.31b IS	Terre e rocce di scavo	Attività di scavo	X						X
01 04 10 - 01 04 13	12.3	Fanghi e polveri da segazione e lavorazione pietre, marmi e ardesie	lavorazione materiali lapidei di natura calcarea.	X			X	X	X	X
01 04 10 - 01 04 13	12.4	Fanghi e polveri da segazione, molatura e lavorazione granito	lavorazione materiali lapidei di natura silicea.	X			X	X	X	X
10 11 03	12.9	fango secco di natura sabbiosa	molatura del vetro.	X						X
10 02 12 - 12 01 15	12.11	fanghi da processi di pulizia manufatti in acciaio, decantazione acque di raffreddamento dei processi dell'industria siderurgica	industria meccanica, industria siderurgica.	X			X			
10 02 14 - 10 02 15	12.12	Fanghi da abbattimento polveri da lavorazione delle terre per fonderie	fonderie di ghisa e di acciaio.		X	X			X	

Figura 91: Attività di recupero.

### Controlli in accettazione sui rifiuti

Il documento indica che i controlli in accettazione sui rifiuti devono essere di tipo documentale, visivo e strumentale.

### Caratterizzazione analitica

La caratterizzazione analitica è finalizzata ad accertare le caratteristiche chimiche, fisiche e merceologiche e la presenza di eventuali inquinanti nel rifiuto conferito all'impianto di recupero e trattamento. Le frequenze previste corrispondono a:

- primo conferimento all'impianto di recupero e trattamento;
- ogni 24 mesi;
- ogni volta che intervengono modifiche sostanziali nel processo di produzione;
- in base ad eventuali prescrizioni previste nelle autorizzazioni.

La normativa vigente non stabilisce con esattezza i parametri correlati alle modifiche del processo di produzione e/o trattamento del rifiuto, pertanto si deve ritenere che il responsabile dell'impianto di recupero debba valutare l'omogeneità del rifiuto. Per i rifiuti provenienti dalle attività di costruzione e demolizione possono essere applicati i seguenti criteri di omogeneità:

- natura prevalente del materiale (es. pietra, laterizio, cemento, conglomerato bituminoso, gesso, legno, plastica);
- tecnologia costruttiva (es. struttura portante a telaio o struttura in muratura, solai in laterocemento o in cls alleggerito, copertura in legno o in lastre prefabbricate, legno naturale o trattato e verniciato);
- periodo di costruzione (es. edificio antico in pietra privo di c.a., edificio recente con materiali isolanti).

Per quanto riguarda i soli rifiuti non pericolosi provenienti dalle attività di demolizione ed appartenenti alla tipologia 7.1 dell'Allegato 1- subAllegato 1 al D.M. 5 febbraio 1998 e s.m.i, la Provincia Autonoma di Trento ha disposto una Circolare interpretativa in cui chiarisce che non sussiste l'obbligo di caratterizzazione chimico-fisica, dal momento che "le analisi in parola debbano essere effettuate non in relazione a ciascuna tipologia di rifiuto da sottoporre a procedura semplificata, bensì esclusivamente per le tipologie di rifiuti per le quali gli allegati al D.M. 5 febbraio 1998 e s.m.i. definiscono determinate caratteristiche chimico-fisiche e/o concentrazioni limite di inquinanti che possono essere contenuti nel rifiuto". Resta solo da accertare la valutazione dell'assenza di materiali a potenziale contenuto di amianto. La circolare interpretativa sopra richiamata specifica che in regime di autorizzazione ordinaria l'obbligo della caratterizzazione chimica verrà di volta in volta definito nel singolo provvedimento autorizzatorio rilasciato dall'Autorità amministrativa competente.

Si evidenzia che la caratterizzazione del rifiuto è un onere in capo al produttore del rifiuto. Questi deve essere in grado di indicare al laboratorio incaricato per l'esecuzione delle analisi, gli analiti specifici da ricercare per classificare correttamente il rifiuto.

Al fine di raggiungere il massimo livello di omogeneizzazione è auspicabile che la demolizione dell'opera sia progettata con il criterio della selezione dei materiali/elementi (demolizione selettiva).

### ***Controlli finali sui prodotti***

I controlli finali sono classificabili nelle seguenti categorie:

- controllo della produzione in fabbrica (FPC);
- controllo delle caratteristiche prestazionali e di ecocompatibilità.

Il controllo della produzione in fabbrica è necessario per il requisito di idoneità all'utilizzo dei prodotti inglobati nelle costruzioni stradali e di alcuni materiali costituenti di altri prodotti (es. CLS, CB...). Consente di valutare le prestazioni del processo produttivo e garantire la costanza dei requisiti tecnici dei materiali prodotti.

Il controllo dei requisiti tecnici e prestazionali è previsto per verificare le sostanze componenti ed il loro contenuto percentuale.

Il controllo dei requisiti di ecocompatibilità è necessario per accertare che il rilascio delle sostanze potenzialmente inquinanti presenti nei prodotti sia inferiore al limite prescritto. Deve, pertanto,

essere effettuato il test di cessione ai fini della caratterizzazione dell'eluato, secondo i criteri e le modalità descritte nell'Allegato 3 del D.M. 5 febbraio 1998 e s.m.i.

N.	SIGLA	REQUISITO	NORMA DI RIFERIMENTO	CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI (CM 5205/2005)					IDONEITA' ALL'IMPIEGO (CPD 89/106/CEE - Marcatura CE)				
				FREQUENZA (massima)	AGGREGATI RICICLATI PER IL SETTORE EDILE STRADALE E AMBIENTALE					FREQUENZA (massima)	AGGREGATI PER CLS	AGGREGATI PER CB	AGGREGATI PER OPERE STRADALI
					A LOTTO	C1	C2	C3	C4				
1	d/D	Intervallo granulometrico	UNI EN 933-1	m <sup>3</sup> 3 000	X	X	X	X	X	mensile	UNI EN 12620	UNI EN 13043	UNI EN 13242
2	D <sub>max</sub>	Diametro massimo	UNI EN 933-1	m <sup>3</sup> 3 000	X	X	X	-	-	-	-	-	-
3	-	Rapporto pass. 0,5/0,063	UNI EN 933-1	m <sup>3</sup> 3 000	-	X	X	-	-	-	-	-	-
4	f	Passante allo staccio 0,063	UNI EN 933-1	m <sup>3</sup> 3 000	X	X	X	X	-	mensile	X	X	X
5	SE	Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8	m <sup>3</sup> 3 000	X	X	X	-	-	mensile	X	-	X
6	MB	Valore di blu	UNI EN 933-9	-	-	-	-	-	-	mensile	X	X	X
7	FI	Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	m <sup>3</sup> 3 000	-	X	X	-	-	mensile	X	X	-
8	SI	Indice di forma	UNI EN 933-4	m <sup>3</sup> 3 000	-	X	X	-	-	mensile	-	X	X
9	C	Percentuale di particelle frantumate	UNI EN 933-5	-	-	-	-	-	-	trimestrale	-	-	X
10	LA	Resistenza alla frammentazione (LA)	UNI EN 1097-2/5	m <sup>3</sup> 3 000	-	X	X	-	-	annuale	-	X	X
11	M <sub>DE</sub>	Resistenza all'usura (micro Deval)	UNI EN 1097-1	-	-	-	-	-	-	annuale	-	X	X
12	MV	Massa volumica dei granuli	UNI EN 1097-6/7/8/9	-	-	-	-	-	-	annuale	X	X	-
13	WA	Assorbimento d'acqua	UNI EN 1097-6/7	-	-	-	-	-	-	annuale	X	X	-
14	-	Reattività alcali-silice	UNI 8520/22	-	-	-	-	-	-	iniziale	X	-	-
15	-	Analisi petrografica	UNI EN 932-3	-	-	-	-	-	-	triennale	X	X	-
16	F	Resistenza al gelo/disgelo	UNI EN 1367-1	-	-	-	-	-	-	biennale	X	X	X
17	PSV	Resistenza alla levigazione	UNI EN 1097-8	-	-	-	-	-	-	annuale	-	X	-
18	Cl	Contenuto di ioni cloruro	UNI EN 1744-1/7	-	-	-	-	-	-	biennale	X	-	-
19	CO <sub>2</sub>	Determinazione di carbonato di calcio	UNI 10595-11/8	-	-	-	-	-	-	biennale	X	-	-
20	AS	Solfati solubili in acido	UNI EN 1744-1/12	-	-	-	-	-	-	annuale	X	-	X
21	S	Zolfo totale	UNI EN 1744-1/11	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
22	-	Contenuto sostanza umica	UNI EN 1744-1/15	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
23	m <sub>PC</sub>	Sostanze organiche leggere	UNI EN 1744-1/14	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
24	-	TEST DI CESSIONE	DM 5/02/1998 (All.3)	m <sup>3</sup> 3 000	X	X	X	X	X	annuale	-	-	-

(\*) in determinate condizioni le norme prevedono la possibilità di diminuire le frequenze riportate

Figura 92: Requisiti e caratteristiche per l'idoneità all'impiego del materiale.

## B: Norme tecniche per la produzione dei materiali riciclati e posa nella costruzione e manutenzione di opere edili, stradali e recuperi ambientali

### Prodotti riciclati e lavorazioni

Nel caso specifico di applicazioni stradali, i prodotti riciclati possono essere utilizzati per l'esecuzione dei lavori di nuova costruzione e di manutenzione dei seguenti tipi di strade: extraurbane (principali e secondarie), urbane (di scorrimento e di quartiere), interpoderali, agricole, forestali, piste ciclabili e residenziali.

Il documento fornisce una classificazione dei prodotti (legati, non legati e stabilizzazioni in situ) e delle lavorazioni specifiche.

### Corpo stradale

Per ogni elemento costruttivo, si specifica lo strato nel quale può essere utilizzato il materiale riciclato.

### Attività di demolizione

Qualora per la realizzazione o manutenzione di una costruzione siano necessari interventi di demolizione edile e/o stradale, il progettista incaricato deve procedere con l'individuazione

preliminare dei tipi di rifiuto prodotto (demolizione selettiva), al fine di recuperare la maggiore quantità di rifiuti destinati agli impianti di trattamento e ridurre i rifiuti da smaltire in discarica.

I materiali risultanti dall'esecuzione di un'opera e non riutilizzati direttamente in cantiere (esempio: materiale proveniente dallo scavo per la posa di sottoservizi) devono essere gestiti, trattati e contabilizzati come rifiuti da costruzione e demolizione, indipendentemente dall'origine del materiale, naturale o riciclato, utilizzato per la costruzione dell'opera.

Quindi, come i materiali naturali, anche i rifiuti ottenuti dai lavori di costruzione e demolizione di opere edili e/o stradali realizzate con materiali riciclati, provenienti da un precedente trattamento di rifiuti, devono essere considerati ancora recuperabili e sottoposti ad un nuovo ciclo di recupero, trattamento e riutilizzo.

### ***Prodotti riciclati non legati***

Viene indicato un elenco dei prodotti riciclati non legati con codice identificativo e D max.

I requisiti di accettazione degli aggregati lapidei riciclati impiegati nelle costruzioni devono essere conformi alle seguenti prescrizioni:

- UNI EN ISO 14688-1 (Identificazione e classificazione delle terre);
- UNI EN 13285 (Miscele non legate – specifiche);
- Allegato ZA della Norma armonizzata UNI EN 13242 (Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade);
- d.m. 11 aprile 2007 (Applicazione della Direttiva n. 89/106/CEE sui prodotti da costruzione, recepita con decreto del Presidente della Repubblica 21 aprile 1993, n.246, relativa all'individuazione dei prodotti e dei relativi metodi di controllo della conformità di aggregati);
- Circolare Ministero Ambiente del 15 luglio 2005, n. 5205;
- d.m. 5 febbraio 1998.

### ***Corpo del rilevato***

L'aggregato misto granulare riciclato non legato impiegato nella costruzione del corpo di un rilevato è composto da aggregati ottenuti mediante recupero dei rifiuti non pericolosi eventualmente addizionati con materiali naturali.

Si definiscono, quindi, i requisiti geometrici (Norma UNI EN 13242), la composizione granulometrica, i requisiti fisici, i componenti del materiale riciclato, i requisiti geotecnici, le caratteristiche del corpo del rilevato realizzato con materiale riciclato.

Il produttore deve effettuare la verifica di rilascio di eventuali sostanze (test di cessione) secondo le Norme UNI 10802 (Appendice A) e UNI EN 12457-2. I valori riscontrati per i parametri di riferimento devono essere conformi all'Allegato 3 del d.m. 5 febbraio 1998 s.m.i..

Queste indicazioni sono fornite anche per:

- Sottofondo stradale;
- Fondazione stradale;
- Riempimenti e colmate;
- Strati accessori.
-

### **Prodotti riciclati legati**

Il documento riporta un elenco dei prodotti riciclati legati, specificando il tipo di legante e l'impiego possibile.

Le norme per l'accettazione delle miscele sono:

- UNI EN 14227-1 "Miscele legate con cemento per fondi e sottofondi stradali" (misti cementati).
- UNI EN 14227-5 "Miscele legate con legante idraulico per strade".

Gli aggregati lapidei riciclati utilizzati per la produzione dei materiali legati specificati nel presente capitolo devono provenire da impianti per la produzione di materie prime secondarie per l'edilizia, regolarmente autorizzati in conformità alla normativa vigente (d.lgs 3 aprile 2006, n.152).

Si considerano i seguenti prodotti riciclati legati:

- Misto granulare riciclato legato con cemento (misto cementato);
- Misto granulare riciclato legato con cemento e bitume schiumato (o emulsione);
- Conglomerato bituminoso riciclato a freddo.

Per queste tipologie si specificano:

- utilizzi;
- norma UNI a cui il prodotto deve conformarsi;
- prescrizioni sugli aggregati;
- requisiti degli aggregati.

### **Opere di stabilizzazione**

Sono descritte le specifiche di lavorazione *in situ* delle opere di stabilizzazione dei sottofondi stradali esistenti.

Gli aggregati riciclati eventualmente utilizzati ad integrazione dei terreni esistenti devono avere specifici requisiti e provenire da impianti per la produzione di materie prime secondarie per l'edilizia, regolarmente autorizzati in conformità alla normativa vigente (d.lgs. 3 aprile 2006 n.152 e smi).

I requisiti di accettazione degli aggregati, sia riciclati che naturali, impiegati per la correzione delle caratteristiche dei terreni, qualora non specificato diversamente, devono essere conformi alle seguenti prescrizioni:

- Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106 CEE;
- Allegato ZA della Norma armonizzata UNI EN 13242 "Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade".

Per quanto riguarda l'idoneità all'impiego dei materiali è previsto che gli aggregati siano prodotti in conformità alla Direttiva Prodotti da Costruzione con sistema di attestazione 2+ (Certificazione di un Organismo Notificato).

### **Controlli**

La qualifica ed accettazione dei materiali deve essere conforme ai requisiti di idoneità ai sensi della Direttiva Prodotti da Costruzione (Marcatura CE) ed ai requisiti specificati indicati nelle Norme tecniche relativi alle caratteristiche geometriche, fisiche, compositive e di ecocompatibilità.

Il controllo delle caratteristiche delle opere eseguite con i prodotti riciclati non legati deve essere effettuato mediante prove di laboratorio sui materiali forniti e sulle lavorazioni.

Si devono effettuare controlli periodici sull'aggregato misto e granulare (riciclato e di integrazione). Il prelievo deve avvenire nell'impianto di trattamento o nel cantiere di posa. I requisiti da controllare sono le caratteristiche geometriche, fisiche e chimiche. La frequenza è richiesta dalla DL o in caso di prolungate interruzioni nella fornitura di aggregati.

### ***Allegati***

In Allegato al documento si trovano le schede tecniche dei materiali riciclati non legati, legati e delle opere di stabilizzazione.

Per i materiali riciclati legati e non, ogni scheda riporta la designazione del prodotto, i riferimenti normativi di accettazione ed i requisiti che ne definiscono le caratteristiche tecniche, prestazionali e ambientali.

Per le opere di stabilizzazione dei sottofondi stradali ogni scheda riporta la designazione della lavorazione, i riferimenti normativi di accettazione ed i requisiti che ne definiscono le caratteristiche tecniche e ambientali dei materiali costituenti e le prestazioni dei prodotti.

- **Portogallo**

*“Guidelines to Improve Construction and Demolition Waste Management in Portugal”, 2010.*

Il documento “Linee guida per migliorare la gestione dei rifiuti da C&D in Portogallo, 2010” contiene una serie di azioni strategiche da adottare nelle varie fasi di progettazione ed esecuzione dei lavori volte a ridurre la produzione di rifiuti ed a incrementarne il recupero.

#### **Fase di progettazione**

Si propongono alcune azioni chiave da intraprendere durante la fase di progettazione:

- progettare in modo da favorire il recupero/riuso dei materiali e/o dell'intero edificio;
- progettare per ottimizzare l'utilizzo di materiali in modo da ridurre gli scarti;
- progettare per favorire la demolizione selettiva dell'edificio;
- progettare in modo da favorire l'utilizzo di materiali riciclabili, riciclati e riutilizzabili.

#### **Fase di costruzione**

In fase di costruzione è possibile evitare la produzione di quantità notevoli di rifiuti attraverso alcune di queste azioni:

- utilizzo di materiali prefabbricati aventi dimensioni corrette in modo da ridurre gli scarti;
- ridurre la produzione di imballaggi attraverso la riconsegna degli stessi ai fornitori o richiedere la fornitura di imballaggi riciclabili;
- separazione dei rifiuti su base merceologica (legno, metalli, plastica, aggregati, ecc.);
- stoccaggio dei rifiuti in aree coperte e protette.

#### **Tecniche di demolizione**

Il documento propone due metodologie differenti per favorire il recupero di materiale e ridurre la produzione di rifiuti:

- decostruzione dell'edificio: demolizione selettiva in ordine inverso rispetto alla costruzione dell'edificio, solitamente eseguita a mano;
- salvataggio selettivo prima della demolizione: rimozione dei materiali riutilizzabili prima della demolizione tradizionale dell'edificio.

- **Germania** - European Commission, Resource Efficient Use of Mixed Wastes.

*“Construction and Demolition Waste management in Germany “, 2015.*

L'iniziativa "Kreislaufwirtschaft Bau" (Economia circolare nell'edilizia) documenta la produzione e il trattamento di rifiuti inerti a partire dal 1995 e definisce cinque categorie principali di rifiuti C&D:

- Rifiuti edili da demolizione;
- Rifiuti da opere stradali;
- Terreno e pietre;
- Rifiuti edili a base di gesso;
- Rifiuti edili da costruzione.

Category	LoW code	Description
Demolition waste	17 01 01	Concrete
	17 01 02	Bricks
	17 01 03	Tiles and ceramics
	17 01 07	Mixtures of concrete, bricks, tiles and ceramics other than those mentioned in 17 01 06
Road construction waste	17 03 02	Bituminous mixtures other than those mentioned in 17 03 01
Soil and stones	17 05 04	Soil and stones other than those mentioned in 17 05 03
	17 05 06	Dredging spoil other than those mentioned in 17 05 05
	17 05 08	Track ballast other than those mentioned in 17 05 07
Construction waste on gypsum-base	17 08 02	Gypsum-based construction materials other than those mentioned in 17 08 01
Construction waste	17 02 01	Wood
	17 02 02	Glass
	17 02 03	Plastic
	17 04	Metals (including their alloys)
	17 06 04	Insulation materials other than those mentioned in 17 06 01 and 17 06 03
	17 09 04	Mixed construction and demolition wastes other than those mentioned in 17 09 01, 17 09 02 and 17 09 03

*Figura 93: Tipologie di rifiuti da C&D.*

Il Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG del 24 Febbraio 2012), ovvero la legge tedesca che promuove l'economia circolare e mira a garantire la corretta gestione dei rifiuti in Germania, attua la Direttiva 2008/98/CE nel diritto tedesco sostituendo la precedente legge sui rifiuti. L'obiettivo principale è quello di preservare le risorse naturali e proteggere l'uomo e l'ambiente dalle possibili ricadute dovute alla produzione e alla cattiva gestione dei rifiuti C&D, conferendo allo smaltimento carattere eccezionale.

I livelli istituzionali coinvolti nella gestione dei rifiuti in Germania sono differenti e non vi è esclusiva competenza della Federazione. In particolare, la gestione rientra tra le materie soggette a legislazione concorrente in cui la competenza legislativa spetta ai Länder. È compito, infatti, dei singoli Stati federali (Länder) l'elaborazione, per le proprie aree di responsabilità, dei relativi piani di gestione dei rifiuti C&D conformemente alle prospettive sovraregionali. Tali piani comprendono:

1. gli obiettivi per la prevenzione e il recupero dei rifiuti, quali la preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio;
2. la situazione esistente nella gestione dei rifiuti;
3. le attività necessarie per migliorare il recupero e lo smaltimento dei rifiuti, compresa una valutazione di attitudine al raggiungimento degli obiettivi prefissati;
4. la definizione degli impianti di trattamento dei rifiuti.

Il Laendersarbeitsgemeinschaft Abfall "LAGA" (il comitato di lavoro della Conferenza dei Ministri dell'Ambiente, il cui obiettivo è quello di garantire un'attuazione uniforme della legislazione sui rifiuti nella Repubblica Federale tedesca) stabilisce regole precise alle quali il materiale riciclato deve conformarsi al fine di poter essere riutilizzato.

Esso prevede che ogni partita di materiale venga ispezionata e certificata da un ente terzo che ne confermi la qualità per l'applicazione nel settore stradale, per la produzione di calcestruzzo o altre applicazioni geotecniche. Tali certificazioni vengono eseguite dall'Istituto Tedesco per la Garanzia della Qualità e l'Etichettatura (RAL), a verifica che il materiale sia conforme agli standard previsti dal LAGA o dal DIN (Istituto Tedesco per la Normalizzazione) per l'impiego in una particolare classe di applicazioni. In questo modo le aziende hanno la possibilità vendere i materiali recuperati come equivalenti ai prodotti naturali.

All'interno del documento viene anche specificata, attraverso schede tecniche dettagliate per ogni singolo materiale componente il rifiuto C&D da recuperare (calcestruzzo, mattoni, legno, metalli, plastica, piastrelle, materiale da escavazione, amianto), la descrizione delle:

- caratteristiche ed origine del materiale;
- metodi e tecnologie per la selezione e la raccolta (ad esempio attraverso un'attenta procedura di demolizione selettiva seguita da fasi di trattamento adeguate);
- processi di recupero e trattamenti a cui il materiale deve essere sottoposto;
- destinazioni d'uso ed applicazione dell'aggregato riciclato ottenuto,
- costi di mercato;
- modalità di smaltimento.

- **Regno Unito** - European Commission, Resource Efficient Use of Mixed Wastes.

*“Construction and Demolition Waste management in United Kingdom”, 2016.*

Nel Regno Unito, i piani di gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione sono sviluppati da ciascuno degli organismi governativi presenti in Inghilterra, Galles, Scozia e Irlanda del Nord. A livello quantitativo, nel 2012 sono state prodotte nel Regno Unito circa 44,5 milioni di tonnellate di rifiuti C&D non pericolosi, di cui l'86,5% è stato recuperato. Tuttavia, per il riciclo di tali materiali vi sono ancora diversi ostacoli, tra i quali:

- permessi ambientali;
- difficoltà ad identificare alcune componenti come pericolose o non;
- problemi di sicurezza e di salute nel riuso di alcuni rifiuti;
- costi di trasporto.

Al fine di sopperire a tali ostacoli sono state introdotte specifiche strategie, quali:

- programmi governativi volti a ridurre i conferimenti in discarica e ad incentivare il riciclaggio con target per il recupero;
- protocolli di qualità per rifiuti inerti, al fine di consentire un maggior utilizzo degli aggregati riciclati da essi ottenuti;
- tassazione sull'escavazione degli aggregati naturali al fine di rendere competitivi quelli riciclati;
- obbligo di separazione delle frazioni in situ o in strutture dedicate;
- obbligo di raccolta e gestione separata dei rifiuti da C&D pericolosi.

Si evidenzia, inoltre, che nel 2011 il Regno Unito ha stabilito i criteri “End of Waste”, all'interno dei quali viene specificato come, al fine di attestare la qualifica di “cessato rifiuto”, sia necessario soddisfare determinati requisiti stabiliti dal Protocollo di Qualità.

Tale Protocollo identifica le tipologie di rifiuto e tutti i processi atti a individuare l'iter per il loro recupero, ponendo in essere un vero e proprio protocollo End of Waste.

Questo perché l'incertezza circa il punto in cui il rifiuto sia integralmente recuperato e cessa di essere considerato rifiuto, secondo la definizione dell'Art. 3 della Direttiva 2008/98/CE ha impedito negli anni lo sviluppo e la commercializzazione di materiali prodotti dai rifiuti, in particolare degli aggregati riciclati. Pertanto, il rispetto di detti criteri viene considerato sufficiente per garantire che il prodotto interamente recuperato possa essere impiegato senza pregiudizio e senza la necessità di controlli di gestione dei rifiuti.

## ❖ *Protocollo di Qualità*

### *“End of waste criteria for the production of aggregates from inert waste”*

Il presente Protocollo di Qualità è stato elaborato dall'Agenzia Ambientale e dal WRAP (Waste & Resources Action Programme, “Programma di azione Risorse & Rifiuti”) in consultazione con:

- DEFRA, il Dipartimento per l'ambiente del Regno Unito;
- Governo del Galles;
- esponenti del settore;
- altri soggetti coinvolti, ivi compresa l’Agenzia per Ambiente dell'Irlanda del Nord (NIEA - Northern Ireland Environment Agency).

Il Protocollo trova diretta applicazione in Inghilterra, Galles e Irlanda del Nord e stabilisce i criteri "End-of-Waste" per la produzione e l'utilizzo di aggregati riciclati ottenuti dal trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione.

Gli obiettivi principali del Protocollo sono:

- chiarire quando i controlli sulla gestione dei rifiuti non sono più necessari;
- garantire agli utenti la certezza che l’aggregato riciclato è conforme agli standard europei;
- garantire agli utenti la certezza che l’aggregato sia adatto all’utilizzo nei diversi settori di mercato, conformandosi agli specifici standard di settore;
- proteggere la salute umana e prevenire l’inquinamento dell’ambiente (ivi compreso l’inquinamento del suolo).

Secondo questo documento, l'aggregato acquisirà qualifica di “cessato rifiuto”, e non sarà quindi più soggetto a controlli di gestione dei rifiuti, a condizione che:

- sia conforme ai requisiti delle norme europee per l'utilizzo a cui è destinato;
- sia prodotto secondo il controllo di produzione in fabbrica, come richiesto dalla norma europea;
- sia conforme ai requisiti di marcatura CE.

I rifiuti da costruzione e demolizione per la produzione di aggregati riciclati sono definiti dai codici EER 170101, 170102, 170103, 170107, 170202, 170301, 170302, 170504, 170506, 170508 e 170904.

L’aggregato potrà essere destinato all'utilizzo in applicazioni legate o non legate per opere di ingegneria civile ed edile, nel rispetto delle specifiche norme di settore quali BS EN 13242, BS EN 13043, BS EN 12620, BS EN 13108-8. In particolare per:

- applicazioni non legate quali: sottofondi, riempimenti ed opere di drenaggio;
- applicazioni legate quali: calcestruzzo e conglomerati bituminosi.

Tutte le applicazioni degli aggregati riciclati devono rispettare le raccomandazioni dell'Esecutivo Salute e Sicurezza (HSE) attraverso l'utilizzo di protezioni personali appropriate (DPI) e misure di soppressione della polvere.

La movimentazione manuale degli aggregati dovrà, inoltre, essere ridotta al minimo attraverso l'utilizzo di ausili meccanici laddove possibile.

Vengono qui definite le principali fasi e i principali meccanismi di controllo stabiliti dal Protocollo.

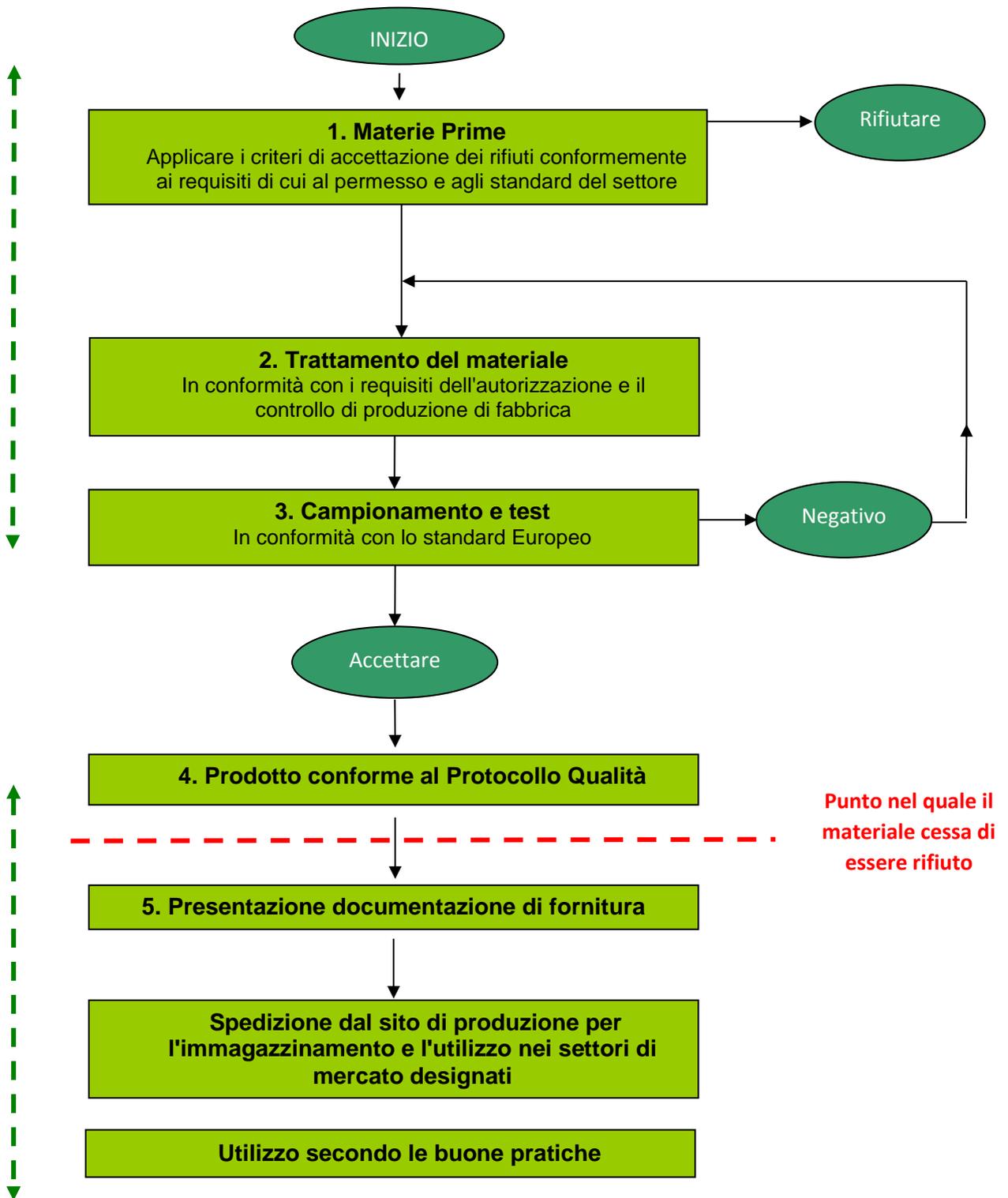


Figura 94: Fasi e procedure di controllo stabilite dal Protocollo di Qualità.

Tornando ai documenti emanati dal Regno Unito, è interessante notare come l'approccio alla gestione dei rifiuti da C&D vari in tutto lo stato attraverso l'adozione di differenti obiettivi e targets, ovvero:

- Inghilterra, Nord Irlanda, Scozia: almeno il 70% dei rifiuti prodotti deve essere conferito a recupero entro 2020;
- Galles: almeno il 90% dei rifiuti prodotti deve essere preparato per il riuso, riciclo o recupero entro il 2019/2020; la produzione di rifiuti da C&D deve essere ridotta dell' 1,4% ogni anno;

A livello regionale, Londra ha invece introdotto il target di superamento del 95% di recupero dei rifiuti da costruzione, demolizione ed escavazione entro 2020.

Oltre a questi, esistono altri target di settore quali, ad esempio, quelli definiti dal gruppo UK Contractors Group che fissano i seguenti obiettivi per i propri membri:

- raggiungere lo 0% di rifiuti smaltiti entro 2020;
- dimezzare la produzione di rifiuti C&D entro 2020.

Per quanto riguarda il confezionamento del calcestruzzo, la British Precast Federation, ha disposto un incremento della frazione di aggregati riciclati all'interno della miscela, dal 21% al 25%.

## B) ESPERIENZE BIBLIOGRAFICHE SUL RECUPERO NEL CALCESTRUZZO

- **COPPOLA, SAVERIA MONOSI, STEFANO SANDRI, ANTONIO BORSOI, Riciclaggio delle strutture di c.a. e c.a.p. demolite per il confezionamento di nuovi calcestruzzi, Italia, 1995.**

Gli autori hanno analizzato in una prima fase le proprietà chimico-fisiche degli aggregati ottenuti dal processo di riciclaggio degli scarti provenienti dalle demolizioni strutturali ed in seconda fase le proprietà meccaniche del calcestruzzo ottenuto con tali aggregati riciclati (sia allo stato fresco che indurito).

La massa volumica degli aggregati dipende dalle porosità che caratterizzano il materiale. A seguito del processo di frantumazione, l'aggregato riciclato si presenta in forma di elementi lapidei avvolti da uno strato più o meno spesso di pasta di cemento.

Essendo la porosità della malta maggiore di quella degli elementi lapidei, ne consegue che la massa volumica dell'inerte riciclato risulta, nella totalità dei casi, sempre inferiore a quella dell'aggregato naturale.

Questa diminuzione è confermata anche dalla minore dimensione e pezzatura dell'aggregato riciclato.

Rapporto acqua/cemento dei calcestruzzi originali	Pezzatura dell'aggregato riciclato [mm]	Massa volumica dell'inerte riciclato [Kg/m <sup>3</sup> ]
0,4	4-8	2340
	8-16	2450
	16-32	2490
0,7	4-8	2350
	8-16	2440
	16-32	2480
1,2	4-8	2340
	8-16	2420
	16-32	2490

*Tabella 73: Massa volumica dell'aggregato riciclato in funzione di pezzatura e del rapporto w/c.*

La presenza della malta aderente agli elementi lapidei naturali determina per gli aggregati riciclati un assorbimento di acqua di gran lunga superiore rispetto a quello degli inerti naturali. L'assorbimento della frazione grossolana, infatti, varia tra il 4% e il 9% circa per pezzature comprese tra 4 e 32 mm e sembra essere indipendente dalla qualità del calcestruzzo di origine. Per l'aggregato naturale i valori di assorbimento si attestano tra 0,5% e 2,5% mentre per la frazione fine può raggiungere valori dell'ordine del 12% per la maggior porosità che contraddistingue le pezzature più piccole degli aggregati riciclati.

È, inoltre, possibile trovare una correlazione tra massa volumica e assorbimento d'acqua, come mostrato nel grafico sottostante.

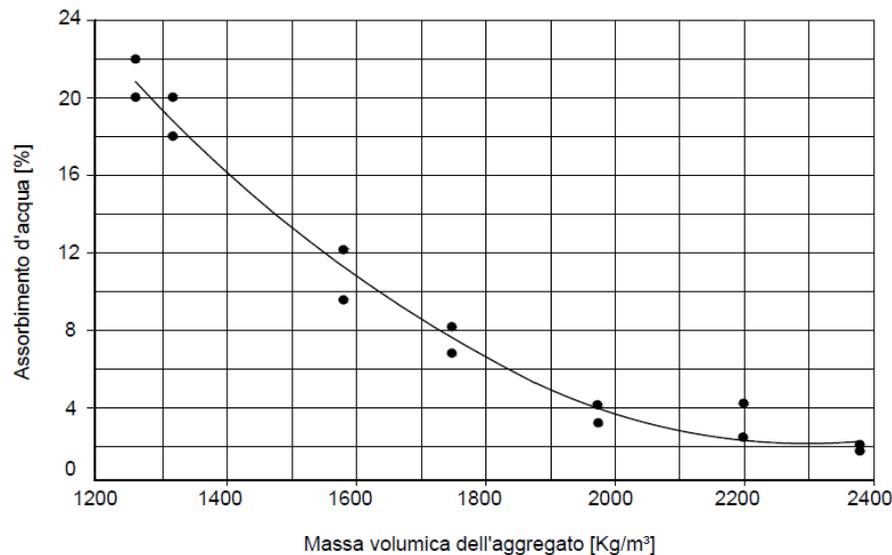


Figura 96: Assorbimento d'acqua in funzione della massa volumica dell'aggregato riciclato.

L'assorbimento elevato di acqua dell'aggregato e il controllo iniziale dell'acqua d'impasto possono determinare un'eccessiva perdita di lavorabilità del calcestruzzo finale durante il trasporto e soprattutto sotto la pressione esercitata sul conglomerato durante il pompaggio. Se si vogliono evitare questi inconvenienti è indispensabile provvedere ad una presaturazione degli aggregati mediante bagnatura. Dopodiché è opportuno lasciare drenare l'acqua in eccesso per 2-3 ore prima del confezionamento del calcestruzzo.

Gli autori hanno anche messo in evidenza un problema di particolare interesse nella produzione di questi aggregati riciclati riguardante la decontaminazione da sostanze pericolose presenti nelle macerie che potrebbero risultare deleterie per la durabilità del calcestruzzo confezionato. Le sostanze che possono contaminarli appartengono anch'esse a materiali da costruzione che assieme al calcestruzzo vengono impiegati per il completamento del manufatto e per la realizzazione delle finiture. Esse includono le malte di calce e gesso (impiegate come intonaco o come giunti tra i mattoni), l'asfalto, il vetro e l'alluminio (impiegati per la realizzazione degli infissi), materiali organici, piastrelle, laterizi, materiale refrattario, cloruri ecc. La presenza di queste sostanze comporta generalmente una perdita di resistenza meccanica del calcestruzzo. La Tabella 74 mostra la percentuale di varie sostanze indesiderabili che provocano un abbattimento della resistenza meccanica a compressione del 15% rispetto a quella del calcestruzzo confezionato con aggregati privi di impurità.

Impurità	Calce	Terriccio	Legno	Gesso	Bitume	Pittura
Percentuale in volume	7	5	4	3	2	0,2

Tabella 74: Volume % di diverse impurità che provocano un decremento del 15% di resistenza.

Anche la presenza di bitume può penalizzare fortemente la resistenza meccanica a compressione, tanto che con un quantitativo pari al 30% del volume si possono avere abbattimenti di resistenza fino al 30%.

I solfati rappresentano, altresì, sostanze notoriamente pericolose per l'impasto in quanto possono reagire con gli alluminati idrati prodotti dall'idratazione del cemento, determinando così espansioni distruttive per il conglomerato associate alla formazione di ettringite e thaumasite. Per tale motivo il contenuto di solfato negli elementi lapidei naturali destinati al confezionamento del calcestruzzo viene limitato allo 0,2% rispetto alla massa dell'aggregato. Lo stesso può valere per un eccesso di cloruri perché possono innescare la corrosione delle armature annegate nel conglomerato finale. Essendo i cloruri sali molto solubili, succede che dopo la miscelazione degli ingredienti si trovano immediatamente disciolti nella fase acquosa. Pertanto, risulta più corretto stabilire un contenuto massimo di cloruro ammissibile, pari a:

- Cl < 1%: cls non armati
- Cl < 0,4%: strutture in c.a.
- Cl < 0,2%: strutture in c.a.p.

Gli autori hanno, quindi, analizzato le diverse caratteristiche meccaniche del calcestruzzo "riciclato" sia allo stato fresco che allo stato indurito.

- **Calcestruzzo con aggregati riciclati allo stato fresco**

La presenza della malta originale che avvolge gli elementi lapidei dell'aggregato riciclato e la tessitura ruvida della superficie del materiale stesso determinano una maggior richiesta d'acqua per confezionare un calcestruzzo "riciclato" di pari consistenza ad un conglomerato realizzato con elementi lapidei naturali. Questo aumento di acqua per l'impasto si attesta mediamente intorno al 5% per calcestruzzi realizzati con solo la frazione grossolana riciclata, mentre un incremento maggiore di circa il 15% si registra quando il conglomerato viene realizzato sia con aggregati grossi che con sabbie riciclate.

<b>Calcestruzzo fresco con:</b>	<b>Aggiunta d'acqua per avere lo stesso slump del cls originario [l/m3]</b>	<b>Richiesta d'acqua aggiuntiva (variazione %)</b>
Aggregato grosso e sabbia riciclati	25-35	15
Aggregato grosso riciclato e sabbia naturale	8-12	5

*Tabella 75: Variazione della richiesta di acqua per cls con o senza frazione fine riciclata.*

Oltre ad una maggiore richiesta d'acqua rispetto ai calcestruzzi con inerti naturali, i calcestruzzi "riciclati" sono caratterizzati da una più rapida perdita di lavorabilità. Non è da escludere che il precoce "irrigidimento" dell'impasto sia da imputare ad un aumento del materiale fine nell'impasto durante il processo di mescolamento a causa della disgregazione di parte della malta originaria che avvolge gli inerti riciclati. Questa perdita di lavorabilità determina per il calcestruzzo tempi di inizio e fine presa più brevi rispetto a quelli del calcestruzzo tradizionale di riferimento. Questo effetto può essere eliminato sottoponendo gli inerti di riciclo ad una presaturazione con acqua, ovvero 15-30 minuti di bagnatura che sono sufficienti per saturare gli aggregati anche con elevati valori di assorbimento.

Altra particolarità dei calcestruzzi "riciclati" è la maggiore tendenza alla segregazione ed al

bleeding (risalita in superficie, durante il costipamento del calcestruzzo, di una parte dell'acqua di impasto con la formazione di uno strato d'acqua e cemento sulla superficie del conglomerato). Questa maggior attitudine all'essudazione determina il rischio che le superfici non protette possano fessurarsi per il ritiro plastico. Le fessure, tuttavia, possono essere opportunamente controllate introducendo nell'impasto fibre polimeriche. Occorre tener presente che l'impiego di queste fibre determina sia un aumento di costo del conglomerato che una leggera perdita di lavorabilità quantificabile in 4-6 cm di abbassamento al cono di Abrams.

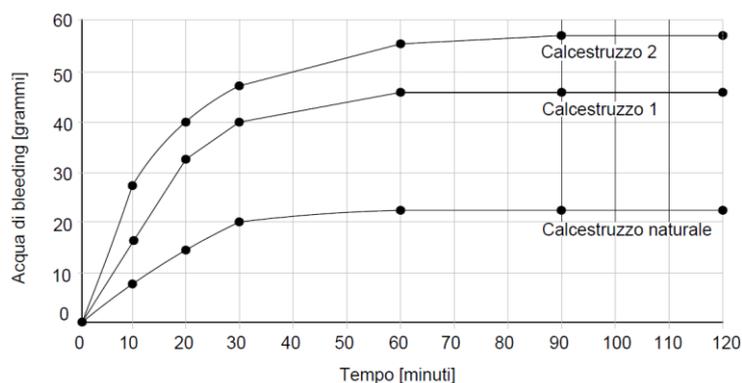


Figura 97: Acqua di bleeding in funzione del tempo per calcestruzzi naturali e riciclati, volume impasto 20 litri. (Cl 1= 50% inerte grosso riciclato + 50% grosso naturale; Cl 2= 100% inerte grosso riciclato).

- **Calcestruzzo con aggregati riciclati allo stato indurito**

In linea generale, a causa della maggior porosità, della minore massa volumica e quindi di una minore resistenza meccanica degli aggregati riciclati rispetto quelli naturali, le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi riciclati risultano più basse di quelle dei conglomerati tradizionali. Inoltre, a causa di una minore rigidità dell'AR, i calcestruzzi confezionati con questo materiale possiedono anche un più basso modulo di elasticità.

La loro resistenza meccanica a compressione dipende dal rapporto acqua/cemento dell'impasto, dalla resistenza meccanica del conglomerato da cui provengono gli aggregati riciclati e dalla quantità di aggregato fine riciclato presente nel calcestruzzo.

In presenza di solo aggregato riciclato la resistenza del calcestruzzo dipende fortemente dalla relazione tra il rapporto a/c del conglomerato con aggregati riciclati e quello del calcestruzzo originale (tradizionale). Se il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo tradizionale è uguale o più basso di quello sperimentale allora la resistenza meccanica a compressione di quest'ultimo è uguale o maggiore di quello originale confezionato con inerti lapidei naturali.

Tipo di aggregato	Resistenza a compressione del calcestruzzo [N/mm <sup>2</sup> ] con a/c:		
	0,4	0,6	0,8
Lapideo naturale	68,2	31,2	16,7
Grosso riciclato da cls con a/c pari a:			
0,4	65,4	31,8	16,9
0,6	53,1	31,8	16,6
0,8	37,3	24,3	15,3

Tabella 76: Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi riciclati (aggregato grosso riciclato e fine naturale).

I dati riportati nella Tabella 76 mettono in evidenza che quando il calcestruzzo riciclato viene confezionato con un basso rapporto acqua/cemento (ad esempio 0,4), impiegando aggregati riciclati scadenti provenienti dalla demolizione di conglomerati con elevati rapporti a/c (ad esempio 0,8) la resistenza a compressione pari a 37,3 N/mm<sup>2</sup> subisce un notevole decremento di circa il 40% rispetto alla resistenza del calcestruzzo di pari rapporto a/c ma confezionato con aggregati lapidei naturali (68,2 N/mm<sup>2</sup>). I dati mettono così in evidenza che:

- quando la resistenza a compressione del calcestruzzo originale è uguale o superiore a quella del calcestruzzo riciclato l'elemento debole della catena in corrispondenza del quale si innesca la rottura del conglomerato è rappresentato dall'interfaccia tra la nuova e la vecchia pasta di cemento;
- quando la resistenza a compressione del calcestruzzo originale è inferiore a quella della nuova pasta di cemento la rottura è controllata dalla resistenza della vecchia pasta di cemento e dalle proprietà dell'interfaccia tra la vecchia pasta e l'aggregato originale:

a/c calcestruzzo riciclato <	a/c calcestruzzo originale	Elemento debole della catena: interfaccia tra pasta nuova e vecchia di cemento
a/c calcestruzzo riciclato >	a/c calcestruzzo originale	Elemento debole della catena: interfaccia tra vecchia pasta di cemento e aggregato lapideo originale

Le considerazioni emerse per i calcestruzzi confezionati con la sola frazione grossolana riciclata non possono essere estese ai calcestruzzi con entrambi gli aggregati (fine e grossolano) riciclati. Questo perché l'impiego dell'aggregato fine riciclato determina sempre un abbattimento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo rispetto al conglomerato confezionato con inerti lapidei naturali. Questa diminuzione la si può notare dalla Tabella sottostante:

Tipo di aggregato	Resistenza a compressione del calcestruzzo [N/mm <sup>2</sup> ] con a/c:		
	0,4	0,6	0,8
Lapideo naturale	63,2	31,2	16,7
Grosso e fine riciclato da cls con a/c pari a:			
0,4	57,9	20,1	8,3
0,6	51,5	21,3	9,1
0,8	43,8	20,0	8,4

Tabella 77: Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi riciclati (aggregato grosso e fine entrambi riciclati).

I dati riportati evidenziano che la diminuzione della resistenza a compressione è mediamente del 35% rispetto al valore che si ottiene per conglomerati tradizionali. L'abbattimento della resistenza conseguente all'impiego di aggregato fine riciclato, può essere attenuato sostituendo parte di questa frazione fine con aggregato naturale di frantumazione, ovvero il 50% di aggregato frantumato naturale in sostituzione di quello fine riciclato. Questo consente di smorzare la diminuzione di resistenza dal 50% al 30%.

Per quanto riguarda, invece, il modulo elastico, il calcestruzzo può considerarsi con buona approssimazione un materiale il quale il cui modulo elastico risulta essere una media ponderale dei moduli elastici degli elementi che lo compongono, ovvero:

$$E_{cls} = E_{pc} \cdot x + E_{ag} (1-x)$$

dove  $E_{cls}$ ,  $E_{pc}$ ,  $E_{ag}$  rappresentano i moduli elastici del calcestruzzo, della pasta di cemento e dell'aggregato, mentre  $x$  è la frazione in volume di pasta cementizia e  $(1-x)$  di quella dell'aggregato. Questa considerazione è ritenuta, dagli autori, estendibile anche all'aggregato riciclato in quanto materiale composito costituito dall'aggregato lapideo naturale originale avvolto dalla pasta di cemento del calcestruzzo originale, con modulo elastico così calcolabile:

$$E_{agr} = E_{pco} \cdot x + E_{ago} (1-y)$$

dove  $E_{agr}$  rappresenta il modulo elastico dell'aggregato riciclato e  $E_{pco}$  quello della pasta di cemento originale che avvolge l'elemento lapideo naturale con modulo elastico  $E_{ago}$ , mentre  $y$  è la frazione di pasta di cemento originale nell'aggregato riciclato e  $(1-y)$  quella dell'aggregato lapideo naturale. Ovviamente in assenza di pasta di cemento originale ( $y=0$ ), il modulo elastico dell'aggregato riciclato coincide con quello dell'inerte naturale. Essendo la pasta di cemento di gran lunga meno rigida rispetto all'elemento lapideo naturale, ne consegue che il modulo di elasticità dell'aggregato riciclato sarà inferiore a quello dell'aggregato naturale ed in particolar modo sempre più basso quanto minore è la pezzatura dell'aggregato stesso (per la maggior presenza di pasta di cemento che lo avvolge). Questa minore rigidità di  $E_{agr}$  rispetto ad  $E_{ago}$  giustifica, quindi, la diminuzione complessiva di rigidità del calcestruzzo riciclato finale rispetto a quello tradizionale.

Sono state proposte alcune correlazioni empiriche tra il modulo di elasticità e resistenza meccanica a compressione per i calcestruzzi sia riciclati che naturali:

$$E_{cls} = 5,31 \cdot R_c^{1/2} + 5,83 \quad \text{per i calcestruzzi naturali}$$

$$E_{cls} = 3,48 \cdot R_c^{1/2} + 13,05 \quad \text{per i calcestruzzi con aggregato grossolano riciclato}$$

$$E_{cls} = 3,02 \cdot R_c^{1/2} + 10,67 \quad \text{per i calcestruzzi con aggregato fine e grossolano riciclato}$$

Nella Tabella 78 sono stati riportati i valori del modulo elastico ottenuto con le formule sopra esposte per calcestruzzi con classi di resistenza  $R_c$  variabili da 25 a 50 N/mm<sup>2</sup>.

Rc [N/mm <sup>2</sup> ]	Modulo elastico del calcestruzzo con aggregato:		
	Naturale	Riciclato	
		<i>grossolano</i>	<i>fine e grossolano</i>
25	32,4	30,5	25,8
30	34,9	32,1	27,2
35	37,2	33,6	28,5
40	39,4	35,1	29,8
45	41,5	36,4	30,9
50	43,4	37,7	32,0

Tabella 78: Modulo di elasticità per calcestruzzi naturali e riciclati.

Come si può notare, i valori del modulo di elasticità del calcestruzzo con solo aggregato grosso riciclato sono inferiori, mediamente del 10%, a quelli del calcestruzzo con aggregato naturale lapideo. La diminuzione del modulo all'interno dei calcestruzzi realizzati sia con sabbia che con frazione grossolana riciclata risulta, invece, molto più marcata e mediamente pari a circa il 25%.

Successivamente, a conseguenza di questa diminuzione di rigidità ci si è focalizzati sul ritiro e sulla deformazione viscosa. Questo perché tale riduzione è responsabile della minore stabilità dimensionale del calcestruzzo riciclato, sia in assenza di carico (ritiro igrometrico) che in presenza di carichi costanti agenti su una determinata struttura (deformazione viscosa). Il ritiro dei calcestruzzi con soli aggregati grossolani riciclati è mediamente superiore di circa il 50% di quello registrato per i conglomerati naturali; mentre valori notevolmente superiori si hanno, invece, per i calcestruzzi confezionati sia con sabbia che aggregato grosso riciclato. Per questi conglomerati, infatti, la contrazione dimensionale connessa con le variazioni igrometriche può raggiungere anche il doppio di quella registrata per i calcestruzzi tradizionali.

Per quanto attiene la deformazione viscosa, i valori registrati per calcestruzzi con soli aggregati grossi riciclati sono maggiori di circa il 25-50% rispetto a quelli del calcestruzzo con inerti naturali.

- **Durabilità del calcestruzzo**

La durabilità del calcestruzzo dipende dalle porosità presenti all'interno della matrice di cemento e quindi dalla permeabilità del conglomerato, entrambe influenzate dalla quantità e qualità della pasta di cemento presente nell'aggregato riciclato. Essendo la permeabilità della pasta superiore a quella dell'aggregato lapideo, in linea di massima ci si deve attendere per il calcestruzzo riciclato una permeabilità maggiore del corrispondente calcestruzzo di pari a/c confezionato con soli inerti naturali.

Rapporto acqua/cemento	Penetrazione di acqua [mm] in calcestruzzo con aggregati:	
	Naturali	Grossolani riciclati
0,40	4,2	4,0
0,45	7,2	11,9
0,50	12,3	17,8
0,55	17,7	26,9
0,60	27,2	31,2
0,65	31,0	39,4

Tabella 79: Penetrazione di acqua nel calcestruzzo.

I dati riportati in Tabella 79 confermano queste previsioni e mettono in evidenza come il calcestruzzo riciclato possenga la stessa permeabilità di quello naturale purché il rapporto acqua/cemento sia inferiore a 0,45. Ne consegue che la durabilità del conglomerato cementizio con aggregato grossolano riciclato potrebbe essere garantita adottando per le opere in c.a. e c.a.p. rapporti acqua/cemento più bassi rispetto a quelli previsti per i calcestruzzi tradizionali di 0,05 ed aumentando il dosaggio minimo di cemento.

La resistenza al gelo di questi calcestruzzi dipende, invece, dalla percentuale di sabbia riciclata (granuli di dimensioni inferiori a 4 mm) presente nell'impasto. Nella Figura sottostante si può vedere come la diminuzione del modulo di elasticità subisca una notevole riduzione (50%) dopo soli 60 cicli di gelo-disgelo. Pertanto, risulta indispensabile, qualora si debbano confezionare calcestruzzi resistenti al gelo, porre una particolare cura ed attenzione nella scelta dell'aggregato riciclato che deve essere privo della frazione passante a 4 mm.

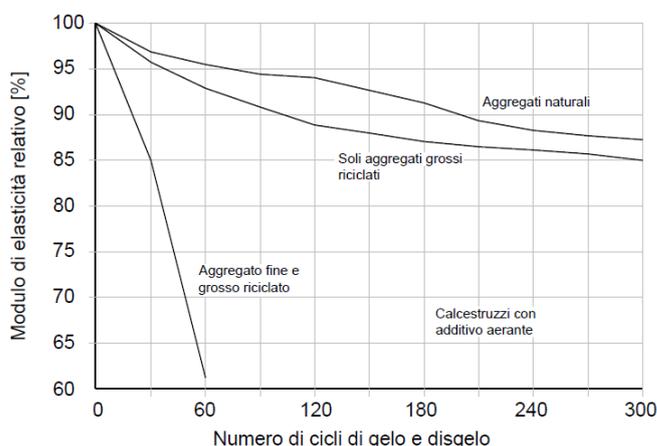


Figura 98: Resistenza a cicli alternati di gelo-disgelo per calcestruzzi naturali e riciclati additivati con agente aerante.

- **Conclusioni**

A fronte delle analisi e ricerche effettuate, gli autori hanno potuto constatare che l'impiego degli aggregati riciclati provenienti dalle demolizioni di strutture in c.a. e c.a.p. per il confezionamento di nuovi calcestruzzi è ampiamente utilizzato nel settore stradale mentre in ambito strutturale non è ancora diffuso. In generale, le caratteristiche risultano sempre più scadenti di quelle ottenute tramite un calcestruzzo realizzato con aggregati lapidei naturali; tuttavia una produzione oculata dell'aggregato riciclato (che consenta di limitare la percentuale delle sostanze contaminanti ed il quantitativo di materiale più fine di 2 mm), una scelta adeguata del rapporto acqua/cemento e l'impiego di additivi che consentano di compensare la maggior richiesta di acqua, possono dar luogo a conglomerati riciclati che per prestazioni meccaniche e di durabilità sono pressoché equivalenti a quelli tradizionali, oltreché meno costosi.

- **ALAN RICHARDSON, PIERRE ALLAIN, MAXIME VEUILLE, Concrete with crushed, graded and washed recycled construction demolition waste as a coarse aggregate replacement, Inghilterra - Francia, 2010.**

L'obiettivo principale di questa ricerca è stato quello di investigare la possibilità di utilizzo delle macerie provenienti dalle demolizioni di edifici strutturali, come aggregato grossolano nella produzione del calcestruzzo andando ad analizzare gli sviluppi di resistenza meccanica del calcestruzzo con aggregati riciclati rispetto al calcestruzzo di controllo realizzato con soli inerti naturali.

Sono state realizzate 4 miscele con gradi di sostituzione dell'inerte grossolano differenti:

- Calcestruzzo di controllo con soli aggregati naturali;
- Calcestruzzo con una sostituzione del 100% dell'inerte grossolano con quello riciclato ed un'ulteriore aggiunta di uno specifico agente di modifica della viscosità pari a 50 ml per 100 Kg di cemento;
- Calcestruzzo con una sostituzione parziale tra inerte naturale e riciclato del 50%;
- Calcestruzzo con una sostituzione del 100% dell'inerte grossolano con quello riciclato.

E' stato utilizzato un cemento CEM 11A (42.5N) come legante in una quantità pari a 360 Kg/m<sup>3</sup>, ghiaia lavata come componente grossolana composta principalmente da particelle di dimensioni 10-20 mm e sabbia di dimensioni 0,5-2 mm.

Gli aggregati riciclati sono stati frantumati, lavati e tutti passanti al setaccio 28 mm. Le componenti di questi inerti da demolizione sono riassumibili in 55% di calcestruzzo, 25% di laterizio e 20% di malta.

Per ogni miscela sono stati realizzati 8 provini cubici il cui mix design e la curva granulometrica degli aggregati utilizzati sono raffigurati nel grafico e figura sottostanti.

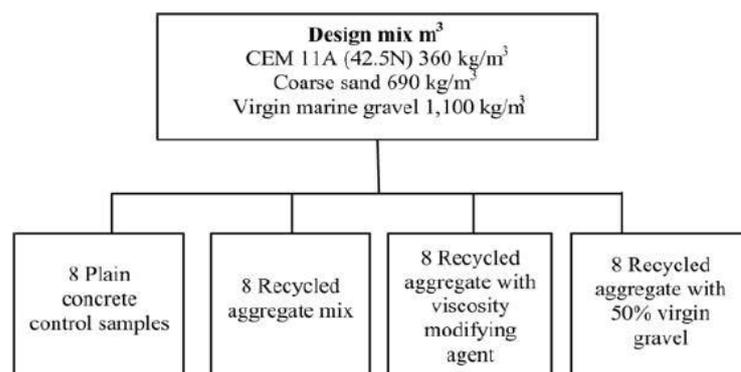


Figura 99: Mix design delle tipologie di calcestruzzo realizzato.

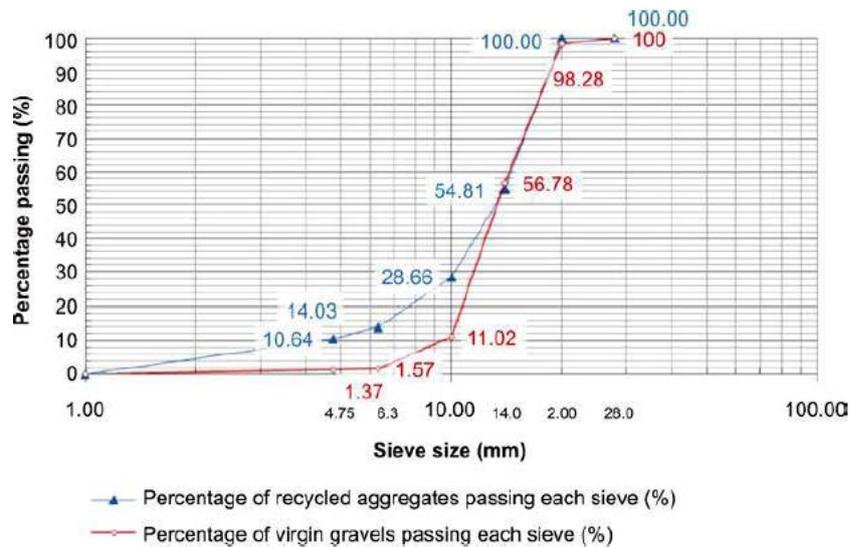


Figura 100: Mix design delle tipologie di calcestruzzo realizzato.

Gli aggregati sono stati utilizzati in condizioni di saturazione per cui quelli riciclati sono stati lavati prima di effettuarne il dosaggio.

Sono stati utilizzati diversi rapporti acqua/cemento a seconda della miscela: 0,5 per il calcestruzzo di controllo; 0,52 per il calcestruzzo riciclato con agente di modifica della viscosità; 0,47 per quello riciclato; 0,59 per quello con una percentuale di sostituzione del 50%.

La percentuale di assorbimento d'acqua degli inerti naturali è risultata pari a 2,07 mentre quella dei riciclati pari a 2,4.

La consistenza è stata misurata entro 5 minuti dal getto attraverso prova di "slump test" e sono stati ottenuti i seguenti dati di abbassamento:

- 20 mm per il calcestruzzo di controllo;
- 50 mm per il calcestruzzo totalmente riciclato nella sua frazione grossolana con agente di modifica della viscosità;
- 60 mm per il calcestruzzo con sostituzione parziale del 50% - 50%;
- 50 mm per il calcestruzzo totalmente riciclato nella sua frazione grossolana.

Successivamente, per la determinazione della resistenza meccanica è stata eseguita la prova di compressione a 5, 7, 14 e 21 giorni sui rispettivi provini, precedentemente portati a maturazione nelle vasca di indurimento.

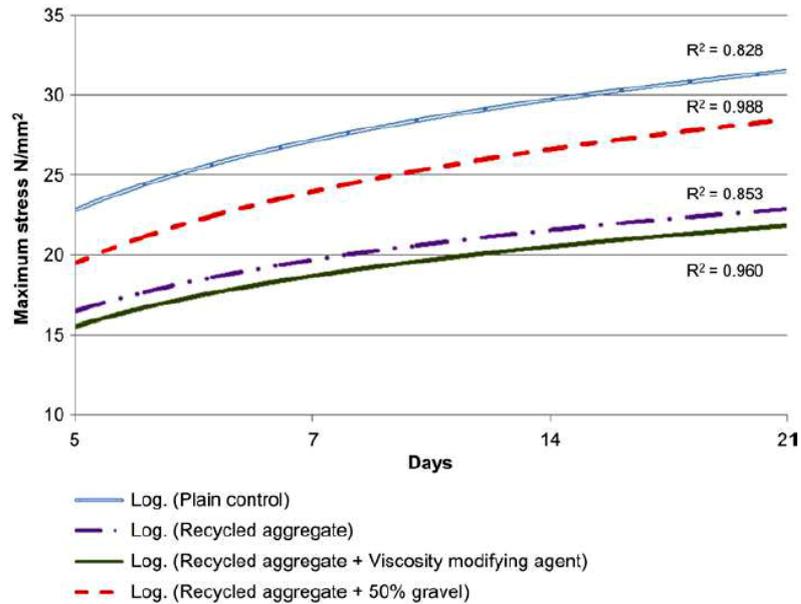


Figura 101: Sviluppo della resistenza a compressione delle diverse tipologie di calcestruzzo.

I valori ottenuti dimostrano che il conglomerato naturale di riferimento presenta, a tutte le età, la maggior resistenza a compressione e tutte le tipologie di calcestruzzo testate sviluppano contemporaneamente un andamento di resistenza molto simile.

A 21 giorni di maturazione si è osservato che, rispetto al campione di controllo, la resistenza a compressione ha una diminuzione del 28% per il calcestruzzo riciclato, del 30% per quello contenente l'agente di modifica della viscosità e di solo l'11% per il mix con sostituzione parziale.

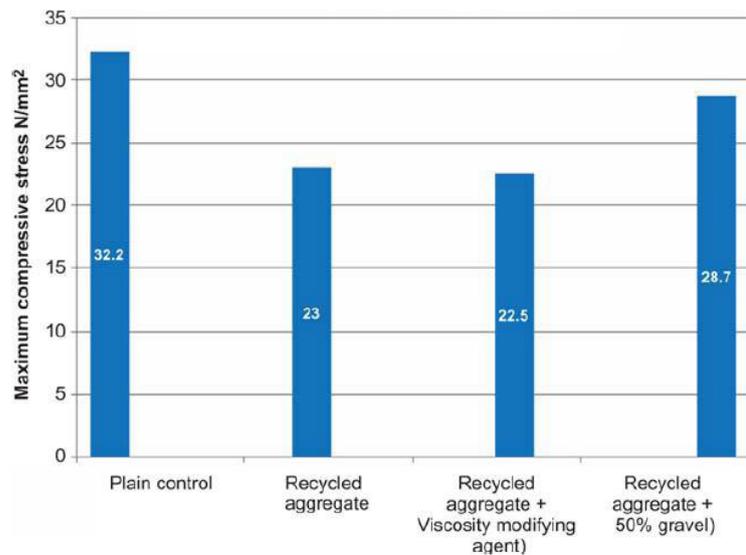


Figura 102: Resistenza a compressione finale dopo 21 giorni di maturazione.

È stata sviluppata, inoltre, un'analisi di densità dalla quale è emerso che sia il campione di calcestruzzo riciclato che quello di riciclato con utilizzo dell'agente di modifica della viscosità, sono caratterizzati da una minore densità se comparati con il provino di controllo.

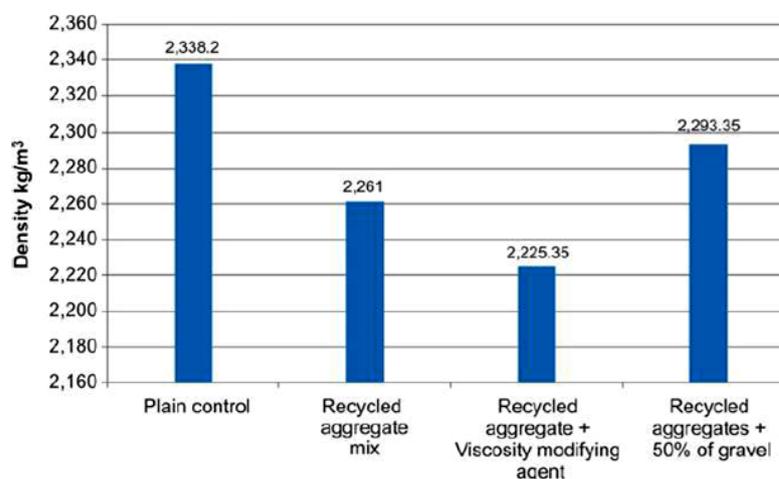


Figura 103: Analisi di densità per le diverse tipologie di calcestruzzo.

- **Conclusioni**

Lo studio ha mostrato che l'utilizzo di aggregati riciclati nella produzione del calcestruzzo porta ad una riduzione della resistenza meccanica a compressione. Questo grado di riduzione di resistenza dipende dal tipo di inerte utilizzato nella produzione e dalla qualità dello stesso in termini di forma e porosità, e può essere "migliorata" andando ad incrementare il quantitativo di cemento utilizzato.

A differenza di quanto atteso originariamente, l'agente di modifica della viscosità non ha fornito miglioramenti sulla resistenza a compressione, pertanto si necessita di ulteriori e future ricerche in merito.

La miglior miscela progettata (rispetto al maggior quantitativo di AR utilizzato) è risultata, in conclusione, quella realizzata tramite parziale sostituzione al 50% dell'aggregato naturale con quello riciclato, senza la necessità di un'aggiunta di cemento/legante per garantire la resistenza meccanica analizzata.

- **F. LA MARCA, C. MARCOCCIO, P. ZAMBITO, Calcestruzzo strutturale con aggregati riciclati, Italia, 2011.**

Scopo del presente studio è stato quello di contribuire alla valutazione dell'impiego di varie tipologie di aggregati riciclati, dosati in percentuali diverse e con l'utilizzo di un cemento comunemente impiegato dai produttori di calcestruzzo, per la produzione di veri e propri calcestruzzi strutturali.

L'attività è stata articolata in varie fasi secondo un arco temporale abbastanza ampio: da Settembre 2010 ad Aprile 2011. Questo al fine di confezionare le stesse miscele in periodi diversi e verificare la variabilità del tempo. Sono stati, perciò, organizzati 3 momenti di prova:

- Settembre 2010
- Dicembre 2010
- Marzo 2011

Nella prima fase gli autori si sono dedicati allo studio delle caratteristiche fisico - chimiche - meccaniche degli aggregati da utilizzare per il confezionamento, dopodiché è stata verificata la possibilità di realizzare un calcestruzzo con le seguenti caratteristiche progettuali:

- Rck pari a 25 MPa;
- Diametro massimo delle particelle pari a 25 mm;
- Classe di consistenza S4 (fluida);
- Classe di esposizione X0 (assenza di rischio di corrosione delle armature o di attacco al calcestruzzo).

La prova prevedeva di mantenere fisso il rapporto acqua/cemento variando, invece, la percentuale di impiego degli aggregati naturali e riciclati, con l'obiettivo di testare l'utilizzo di percentuali sempre più alte di inerti riciclati per il confezionamento di calcestruzzo, anche non rispettando i limiti normativi.

Al fine di ottenere più dati possibili, si è cercato di trattare una ampia varietà di aggregati riciclati, tra i quali:

- Aggregato naturale: Sabbia, ghiaino e ghiaia sono stati forniti dalla "Inerti Belvedere srl" di Montichiari (Bs), certificati secondo la norma UNI EN 12620 con il sistema di attestazione 2+.
- Aggregato riciclato da C&D: è stato impiegato il solo aggregato grossolano con diametro  $d > 4$  mm. Il materiale è stato fornito dalla "RIME1 srl" di Roma che si occupa di attività di recupero e riciclaggio di materiali provenienti dalla costruzione e demolizione. I costituenti principali sono risultati essere:

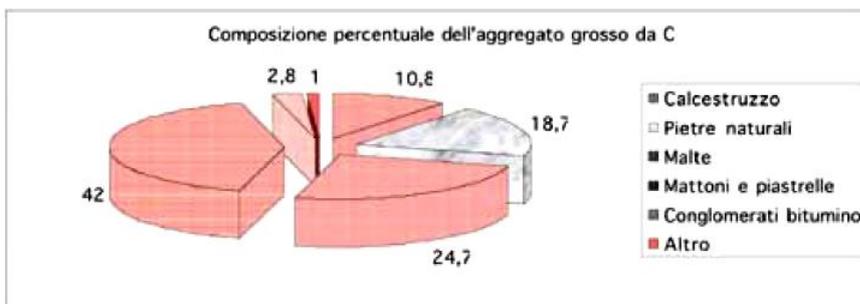


Figura 104: Analisi compositiva dell'aggregato riciclato da C&D.

- Aggregato da solo calcestruzzo demolito: proveniente dalla demolizione di edifici in calcestruzzo o calcestruzzo prefabbricato prodotto dalla “Stroppiana spa”, azienda con sede ad Alba (CN).
- Aggregato da Soil Washing: rappresentato da aggregati derivanti da un trattamento chimico-fisico finalizzato all’allontanamento del contaminante dal terreno ed un successivo recupero con riutilizzo del sedimento. L’azienda che utilizza questa metodologia per il recupero dei siti inquinati e relativa bonifica è la “Teseco” di Pisa, la quale ha fornito 3 pezzature di inerti con i quali realizzare alcune miscele cementizie.

Dopo l’individuazione delle diverse tipologie di aggregati utilizzati, si è proceduto allo studio di diversi fusi granulometrici che rientrassero all’interno di un fuso composto dalle curve di Fuller e Bolomey, tenendo conto del fatto che la differenza tra un calcestruzzo mediocre ed uno di alta qualità non sta tanto negli ingredienti, ma piuttosto nel loro proporzionamento. E’ stato, pertanto, definito, in primis, il fuso granulometrico di riferimento composto integralmente da aggregati naturali, cemento, acqua ed additivo superfluidificante.

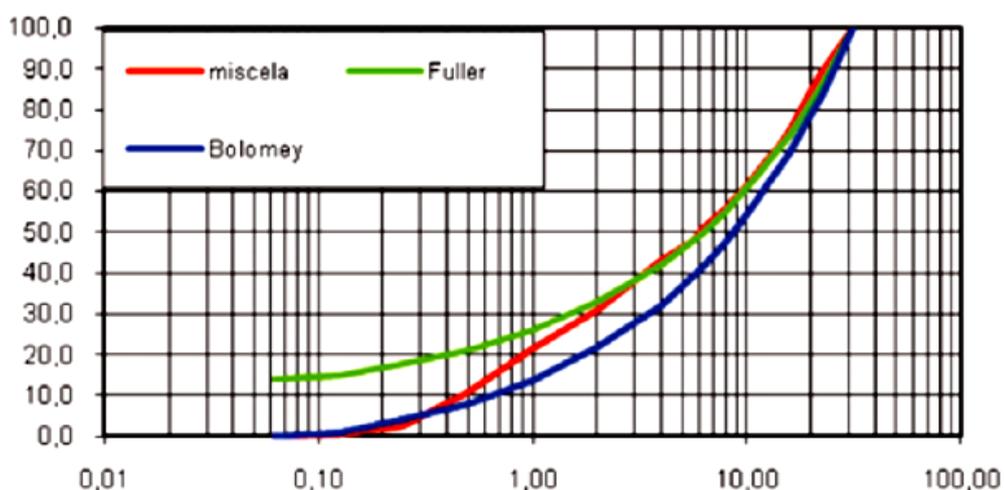


Figura 105: Fuso granulometrico della miscela di riferimento.

Successivamente sono stati progettati i mix design delle miscele con l’utilizzo di aggregati riciclati sostituendo proporzionalmente la frazione grossolana naturale (sia ghiaia 15-25 mm sia ghiaino 5-15 mm) con le relative pezzature degli inerti riciclati. Solo per la miscela 2 è stato realizzato un mix design con l’impiego totale di materiale proveniente dal processo di Soil Washing. Di seguito l’elenco delle miscele confezionate:

Miscela	Caratteristiche	% aggregato Naturale	% aggregato Riciclato
Miscela 1	Cls di riferimento	100	0
Miscela 2	Aggregato da Soil washing	0	100
Miscela 3	Aggregato da Soil washing	80	20
Miscela 4	Aggregato da calcestruzzo demolito	90	10
Miscela 5	Aggregato da calcestruzzo demolito	70	30
Miscela 6	Aggregato da C&D	95	5
Miscela 7	Aggregato da C&D	85	15
Miscela 8	Aggregato da C&D	70	30

Tabella 80: Proporzione di utilizzo degli aggregati nei diversi mix design realizzati.

Queste sono state confezionate nell'arco della stessa giornata in locali climatizzati per minimizzare gli effetti legati alla variabilità della temperatura e dell'umidità; gli aggregati, sia naturali che riciclati, sono stati altresì utilizzati negli impasti in condizioni di s.s.a. (superficie satura asciutta).

La composizione della miscela di 1 m<sup>3</sup> ha rispettato i seguenti dati di progetto:

- Aggregati: 1800 kg
- Cemento Portland "Cem II B-LL 32,5R": 300 kg  
Tipologia di cemento al calcare con un basso contenuto di clinker (65-79%). E' stato scelto volutamente con caratteristiche di resistenza basse al fine di valutare il corretto funzionamento meccanico della miscela cementizia.
- Acqua: 160 lt
- Additivo superfluidificante: dosato al 1% rispetto al quantitativo di cemento
- Rapporto acqua/cemento: 0,53

Il materiale è stato miscelato in un'impastatrice da laboratorio in modo da omogeneizzare tutti i componenti della miscela, dopodiché è stato sottoposto alle seguenti prove: slump test secondo la norma UNI EN 12350-2:2009, di massa volumica sul calcestruzzo fresco secondo la norma UNI EN 12350-6:2009 e di resistenza a compressione con cadenza a 3, 7, 21 e 28 giorni di maturazione.

Sono stati confezionati, all'interno di casseri in banchelite indeformabili, 8 provini cubici di lato 150 mm per ogni miscela (per un totale di 64 provini) e costipati tramite vibratore ad ago, fino a raggiungere il livello massimo. Dopo 24 ore sono stati scasserati e messi in una vasca termoregolata per la stagionatura, alla temperatura di 20°C ed umidità del 100%.



Figura 106: Riempimento dei casseri e costipamento a rifiuto tramite vibratore ad ago.

Le prove di slump sono state eseguite immediatamente dopo la fine della miscelazione e vengono riassunte nella Figura sottostante.

Valori di Slump Test ottenuti nelle tre serie di campagne prove			
	Settembre 2010	Dicembre 2010	Marzo 2010
Miscela 1	200	190	188
Miscela 2	190	185	189
Miscela 3	170	192	190
Miscela 4	185	185	190
Miscela 5	190	185	188
Miscela 6	180	190	190
Miscela 7	170	180	177
Miscela 8	170	182	185

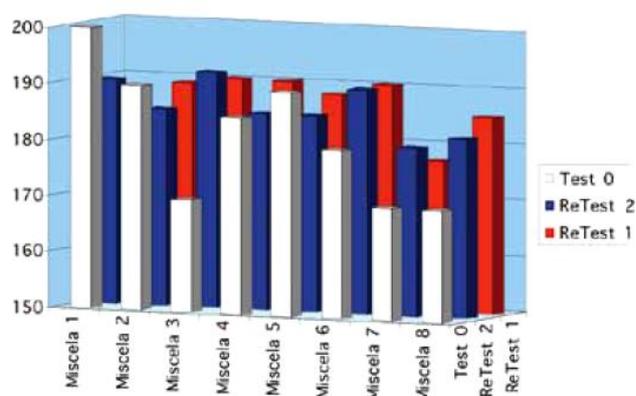


Figura 107: Valori di slump test nelle 3 serie di campagne di prova e grafico di riepilogo (destra).

La Tabella e il grafico di Figura 107 mostrano come sia stata sempre ottenuta la classe di lavorabilità del calcestruzzo definita dal progetto (classe di consistenza S4: abbassamento tra 160-210 mm); si precisa che non è stato necessario effettuare aggiunte di acqua durante gli impasti.

La massa volumica del calcestruzzo fresco è risultata, nella maggioranza delle miscele, leggermente superiore a quella di progetto. Ciò è dovuto alla compattazione della miscela tramite vibrazione ad ago. Nelle miscele 7 e 8 (quelle con l'uso di inerti riciclati da C&D) il valore della massa volumica è risultato, invece, leggermente più basso a causa della minore massa volumica degli aggregati presenti nell'impasto.

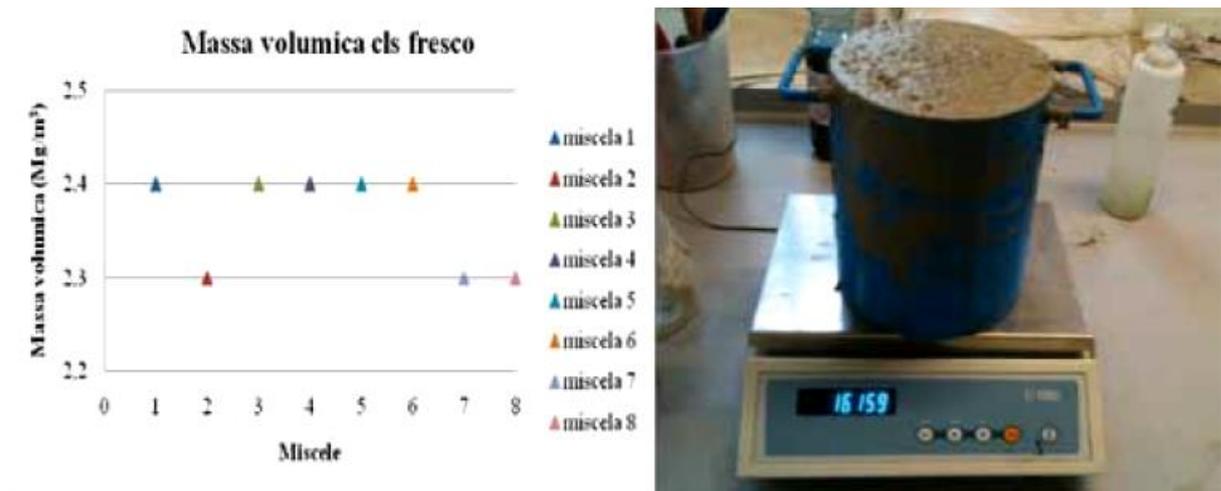


Figura 108: Massa volumica del calcestruzzo fresco relativa alle miscele testate.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione, i provini, dopo la maturazione in vasca di stagionatura, sono stati sottoposti a prova di resistenza meccanica per compressione, eseguita con una macchina standard (pressa da 3000 KN). Tutte le rotture sono state conformi e non hanno mostrato anomalie, fessurazioni da trazione o altro, segno di una buona miscelazione dei componenti e del buon proporzionamento degli aggregati nell'impasto.

I dati di rottura a compressione rilevati sono stati presentati come media delle tre serie di ogni miscela. Questo perché, come già specificato, gli impasti sono stati ripetuti per 3 volte, il che ha comportato una mole di dati non indifferente considerando che per ognuna delle 8 miscele sono stati confezionati per 3 volte 8 provini. In tutto sono state effettuate prove a compressione per un totale di 192 risultati utili.

Denominazione della miscela	Resistenza a compressione in MPa	Dev. Standard in MPa
Miscela 1 (agg. Naturale 100%)	29,2	0,06
Miscela 2 (agg. Soil Was. 100%)	27,2	1,48
Miscela 3 (agg. Soil Was. al 20%)	28,6	0,10
Miscela 4 (agg. da cls al 10%)	29,0	0,60
Miscela 5 (agg. da cls al 30%)	28,0	0,10
Miscela 6 (agg. da C&D al 5%)	28,4	1,83
Miscela 7 (agg. da C&D al 15%)	25,9	0,96
Miscela 8 (agg. da C&D al 70%)	24,2	0,60

Tabella 81: Riepilogo delle resistenze medie a compressione dopo 28 giorni e della deviazione standard delle tre serie.

In Tabella 81 emerge come quasi tutte le miscele abbiano raggiunto la resistenza di progetto pari a 25 MPa, tranne la miscela 8 che presenta comunque un valore non molto lontano da questo. La Tabella evidenzia, inoltre, la deviazione standard di ogni miscela, i cui valori riscontrati non risultano essere molto elevati, tranne per le miscele 2 e 6 se confrontate con la miscela 1 (che presenta un valore pari a 0,06 MPa).

- **Conclusioni**

Attraverso questo studio è stato possibile provare come gli aggregati riciclati possano sostituire a tutti gli effetti (per gli impieghi in cui si dimostrano adeguati) gli aggregati naturali. Alla luce dei dati sperimentali ottenuti, gli autori auspicano un impiego degli AR anche per la produzione di calcestruzzi strutturali.

I dati hanno dimostrato come tutte le miscele progettate e confezionate abbiano raggiunto dopo 28 giorni il valore di Rck 25, ovvero la resistenza minima di progetto prefissata.

Ulteriori miglioramenti si potrebbe ottenere anche grazie all'impiego un cemento 42.5R, tale da garantire deviazioni standard ancora più basse.

Dai risultati conseguiti, si evince che le miscele confezionate usando diverse percentuali di aggregati riciclati, se opportunamente progettate e realizzate, possono raggiungere resistenze a compressione paragonabili a quelle dei calcestruzzi utilizzati nell'edilizia corrente.

Nelle prove sperimentali effettuate, le prestazioni migliori si sono ottenute per la miscela 4, quella cioè composta da aggregato riciclato di calcestruzzo con un dosaggio del 10%. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che essendo l'aggregato da riciclo di calcestruzzo totalmente ricoperto da cemento rimasto attaccato all'inerte naturale, se presente in modeste quantità e non totalmente idratato nella miscela di origine, può reagire con l'acqua di impasto e incrementare le resistenze finali.

- THOMAS, J. SETIEN, J.A. POLANCO, P. ALAEJOS, M. SANCHEZ DE JUAN, *Durability of recycled aggregate concrete, Spagna, 2012.*

Gli autori della ricerca hanno studiato il comportamento fisico, meccanico, le proprietà e la durabilità dei calcestruzzi con aggregati riciclati, derivanti dal recupero dei rifiuti C&D, con sostituzioni dello 0%, 20%, 50% e 100% degli aggregati grossolani e con differenti rapporti acqua/cemento, a 28, 180 e 365 giorni. Lo studio rappresenta, altresì, un riferimento per la valutazione della resistenza a compressione del calcestruzzo di riciclo.

L'obiettivo principale di questo lavoro era quello di definire la metodologia per il corretto utilizzo del calcestruzzo con aggregati riciclati in Spagna, il cui regolamento è raccolto nell'Allegato 15 delle "Raccomandazioni per l'utilizzo del calcestruzzo con aggregati riciclati in Spagna" del Codice Spagnolo del Calcestruzzo Strutturale. Tale Allegato include informazioni specifiche per l'utilizzo degli aggregati riciclati grossolani nel calcestruzzo fino ad un limite massimo del 20% in peso del peso totale degli aggregati grossolani.

Sono state, quindi, studiate 24 miscele di cui 6 di controllo, confezionate con aggregati naturali, e le restanti 18 con sostituzione degli aggregati grossolani.

Sono stati prodotti 768 campioni cilindrici (150x300 mm) testati in camera controllata a  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  e  $97 \pm 2\%$  di umidità.

È stato utilizzato cemento del tipo CEM I 52.5 N/SR con una densità di  $3.11 \text{ g/cm}^3$  ed una superficie specifica di  $361 \text{ m}^2/\text{kg}$  calcolata con il metodo di Blaine.

Di seguito sono riportate le tabelle con le proprietà chimiche del cemento, le proprietà degli aggregati e le curve granulometriche relative.

Cement	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	C
CEM I 52,5 N/SR	69.6	18.6	3.1	2.66	3.22	0.54	1.17	0.17	0.47

Tabella 82: Proprietà chimiche del cemento analizzate tramite spettrofotometria.

Aggregate	Dr (g/cm <sup>3</sup> )	Dsss (g/cm <sup>3</sup> )	A (wt.%)	P (vol.%)	Dc (g/cm <sup>3</sup> )	LA (%)
NA (6/12)	2.51	2.55	1.8	4.7	1.53	31
NA (12/20)	2.54	2.59	1.6	4.0	1.53	-
RA (6/20)	2.32	2.31	5.3	12.3	1.42	42

where Dr. is the relative density of particle (g/cm<sup>3</sup>), Dsss the density of particle saturated with dry surface (g/cm<sup>3</sup>), A the water absorption (wt.%), P the open porosity (vol.%), Dc the aggregate density (g/cm<sup>3</sup>), and LA is the Los Angeles Index (wt.%).

Tabella 83: Proprietà degli aggregati grossolani.

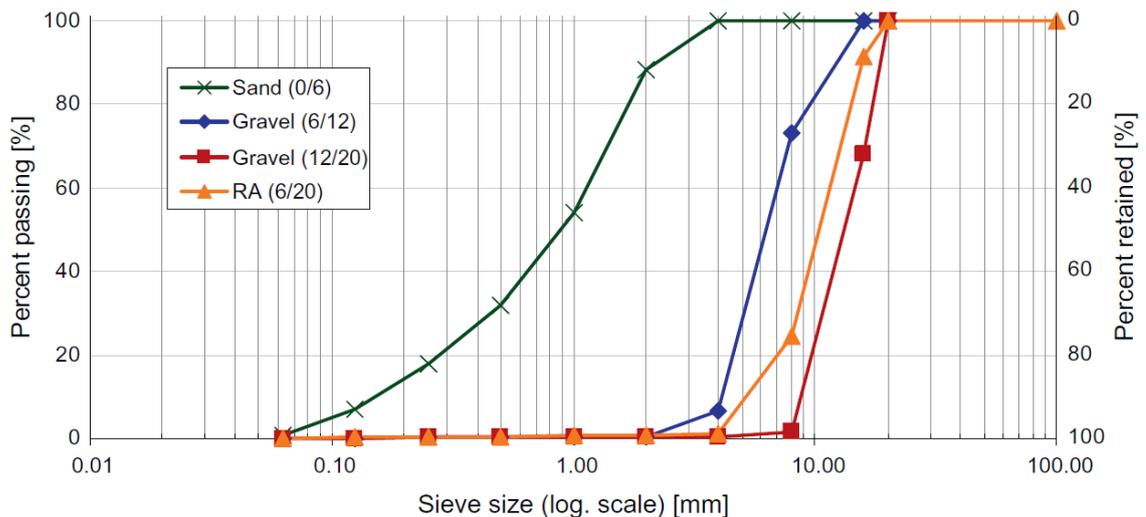


Figura 109: Curva granulometrica degli aggregati.

Sono stati studiati calcestruzzi con una resistenza a compressione variabile tra i 25 e i 50 MPa con rapporti acqua/cemento variabili a seconda della miscela e dell'utilizzo:

- Calcestruzzo con rapporto 0.65 per un ambiente non aggressivo, Classe I;
- Calcestruzzo con rapporto 0.55 adatto all'esposizione ad un ambiente soggetto a carbonatazione, Classe IIb;
- Calcestruzzo con rapporto 0.50 per l'esposizione ad aria marina, Classe IIIa;
- Calcestruzzo con rapporto 0.45 per l'esposizione ad ambiente marino, Classe IIIc.

Lo studio è stato eseguito in 3 fasi:

- Fase 1: miscele con un rapporto  $a/c = 0.65$  e  $a/c = 0.50$ , usando aggregati asciutti;
- Fase 2: miscele con  $a/c = 0.65$  ed  $a/c = 0.50$ , usando aggregati grossolani saturi (naturali e riciclati);
- Fase 3: miscele con  $a/c = 0.55$  ed  $a/c = 0.45$ , usando aggregati riciclati saturi.

Si precisa che per calcolare l'effettivo rapporto acqua/cemento bisogna tenere conto che se si utilizzano aggregati asciutti essi assorbono il 70% della loro capacità assorbente totale durante il dosaggio, mentre quando vengono utilizzati aggregati saturi questi vanno pesati prima e dopo il processo di saturazione.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati relativi alle tre miscele.

Designation	Un.	H-0.65				H-0.50			
		0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Substitution									
Cement	kg	275	275	275	275	380	380	380	380
Water	kg	179	179	179	179	190	190	190	190
Sand	kg	843	878	849	868	714	744	710	715
Gravel (12/20)	kg	752	565	350	0	882	665	414	0
Gravel (6/12)	kg	226	170	105	0	122	92	57	0
RA (12/20)	kg	0	184	455	830	0	189	471	874
Effective w/c ratio		0.60	0.59	0.57	0.54	0.46	0.45	0.44	0.42

Tabella 84: Proporzioni delea miscele H-0.65 ed H-0.5, fase 1, al metro cubo.

Designation	Un.	H-0.65AS				H-0.50AS			
		0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Substitution									
Cement	kg	275	275	275	275	380	380	380	380
Water	kg	179	179	179	179	190	190	190	190
Sand	kg	948	961	978	1010	806	813	822	836
Gravel (12/20)	kg	513	378	209	0	702	522	290	0
Gravel (6/12)	kg	490	362	199	0	330	245	136	0
RA (12/20)	kg	0	185	408	640	0	192	427	683
Effective w/c ratio		0.67	0.68	0.67	0.70	0.53	0.53	0.53	0.52

Tabella 85: Proporzioni delle miscele H-0.65AS ed H-0.5AS, fase 2, al metro cubo.

Designation	Un.	H-0.65ARS				H-0.50ARS			
		0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Substitution									
Cement	kg	325	325	325	325	385	385	385	385
Water	kg	179	179	179	179	173	173	173	173
Sand	kg	875	799	831	825	814	698	742	746
Gravel (12/20)	kg	755	628	367	0	871	748	432	0
Gravel (6/12)	kg	254	211	123	0	168	144	83	0
RA (12/20)	kg	0	210	490	923	0	223	515	963
Effective w/c ratio		0.51	0.52	0.54	0.58	0.42	0.42	0.44	0.49

Tabella 86: Proporzioni delle miscele H-0.55ARS ed H-0.45ARS, fase 3, al metro cubo.

La densità, la porosità e l'assorbimento d'acqua sono state calcolate valutando il volume dei pori aperti, precedentemente resi saturi.

I dati, mostrati con l'ausilio di immagini, evidenziano la correlazione tra la densità relativa del calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati (RAC da "Recycled Aggregate Concrete") e quello naturale (CC da "Control Concrete") rispetto a tre fasi sperimentali consecutive (a 28 giorni (caso a), a 180 giorni (caso b) e a 365 giorni (caso c)) con rapporti effettivi acqua/cemento.

A 28 giorni la densità relativa, sia per RAC che per il CC, decresce con un comportamento quasi lineare all'aumentare del rapporto a/c. La situazione è analoga sia a 180 che a 365 giorni, mostrando valori molto simili a quelli iniziali.

Secondo vari autori la densità relativa è difficilmente influenzata dal tipo di aggregati, a meno che la sostituzione non sia del 100%.

Nella presente ricerca la perdita di densità è stata di circa il 3%, dato che conferma la buona qualità degli aggregati.

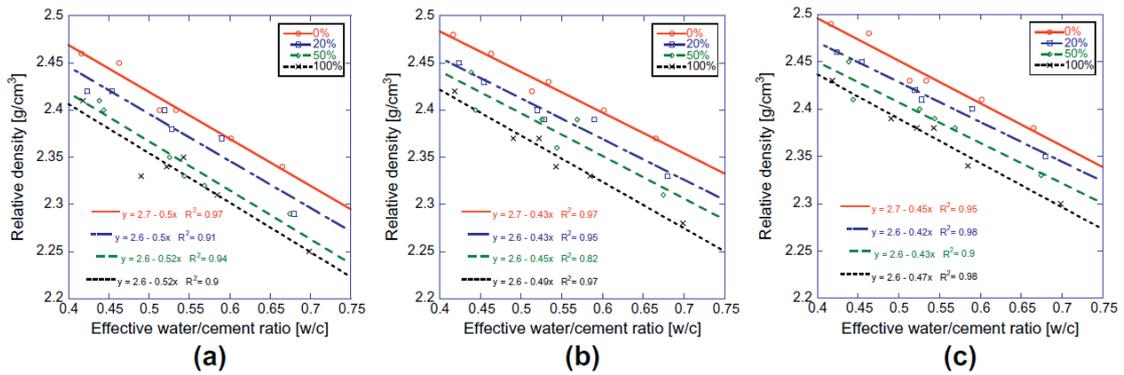


Figura 110: Variazione della densità relativa in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni (a), a 180 giorni (b) e a 365 giorni (c).

In merito al coefficiente di assorbimento, si premette che questo aumenta con l'aumentare del rapporto a/c e all'aumentare del grado di sostituzione degli aggregati. Alcuni autori affermano che l'assorbimento d'acqua dei calcestruzzi di riciclo è del 15% più alto rispetto a quelli naturali, benché non ci siano differenze tra calcestruzzi confezionati con contenuti di aggregati fini riciclati. Ne consegue che gli aggregati grossolani rappresentano i materiali che maggiormente influenzano questa caratteristica.

Dall'immagine si evince come all'aumentare del tempo il calcestruzzo con alte percentuali di sostituzione e maggiori rapporti a/c riduca maggiormente il gap di assorbimento rispetto ai calcestruzzi tradizionali. L'effetto negativo degli aggregati riciclati è significativamente più basso per inferiori rapporti a/c.

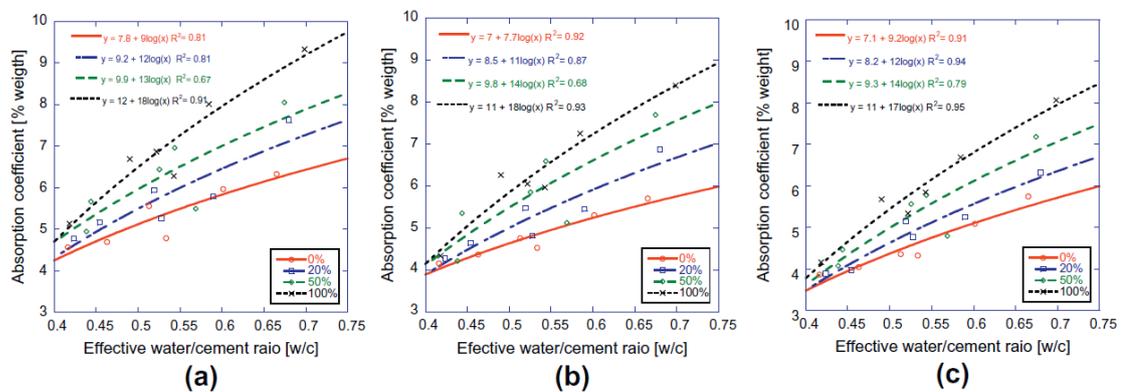


Figura 111: Variazione del coefficiente di assorbimento in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni (a), a 180 giorni (b) e a 365 giorni (c).

Per quanto riguarda la porosità, essa aumenta con la percentuale di sostituzione degli aggregati e con l'aumento del rapporto a/c.

Viene evidenziata una grossa dispersione col progredire del tempo; il comportamento della curva logaritmica è quello di convergere quando il rapporto a/c decresce.

L'aumento della quantità di aggregati riciclati penalizza la durabilità dei calcestruzzi con impasto non compatto. Un eventuale aumento di quest'ultimi comporterebbe un incremento della porosità in relazione al rapporto a/c e al grado di sostituzione.

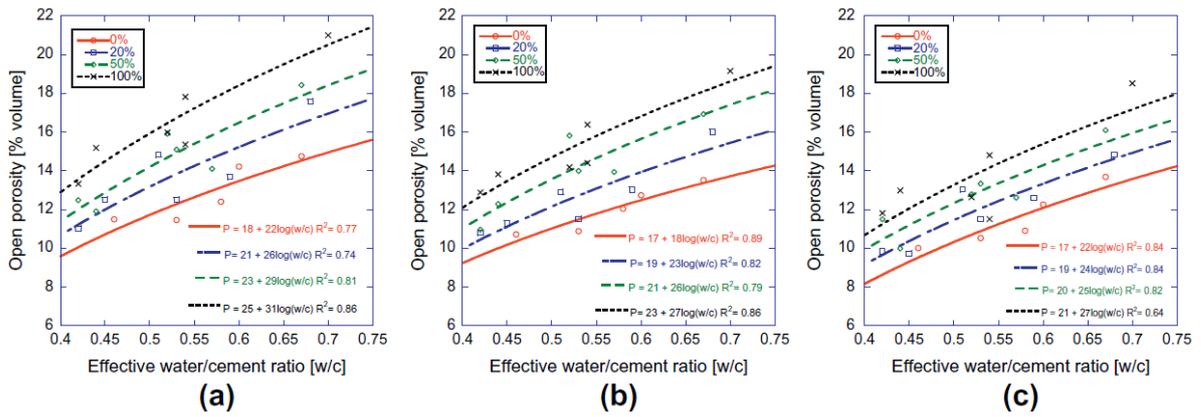


Figura 112: Variazione della porosità in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni (a), a 180 giorni (b) e a 365 giorni (c).

E' ormai una prassi legare la resistenza a compressione e quella a trazione con il rapporto acqua/cemento.

Per tale test è stata utilizzata una pressa idraulica universale di 1500 kN di carico massimo per valutare le proprietà meccaniche. I carichi applicati sono stati di 8 kN/s per la resistenza a trazione e di 10 kN/s per la compressione.

Visionando i risultati è possibile valutare come una sostituzione del 20% degli aggregati naturali con quelli riciclati non produca cambiamenti significativi mentre una sostituzione del 100% dà luogo a significative perdite di resistenza a compressione.

Per raggiungere la medesima resistenza è necessario ridurre il rapporto a/c di 0.05. Dopo 180 giorni si può notare come la differenza tra resistenza a compressione del calcestruzzo di riciclo misto ad aggregati naturali sia più alta per calcestruzzi più forti.

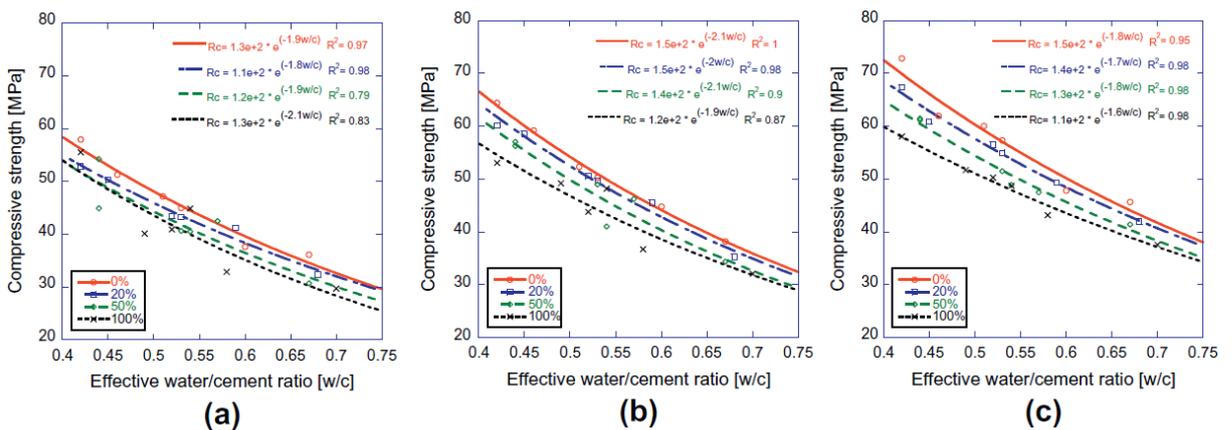


Figura 113: Variazione della resistenza a compressione in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni (a), a 180 giorni (b) e a 365 giorni (c).

Dalla Figura 114 è possibile notare come la resistenza a trazione subisca una forte dispersione. C'è una chiara tendenza del calcestruzzo di riciclo a possedere una resistenza a trazione inferiore a quella naturale, in quanto questa è influenzata dal grado di sostituzione.

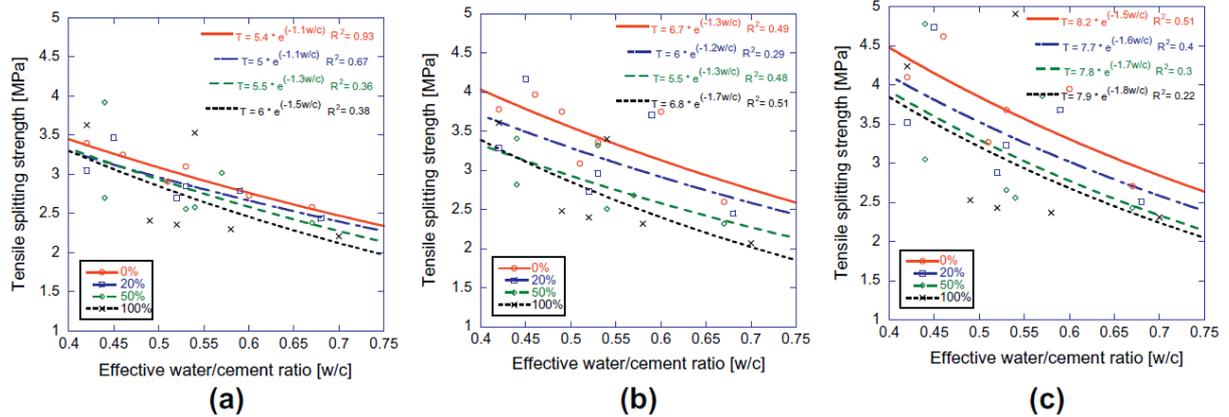


Figura 114: Variazione della resistenza a trazione in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni (a), a 180 giorni (b) e a 365 giorni (c).

Nella Figura 115 viene analizzato il valore del modulo elastico a 28 giorni dal getto. La prova è stata effettuata su tre campioni 100 x 100 x 400 mm.

Il differente grado di sostituzione presenta un'evoluzione parallela al rapporto a/c. L'influenza degli aggregati di riciclo sul modulo elastico è significativamente maggiore rispetto all'influenza sulla resistenza a compressione. Nella Figura viene, inoltre, presentata una visione complessiva del valore del modulo elastico da parte di vari autori.

Zilch e Roses affermano che il modulo di elasticità dipenda dalla resistenza a compressione e dalla sua densità. Evangelista e Brito utilizzano aggregati riciclati fini e la stessa equazione con altri coefficienti di regressione. È dimostrato che i due modelli si relazionano molto bene con i valori emersi, specialmente quello ottenuto attorno ai 35 GPa.

Gli altri modelli mostrano differenze significative dei risultati (l'equazione di Dillmann si è dimostrata quella più lontana dalla previsione ottenuta).

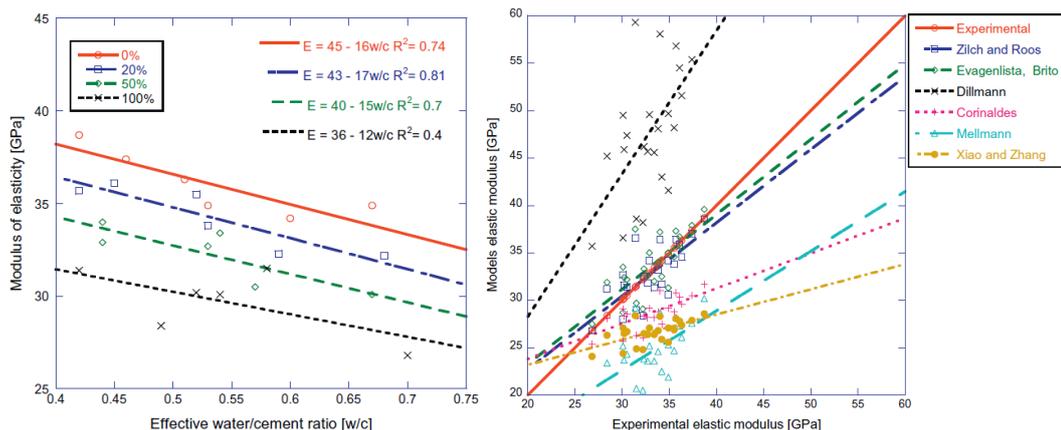


Figura 115: Variazione del modulo elastico in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni e rappresentazione dei moduli elastici ottenuti da vari esperimenti.

Nella Figura 116 viene analizzata la penetrazione dell'acqua in profondità in relazione al rapporto a/c dei calcestruzzi di riciclo con differenti gradi di sostituzione ed invecchiamento.

Per la prova sono stati impiegati tre campioni cilindrici per ogni miscela, utilizzando una colonna d'acqua agente per 72 ore con un'intensità di 5 bar, equivalente a collocare il provino ad una profondità di 50 m.

Dall'analisi è emerso che la permeabilità all'acqua aumenta con l'aumentare del rapporto a/c e con la percentuale di aggregati di riciclo. La tendenza del calcestruzzo è quella di ridurre la permeabilità con l'invecchiamento.

Le curve tendono a convergere per valori di penetrazione dell'acqua attorno ai 30 mm e con rapporti a/c inferiori a 0.45. In queste condizioni è possibile affermare che le differenze tra calcestruzzi naturali e calcestruzzi di riciclo siano minime.

In generale, la massima profondità registrata è strettamente legata al grado di incorporazione degli aggregati di riciclo: per un rapporto a/c inferiore a 0.45 i valori di penetrazione dell'acqua ottenuti sono molto simili in tutti i casi.

Dalle immagini della Figura è possibile capire la relazione tra penetrazione dell'acqua sotto pressione e resistenza a compressione del calcestruzzo di riciclo.

Vi è una piccola differenza tra curve naturali e quelle con un inglobamento degli aggregati del 20%. Le curve tendono a convergere a valori di penetrazione di 30 mm corrispondenti a valori di resistenza a compressione attorno ai 60 MPa.

Per valori maggiori di resistenza a compressione l'incorporazione di aggregati di riciclo non ha effetti significativi sulla penetrazione dell'acqua.

Per una penetrazione massima di 50 mm imposta dalla normativa, il calcestruzzo naturale attesta valori di compressione attorno ai 25 MPa, mentre effettuando una sostituzione del 100% degli aggregati per raggiungere il medesimo grado di profondità di penetrazione dell'acqua, la resistenza a compressione dovrebbe essere superiore ai 40 MPa.

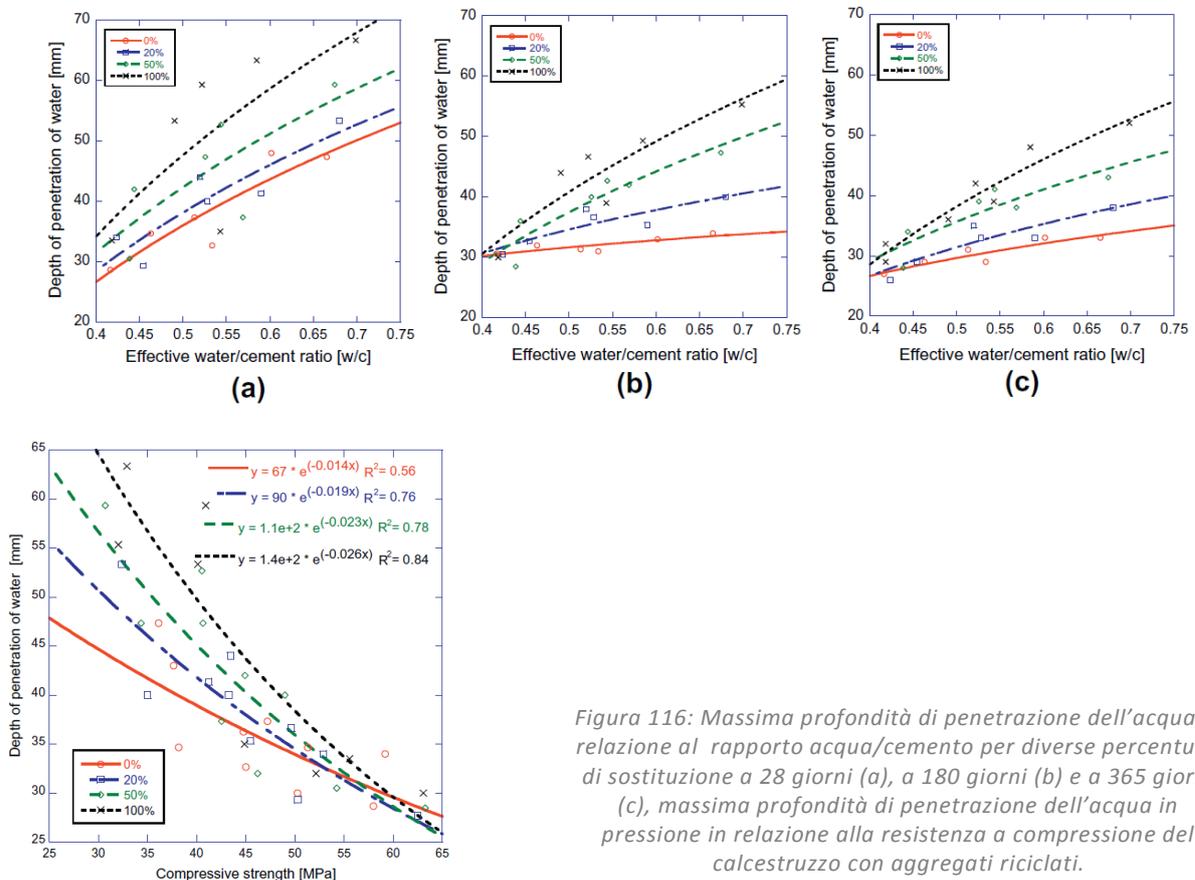


Figura 116: Massima profondità di penetrazione dell'acqua in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni (a), a 180 giorni (b) e a 365 giorni (c), massima profondità di penetrazione dell'acqua in pressione in relazione alla resistenza a compressione del calcestruzzo con aggregati riciclati.

Dalla Figura 117 è possibile notare la relazione che intercorre tra permeabilità all'ossigeno ed il rapporto a/c del calcestruzzo con aggregati di riciclo con differenti gradi di sostituzione e differente periodo di invecchiamento.

Per la prova sono stati utilizzati dischi di 100 mm estratti dal centro del cilindro standard usando un disco diamantato, secondo gli standard spagnoli.

I dati evidenziano una diminuzione della permeabilità specialmente per calcestruzzi con un basso grado di sostituzione; sia i calcestruzzi naturali che quelli di riciclo mostrano, inoltre, una tendenza a convergere verso gli stessi valori per bassi rapporti a/c.

Il tempo per abbassare i valori della permeabilità è più veloce per bassi rapporti a/c.

È importante valutare come l'esposizione diretta ad ambienti marini non comprometta la resistenza a compressione o la porosità del calcestruzzo realizzato con cemento resistente ai solfati.

Gli autori Olorunsogo e Padayachee hanno scoperto che il calcestruzzo di riciclo riduce la permeabilità all'ossigeno del 15%. Questa riduzione può essere attribuita ancora ai bassi rapporti effettivi a/c dei calcestruzzi di riciclo rispetto ai calcestruzzi con aggregati naturali.

I risultati ottenuti mostrano come il rimpiazzo degli aggregati naturali grossolani con quelli di riciclo incrementi la permeabilità all'aria per rapporti a/c più bassi.

Un modo per aumentare la durabilità del calcestruzzo di riciclo è quindi quello di estendere l'invecchiamento in un ambiente umido.

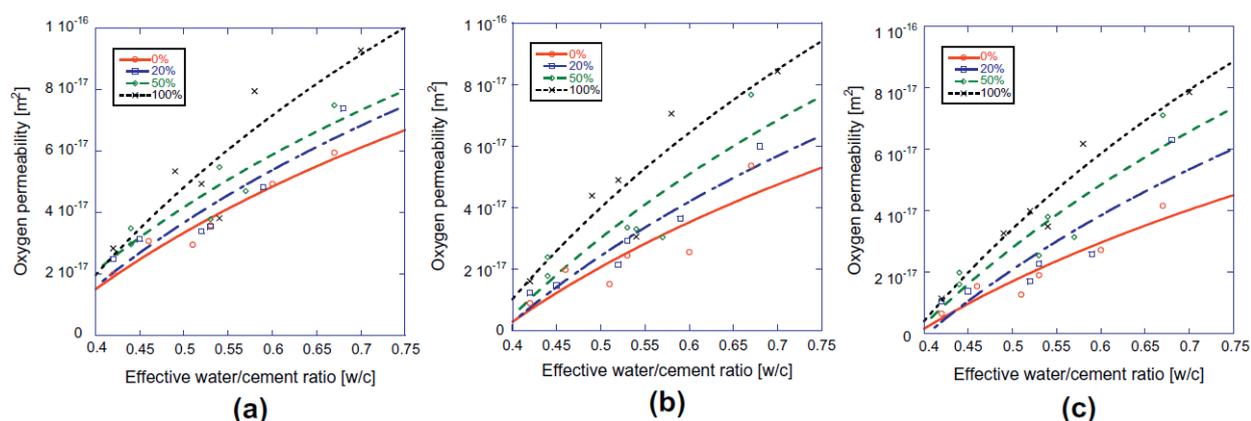


Figura 117: Variazione della permeabilità all'ossigeno in relazione al rapporto acqua/cemento per diverse percentuali di sostituzione a 28 giorni (a), a 180 giorni (b) e a 365 giorni (c).

Nella figura 118 è possibile dedurre la permeabilità dell'ossigeno comparata alla compressione del calcestruzzo di riciclo. Grazie agli eccellenti parametri ottenuti, si può dire che la permeabilità dell'ossigeno è un indice adeguato per valutare la natura porosa del materiale e la sua durabilità.

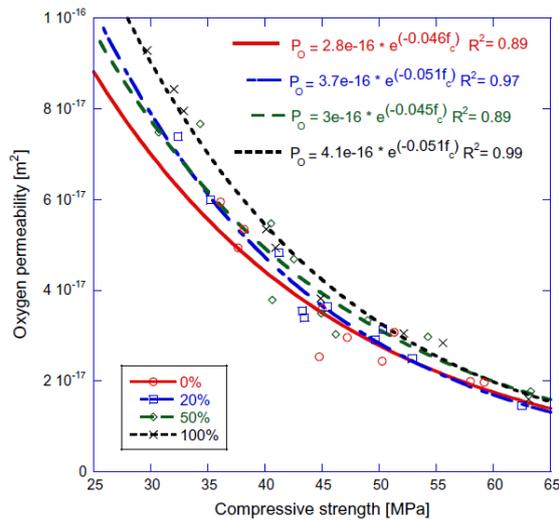


Figura 118: Variazione della permeabilità all'ossigeno in relazione alla resistenza a compressione per diversi gradi di sostituzione degli aggregati.

La Figura 119 rappresenta la permeabilità all'ossigeno comparata con la penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo di riciclo. Alcuni autori hanno trovato che la permeabilità all'ossigeno è strettamente collegata all'eterogeneità del calcestruzzo di bassa prestazione. La buona correlazione dei risultati può essere attribuita alla buona compattazione ed omogeneità dei campioni prodotti in laboratorio. Tuttavia il basso adattamento è un ostacolo quando vi è la necessità di classificare la durabilità del materiale rispetto alla permeabilità all'acqua.

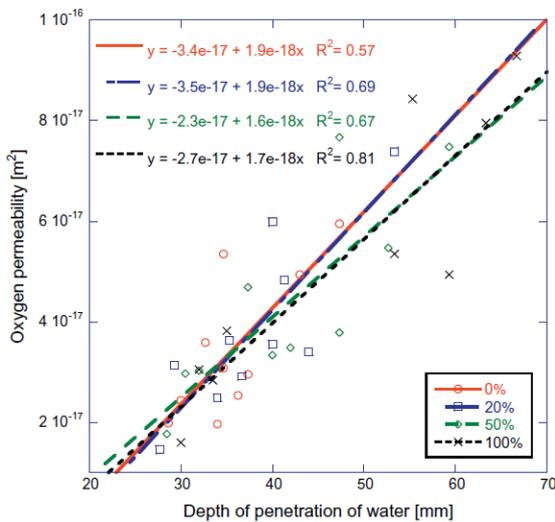


Figura 119: Variazione della permeabilità all'ossigeno in relazione alla profondità di penetrazione dell'acqua per diversi gradi di sostituzione degli aggregati.

Un altro importante aspetto analizzato riguarda la microstruttura del calcestruzzo ove il nuovo impasto cementizio avvolge gli aggregati di riciclo (con presenza del vecchio impasto). In merito, Medina ha definito che la zona di transizione tra aggregati di riciclo-impasto è molto più compatta e meno porosa di quella degli aggregati naturali-impasto, e pertanto fornisce ai calcestruzzi di riciclo migliori proprietà.

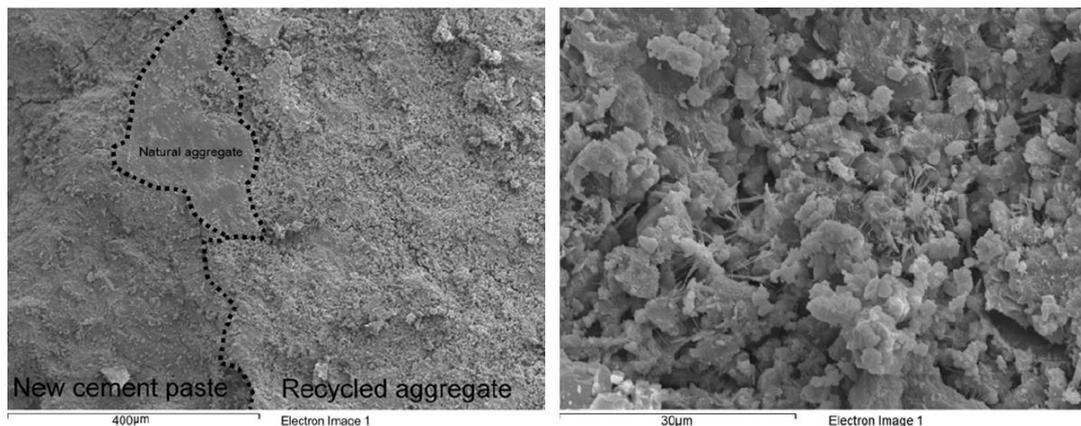


Figura 120: Fotografia al microscopio della struttura del calcestruzzo di riciclo e dettaglio della microstruttura della matrice del legante degli aggregati di riciclo.

Un'ultima considerazione riguarda l'influenza della percentuale di sostituzione sulla resistenza a compressione. Dalla Figura 121 si possono dedurre i valori della resistenza a compressione di tutti i calcestruzzi di riciclo analizzati, i quali sono poi messi a confronto col relativo calcestruzzo naturale mostrando una correlazione lineare tra resistenza a compressione del calcestruzzo di riciclo rispetto a quello naturale:

$$F_{RAC} = a + b \cdot F_{CC}$$

Dove  $F_{RAC}$  è la resistenza a compressione del calcestruzzo di riciclo mentre  $F_{CC}$  è la resistenza a compressione in MPa del calcestruzzo naturale. a) e b) sono coefficienti di regressione, i quali hanno anche un adeguato adattamento lineare comparato al grado di sostituzione degli aggregati di riciclo  $\gamma$ . Esprimendoli:

$$a = -0.32 + 0.022 \cdot \gamma \quad (R^2 = 0.87)$$

$$b = 1 - 0.0025 \cdot \gamma \quad (R^2 = 0.99)$$

$$F_{RAC} = -0.32 + 0.022 \cdot \gamma + (1 - 0.0025 \cdot \gamma) \cdot F_{CC}$$

I valori ottenuti con l'equazione si adattano bene con quelli già riscontrati negli altri esperimenti effettuati per la resistenza a compressione del calcestruzzo. Il risultato della resistenza a compressione in relazione al grado di sostituzione del calcestruzzo di riciclo  $\gamma$  indica che ci deve essere almeno un valore per il quale l'incorporazione degli aggregati di riciclo non influisce negativamente sul comportamento del calcestruzzo, dato da:

$$\frac{\partial F_{RAC}}{\partial \gamma} = 0.022 - 0.0025 \cdot F_{CC} = 0 \rightarrow F_{CC} = 8.8 \text{ MPa}$$

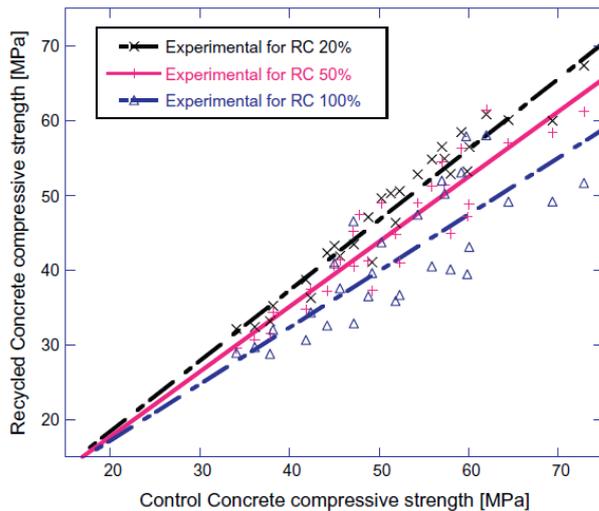


Figura 121: Resistenza a compressione di tutti i calcestruzzi di riciclo analizzati a confronto con i corrispondenti calcestruzzi di controllo naturali.

Regression parameters	Substitution			
	0%	20%	50%	100%
$a$	0	0	0.3	2.1
$b$	1	0.94	0.87	0.75
$R^2$	1	0.97	0.92	0.80

Tabella 87: Coefficienti di regressione della relazione tra resistenza a compressione del calcestruzzo di riciclo a confronto con quello naturale di controllo.

## • Conclusioni

Sono state studiate differenti miscele con differenti gradi di sostituzione in diverse tempistiche, dalle quali sono state ricavate le seguenti considerazioni:

- La densità dei calcestruzzi di riciclo realizzati con aggregati riciclati non saturi è inferiore rispetto a quella del calcestruzzo di controllo nonostante la riduzione del rapporto acqua/cemento effettivo. In aggiunta, questo effetto isola la maggiore porosità di questi aggregati.
- Nel caso di calcestruzzi con il medesimo rapporto a/c effettivo, la densità diminuisce con l'incorporazione degli aggregati di riciclo.
- Un'aggiunta del 20% di aggregati di riciclo fornisce una densità di un valore più basso del 5% rispetto al calcestruzzo naturale.
- La permeabilità all'ossigeno presenta una migliore adattabilità con il rapporto a/c rispetto alla permeabilità all'acqua.
- La durabilità del calcestruzzo di riciclo confezionato con lo stesso rapporto a/c è inferiore rispetto a quella del calcestruzzo tradizionale a causa della maggiore porosità degli aggregati di riciclo.
- Nei calcestruzzi con un basso rapporto a/c, la minore porosità del nuovo impasto è dominante ed elimina l'avanzamento degli agenti aggressivi, ottenendo un comportamento simile dei due.
- Da un punto di vista conservativo, è consigliabile ridurre di 0.1 il rapporto a/c rispetto al rapporto massimo richiesto per calcestruzzi con il 100% di aggregati grossolani riciclati. (Questo requisito è applicato a tutte le situazioni meno quelle in ambiente soggetto a

carbonatazione per le quali questa riduzione dovrebbe essere di 0.05 punti, in accordo con i risultati ottenuti).

- I calcestruzzi realizzati con aggregati di riciclo con un alto grado di sostituzione mostrano una minore differenza della resistenza a compressione per differenti rapporti a/c rispetto ai calcestruzzi realizzati con aggregati naturali.
- In tempi di maturazione più avanzati, il calcestruzzo con aggregati di riciclo con un basso rapporto a/c esprime un'alta resistenza a compressione. Perciò, l'influenza degli aggregati di riciclo sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo è maggiore per bassi rapporti acqua/cemento.
- I comportamenti osservati, in termini di proprietà fisiche, meccaniche e di durabilità dei calcestruzzi conservati in ambiente umido ed in un ambiente marino, differiscono di un certo grado dipendente dal parametro analizzato. Tuttavia, l'evoluzione e l'effetto prodotto dagli aggregati di riciclo è proporzionale nei due casi.

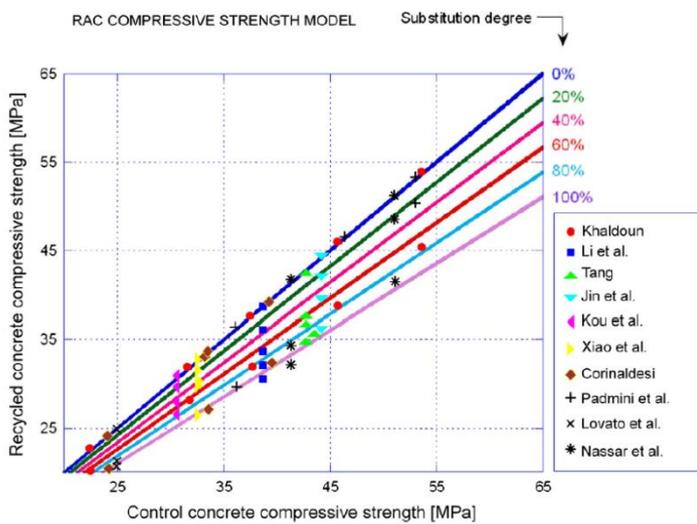


Figura 122: Modello comparativo dei risultati ottenuti da vari autori.

❖ Applicazioni a scala reale degli aggregati di riciclo

- **VALERIA CORINALDESI, GIACOMO MORICONI, Utilizzazione di aggregati in calcestruzzo riciclato in prefabbricazione, Italia, 2007.**

Il principale obiettivo di questo programma di ricerca è stato quello di dimostrare che gli scarti di lavorazione provenienti dalla produzione di elementi prefabbricati in calcestruzzo armato o precompresso possono essere riutilizzati come aggregati riciclati per sostituire parzialmente gli aggregati naturali di cava nella produzione di nuovi elementi in calcestruzzo armato con le stesse prestazioni meccaniche. In particolare, sono state sperimentate diverse percentuali di sostituzione, tra il 5% e il 30% in peso della quantità totale di aggregato impiegata, per stabilire la massima percentuale di sostituzione possibile mantenendo la stessa classe di resistenza del calcestruzzo originale, compresa nell'intervallo di 50-55 MPa.

Inizialmente si è, quindi, provveduto alla catalogazione delle varie frazioni granulometriche costituite da calcestruzzo riciclato proveniente da scarti di lavorazione, le quali sono state ottenute in laboratorio con l'ausilio di un frantoio che ha consentito di ottenere un diametro massimo pari a 10 mm.

Frazione	Impianto	Elemento strutturale	Classe di resistenza [MPa]
A	1	Trave in c.a.p	55
B	1	Pilastro in c.a.v	50
C	1	Solaio alveolare estruso	55
D	2	(1)	n.d. (3)
E	3	(2)	n.d. (3)
F	4	Pannello alveolare precompresso	n.d. (3)
G	5	Pilastro in c.a.v	50
H	5	Solaio alveolare	55
I	5	Trave in c.a.p	55

*Tabella 88: Calcestruzzo frantumato con pinza meccanica e frantoio, (2) Calcestruzzo frantumato con pinza meccanica, (3) Dato non disponibile. Tabella 72: Catalogazione delle frazioni di calcestruzzo riciclato.*

Successivamente è stata determinata la distribuzione granulometrica di ciascuna frazione macinata senza alcuna setacciatura preliminare, i cui risultati sono riportati in Figura 123.

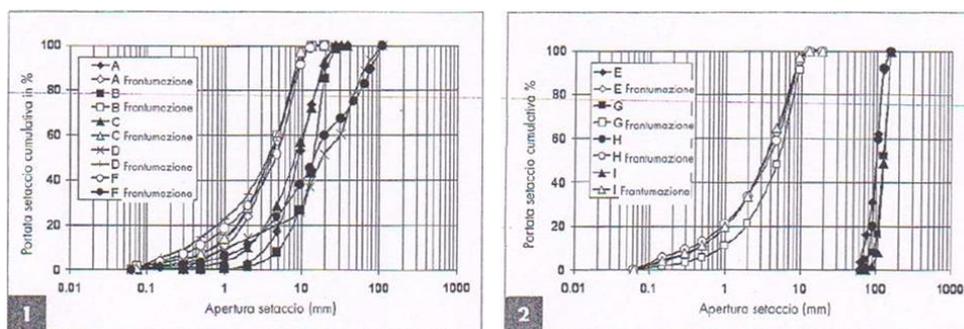


Figura 123: Distribuzione granulometrica delle frazioni di calcestruzzo riciclato A,B,C,D,F (sinistra) ed E,G,H,I (destra) prima (simboli pieni) e dopo (simboli vuoti) la frantumazione.

Sono state poi determinate le proprietà fisiche di assorbimento d'acqua e massa volumica, riportate nella Tabella sottostante:

Frazione	Assorbimento d'acqua (%) in condizioni di s.s.a	Massa volumica [g/cm <sup>3</sup> ]
A	8,34	2,31
B	9,21	2,16
C	7,70	2,25
D	5,56	2,34
E	7,26	2,24
F	7,63	2,22
G	7,86	2,18
H	8,34	2,21
I	9,97	2,07

(\*) s.s.a. = sature a superficie asciutta.

Tabella 89: Principali proprietà fisiche degli aggregati in calcestruzzo riciclato.

L'influenza dell'aggregato sulla lavorabilità del calcestruzzo fresco e sulla resistenza a compressione del calcestruzzo indurito è stata valutata, poi, su 12 miscele preparate in laboratorio variando la provenienza dell'aggregato riciclato e la percentuale di sostituzione dell'inerte naturale.

La miscela di riferimento (Ref) è stata confezionata combinando una sabbia naturale (0-5 mm) e due frazioni di aggregato naturale di frantumazione con pezzatura di 2-10 mm e 5-25 mm, non andando quindi ad inserire alcuna percentuale di inerte riciclato (0%). Le miscele di prova, al contrario, sono state preparate utilizzando frazioni di aggregato in calcestruzzo riciclato frantumato classificate come B, D, E, F e H, andando a sostituire la più fine delle due frazioni di aggregato 2-10 mm a percentuali variabili dal 5% al 30% in peso della quantità totale di aggregato.

Il rapporto acqua/cemento pari a 0,50 e la lavorabilità (consistenza fluida) sono stati mantenuti costanti per tutte le miscele, così come il dosaggio di superfluidificante pari all'1% in peso del cemento.

Di seguito è riportato il diverso proporzionamento delle miscele:

Miscela	a/c	Acqua	Cemento	Superfluidificante	Sabbia naturale (0-5 mm)	Pietrischetto naturale (2-10 mm)	Pietrischetto naturale (5-25 mm)	Calcestruzzo riciclato (0-12 mm)
Referenz.	0,50	175	350	3,5	535	535	715	-
B - 5%	0,50	175	350	3,5	535	89	715	82
B - 10%	0,50	175	350	3,5	535	178	715	165
B - 30%	0,50	175	350	3,5	535	-	715	490
D - 5%	0,50	175	350	3,5	535	89	715	88
D - 10%	0,50	175	350	3,5	535	178	715	177
E - 5%	0,50	175	350	3,5	535	89	715	85
E - 10%	0,50	175	350	3,5	535	178	715	170
F - 5%	0,50	175	350	3,5	535	89	715	85
F - 10%	0,50	175	350	3,5	535	178	715	170
H - 5%	0,50	175	350	3,5	535	89	715	83
H - 10%	0,50	175	350	3,5	535	178	715	165

Tabella 90: Proporzionamento delle miscele di calcestruzzo (dosaggi espressi in Kg/m<sup>3</sup> di calcestruzzo).

Le prove di resistenza meccanica a compressione sono state effettuate su provini cubici di lato 100 mm dopo 1, 7, 28 giorni di maturazione a temperatura ambiente, i cui risultati sono riportati nei grafici seguenti.

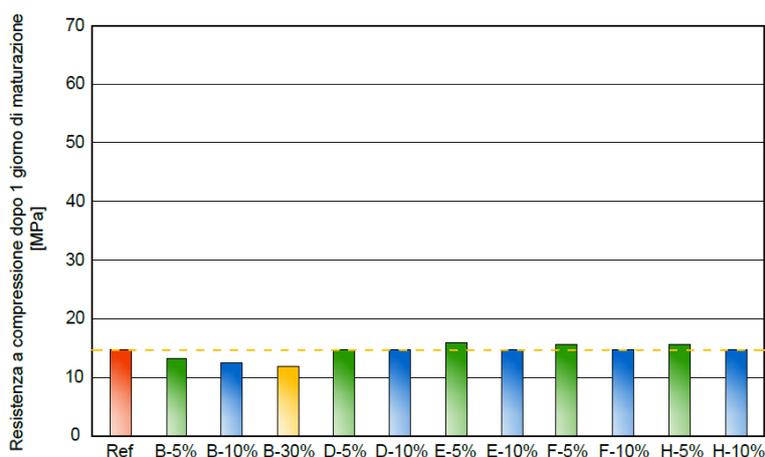


Figura 124: Resistenza a compressione dopo 1 giorno di maturazione dei calcestruzzi con inerti di riciclo.

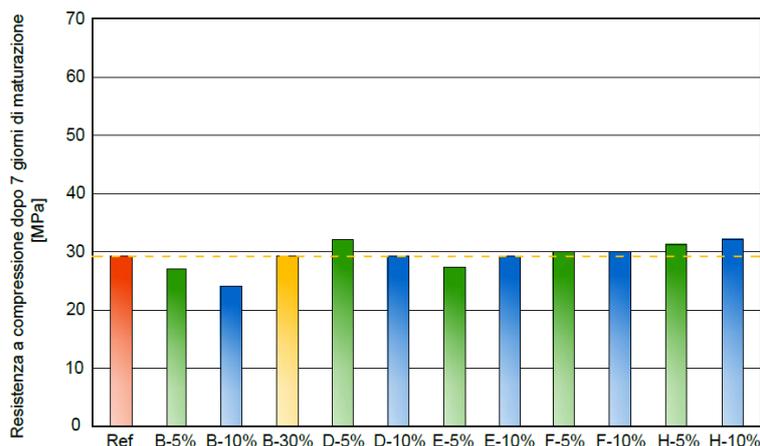


Figura 125: Resistenza a compressione dopo 7 giorni di maturazione dei calcestruzzi con inerti di riciclo.

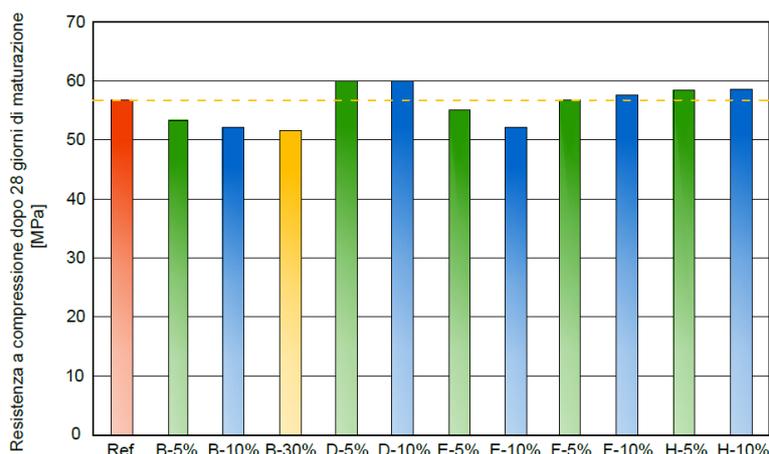


Figura 126: Resistenza a compressione dopo 28 giorni di maturazione dei calcestruzzi con inerti di riciclo.

Dal confronto con il campione di riferimento si nota che la sostituzione dell'aggregato naturale con quello riciclato non ha provocato alcuna significativa variazione della resistenza a compressione indipendentemente dalla percentuale di sostituzione, fatta eccezione per la frazione B caratterizzata da una classe di resistenza inferiore ed un assorbimento d'acqua maggiore.

Dopodiché, allo scopo di valutare il comportamento a ritiro igrometrico, sono state preparate 2 miscele di calcestruzzo con lo stesso rapporto acqua/cemento pari a 0,45 e la stessa lavorabilità (170 mm di abbassamento al cono di Abrams, corrispondente a consistenza fluida), e variato la natura dell'additivo chimico. Il proporzionamento di queste miscele è risultato essere:

Miscela	H-70%	H-70%+SRA
Acqua/cemento	0.45	0.45
Acqua	165	165
Cemento	365	365
Sabbia naturale (0-5mm)	550	545
Calcestruzzo riciclato (0-12mm)	1195	1190
Additivo superfluidificante	3	-
Superfluidificante con SRA	-	6

Tabella 91: Proporzionamento della miscela di calcestruzzo (dosaggi espressi in Kg/m<sup>3</sup> di calcestruzzo).

La miscela indicata come "H-70%" è stata preparata con lo stesso superfluidificante utilizzato in precedenza, con un dosaggio dello 0.8% in peso del cemento, per ottenere una riduzione dell'acqua di impasto del 25%. Questo calcestruzzo è stato poi confezionato utilizzando, come frazione grossolana, l'aggregato riciclato di tipo "H" in una percentuale del 70%, combinata ad una percentuale del 30% di sabbia naturale, in modo da ottenere la distribuzione granulometrica ottimale secondo Bolomey.

La miscela “H-70+SRA” è stata, invece, preparata utilizzando un superfluidificante multifunzionale per l’1.6% in peso del cemento, ottenuto per addizione di un gruppo riduttore di ritiro (SRA) al polimero in polycarbossilato. Questo ha consentito di ridurre sia il dosaggio di acqua del 25% che il ritiro del calcestruzzo.

Per entrambi i calcestruzzi le frazioni di aggregato sono state preliminarmente saturate con acqua: questa operazione è particolarmente importante nel caso di utilizzo di inerte riciclato, in quanto la riserva d’acqua che viene a crearsi internamente all’inerte mitiga il ritiro per essiccamento del calcestruzzo.

Dopo 28 giorni di maturazione i valori della resistenza a compressione misurata su cubetti di calcestruzzo (100 x 100 x 100 mm) sono risultati pari a 45 MPa per i calcestruzzi H-70% e 49 MPa per i calcestruzzi H-70%+SRA.

Per la valutazione del ritiro igrometrico (o da essiccamento) sono stati confezionati 3 provini prismatici (100 x 100 x 500 mm) per ciascuna miscela di calcestruzzo, stagionati ad umido per 2 giorni alla temperatura di 15°C e successivamente stagionati alla stessa temperatura ad una umidità relativa del 65% fino a 100 giorni.

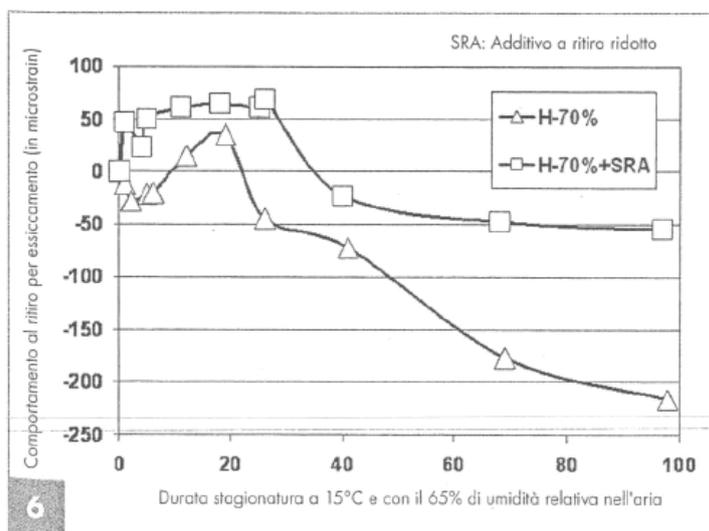


Figura 127: Misura del ritiro igrometrico libero in funzione del tempo di maturazione.

I dati ottenuti mostrano che dopo 100 giorni di prova il ritiro nella miscela H-70% risulta essere molto più basso, inferiore a -60  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Tuttavia, anche in assenza dell’additivo riduttore di ritiro, nella miscela H-70%+SRA il valore è risultato inferiore a -250  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Pertanto, se preliminarmente saturato, l’inerte di riciclo sembra comportarsi soddisfacentemente in termini di ritiro da essiccamento.

- **Prove su elementi in scala reale**

Le miscele messe a punto e caratterizzate come descritto in precedenza, sono state poi utilizzate nella preparazione di elementi strutturali in scala reale, negli stessi impianti di prefabbricazione, allo scopo di verificarne il processo produttivo e le prestazioni. In particolare, sono state prodotte travi in calcestruzzo armato e lastre di solaio alveolare estruso.

➤ *Travi in calcestruzzo armato*

Per questa serie di prove sperimentali sono state progettate e prodotte 8 travi lunghe 8 m, di sezione 0,40 x 0,80 m. Di queste:

- 2 sono state confezionate con il calcestruzzo usualmente impiegato per la produzione corrente di classe 45/55 MPa, utilizzando aggregati naturali;
- 6 sono state confezionate con frazioni granulometriche di 5-15 mm 15-30 mm parzialmente sostituite da aggregati riciclati provenienti dagli scarti di lavorazione dello stesso impianto di prefabbricazione.

Tutte le travi sono state armate con la stessa quantità di barre e la percentuale di sostituzione è stata del 20% o 30%, e fatte stagionare all'aria (come per la produzione tradizionale). La sequenza di carico è stata la stessa per tutte le travi. Due carichi concentrati sono stati applicati simmetricamente alla distanza di 1,0 m. Le travi sono state sottoposte a diversi cicli di carico e scarico in campo lineare, prima di incrementare il carico fino allo stato ultimo. Le travi erano in semplice appoggio con una luce di 7,5 m.

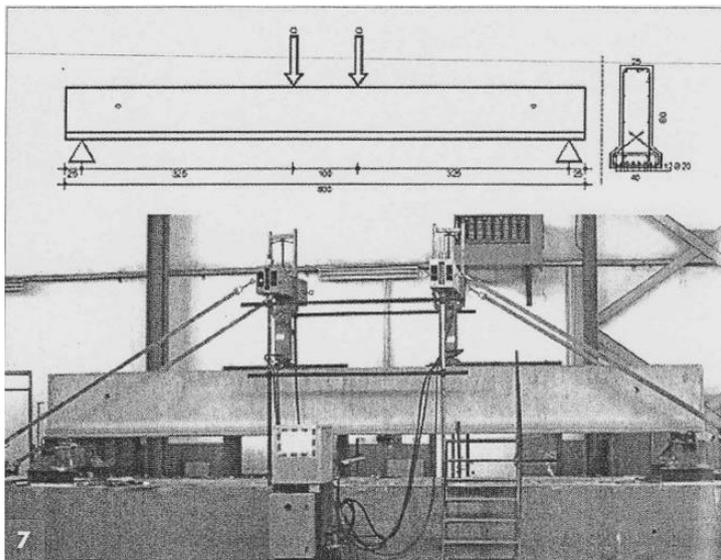


Figura 128: Prova su travi in c.a.: schema (sopra) e svolgimento (sotto).

In generale, si è osservato un comportamento del tutto simile per tutte le travi in termini di deformabilità, fessurazione e duttilità. È stata rilevata una diminuzione di resistenza inferiore al 5% per le travi con impiego del 20% di aggregato riciclato ed inferiore al 10% per quelle con il 30% di inerte riciclato. Il modulo elastico  $E$  ha mostrato una corrispondente diminuzione rispettivamente del 9% e del 12%.

Dai risultati emersi dalle prove di laboratorio, è possibile ritenere che le riduzioni di prestazione di questi calcestruzzi dipendano più dalla mancanza di esperienza nella preparazione industriale che non dalle proprietà intrinseche dei calcestruzzi con aggregati riciclati.

➤ Solai alveolari precompressi

Sono state prodotte in un unico getto 4 lastre di solaio alveolare estruso lunghe 4,2 m, larghe 1200 mm e spessore 200 mm, armate con trefoli 7 x 0,5", di cui:

- 2 lastre sono state confezionate con aggregati naturali;
- nelle altre 2 è stata effettuata una sostituzione del 30% con aggregato riciclato.

La frazione riciclata è stata prelevata dagli scarti residui di calcestruzzo alla fine della linea di lavorazione dell'impianto.

Il calcestruzzo prodotto era di ottima qualità con una resistenza caratteristica cubica di 60 MPa, un diametro massimo dell'aggregato di 25 mm ed un rapporto acqua/cemento molto basso.

Poiché le lastre del solaio sono tipicamente armate solo con cavi pretesi, senza alcuna specifica armatura a taglio, l'aspetto critico è costituito dalla resistenza a taglio nella zona di appoggio. Pertanto, la prova significativa è quella di taglio da condurre, in accordo allo schema usuale previsto per questo prodotto, con un carico lineare distribuito sulla larghezza della lastra ad una distanza  $2,5h$  all'appoggio (dove  $h$  è lo spessore della lastra, in questo caso pari a 200 mm).

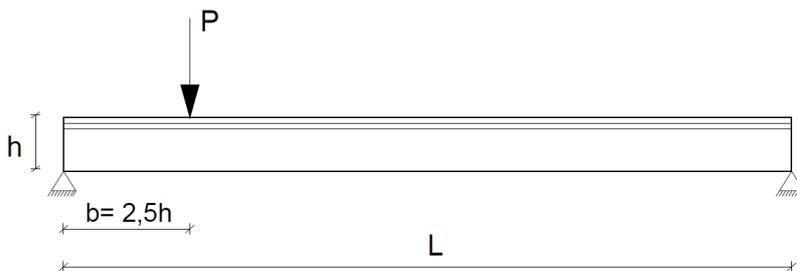


Figura 129: Schema delle prove di taglio su solaio alveolare.

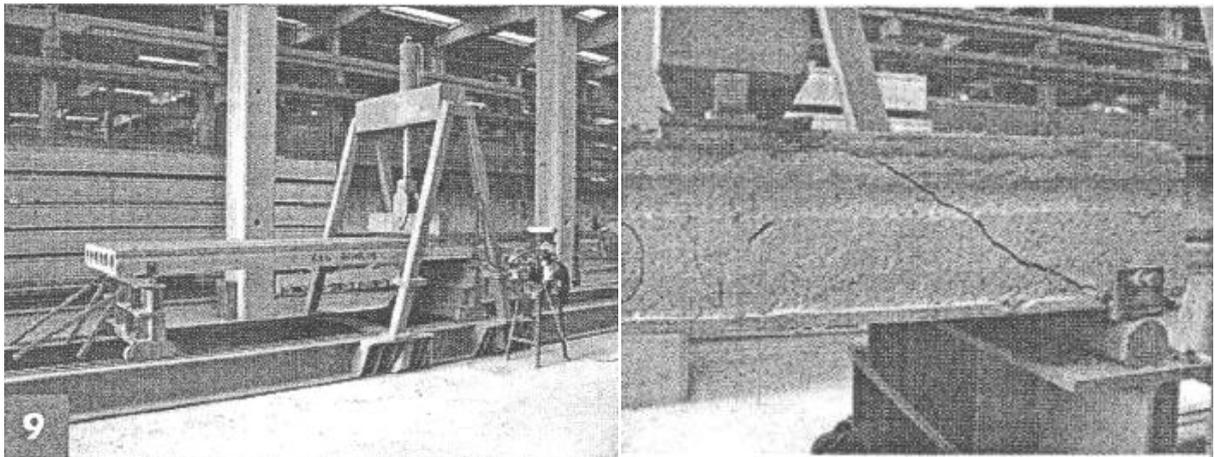


Figura 130: Prova di taglio su solaio alveolare: messa a punto (sinistra) e particolare della modalità di frattura (destra).

La prova è stata effettuata ad entrambe le estremità di ciascuna lastra di solaio, ottenendo, quindi, 8 risultati piuttosto simili e vicini ai valori teorici di rottura per sollecitazione a taglio. In effetti, la resistenza a taglio è determinata dalla resistenza a trazione del calcestruzzo, la

quale non è stata influenzata dalla presenza di aggregato riciclato (1,9 MPa contro 2,0 MPa). Sono stati prodotti provini cubici per ogni tipologia di calcestruzzo (NAC: con aggregati naturali e RAC: con aggregati riciclati) da sottoporre a prova di compressione dopo 1, 7 e 28 giorni di maturazione e provini cilindrici per le prove di resistenza a trazione indiretta, i cui esiti sono leggibili nella Tabella 92.

		Resistenza a compressione [MPa]		Resistenza a trazione [MPa]	
		NAC	NAC	NAC	RAC
Tempo di maturazione [giorni]	1	41,3	44,7	-	-
	7	56,6	63,3	-	-
	28	62,0	70,2	1,9	2,0

*Tabella 92: Resistenza meccanica in compressione e trazione per solai in calcestruzzo con aggregati naturali (NAC) ed aggregati riciclati (RAC).*

- **Conclusioni**

I risultati preliminari ottenuti sulla prestazione meccanica del calcestruzzo confezionato sostituendo l'aggregato di frantumazione naturale con calcestruzzo strutturale riciclato, confermano che la produzione di questa particolare tipologia di conglomerato per impieghi strutturali è fattibile ed economica. I dati hanno, difatti, dimostrato che la qualità del calcestruzzo riciclato determina la massima percentuale di sostituzione e, quando la classe di resistenza originale è 55 MPa, la sostituzione può essere effettuata anche a livelli del 30%. Per quanto riguarda gli elementi strutturali, le prestazioni sono risultate sempre simili e a volte anche migliori. Questo significa che il calcestruzzo riciclato da prefabbricazione è senz'altro utilizzabile per scopi strutturali purché la produzione industriale sia accuratamente controllata.

- **GIACOMO FERRARI, ANDREA MOROTTI, Prospettive d'impiego dei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati, Italia, 2008.**

L'articolo descrive uno studio svoto sulle possibilità di impiego delle materie prime provenienti dal trattamento selettivo delle macerie da costruzione e demolizione (C&D) per la realizzazione in opera di getti integrativi di calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati e destinato al completamento dei solai misti. Nella prima fase della ricerca, grazie alla disponibilità di un centro di produzione a tecnologia R.O.S.E. (Recupero Omogeneizzato degli Scarti dell'Edilizia) sono stati prodotti aggregati riciclati nelle due frazioni granulometriche 0-7 mm (media-fine) e 8-16 mm (grossa).

Successivamente, sono state realizzate 3 ricette di calcestruzzi sperimentali (solo con aggregati riciclati, solo con aggregati naturali o con aggregati misti) il cui mix-design è indicato in Tabella 93.

MISCELA	TUTTO RIC	MISTO RIC-NAT	TUTTO NAT
Acqua/cemento	0,80	0,80	0,80
Rapporto dosatura parti in peso cemento/aggregati	1/7	1/7	1/7
DOSAGGIO		Kg/m <sup>3</sup>	
Acqua	200	200	200
Cemento (CEM Tipo II 32,5R)	250	250	250
Aggregato Riciclato (0/7)	1225		
Aggregato Riciclato (8/16)	525	525	
Aggregato naturale (0/3)		788	998
Aggregato naturale (4/7)		437	390
Aggregato naturale (8/16)			467

Tabella 93: Composizione delle miscele dei calcestruzzi analizzati.

Ogni tipologia di impasto è stata caratterizzata tramite il confezionamento di 4 provini cubici di dimensioni 150 x 150 x 150 mm da sottoporre a prove di compressione; mentre relativamente alla lavorabilità i getti sono stati valutati, in termini di consistenza, attraverso l'abbassamento del cono di Abrams.

Miscela	Abbassamento al cono di Abrams (Slump) in mm
Tutto Riciclato	7
Misto Riciclato/Naturale	40
Tutto Naturale	30

Tabella 94: Consistenza dei calcestruzzi analizzati tramite cono di Abrams.

Come si può notare dai valori ottenuti, il calcestruzzo confezionato con il 100% di aggregati riciclati da demolizione presenta una lavorabilità minore rispetto alle altre due miscele, il che può essere causato dalla presenza di una maggiore quantità di inerti fini. Nelle altre due miscele, composte rispettivamente da aggregato misto (riciclato grosso, naturale fine) e da aggregato tutto naturale, la lavorabilità è dello stesso ordine di grandezza essendo lo slump anche della stessa classe di consistenza S1.

Allo scopo di valutare le differenze prestazionali espresse in termini di resistenza a compressione, da ognuna delle tre formulazioni di calcestruzzo considerate, dopo una maturazione di 28 giorni dei provini cubici realizzati, sono state eseguite le prove di riferimento operando secondo la norma UNI EN12390-3.

Nel dettaglio i risultati hanno mostrato che il calcestruzzo confezionato con il 100% di inerte naturale presenta un valore di:

- Resistenza media  $R_m$  pari a  $85 \text{ daN/cm}^2$ ;
- Deviazione standard pari a  $2.061 \text{ daN/cm}^2$ ;
- Resistenza caratteristica a compressione  $R_{bk}$  (vecchia normativa) pari a  $81 \text{ daN/cm}^2$ .

Al contrario, i valori desunti dai campioni realizzati con il 30% di aggregati riciclati grossolani (8-16 mm) risultano superiori a quelli ottenuti in precedenza, ovvero:

- Resistenza media  $R_m$  pari a  $103 \text{ daN/cm}^2$ ;
- Deviazione standard pari a  $6.00 \text{ daN/cm}^2$ ;
- Resistenza caratteristica a compressione  $R_{bk}$  pari a  $90 \text{ daN/cm}^2$ .

Tipo di inerte nelle formulazioni del calcestruzzo	Naturale	Misto	Riciclato
Resistenza media ( $\text{daN/cm}^2$ )	85	103	79
Deviazione standard ( $\text{daN/cm}^2$ )	2.061	6	18,82
Resistenza caratteristica ( $\text{daN/cm}^2$ )	81	90	39
Massa volumica media ( $\text{Kg/m}^3$ )	2091	2051	1970

Tabella 95: Risultati delle prove di compressione a rottura dei cubetti.

I risultati più scadenti hanno riguardato la serie di provini rappresentativi del conglomerato cementizio confezionato con il 100% di inerte riciclato; in questo caso la resistenza a rottura a compressione è stata di gran lunga inferiore rispetto ai valori assunti dalle altre due.

Successivamente, per determinare le prestazioni strutturali conseguibili, sono stati gettati in opera 6 travetti tralicciati del tipo 3Q con i calcestruzzi di completamento studiati e sono state eseguite su di essi prove di flessione semplice. Questa tipologia di travetto viene prodotta con una tecnologia evoluta ed un processo altamente industrializzato in cui avviene la sostituzione del fondello tradizionale con un granulato ottenuto dalla macinazione del laterizio e l'impiego di calcestruzzi controllati anziché conglomerati cementizi fluidi.

Note, quindi, le caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione e gli elementi progettuali (rappresentati rispettivamente da un'armatura a traliccio composta da  $1\varnothing 7$  superiore e  $2\varnothing 8 + 1\varnothing 10$  inferiori in acciaio ad aderenza migliorata FeB44K, e da uno strato continuo inferiore di calcestruzzo e laterizio con funzione portante come detto precedentemente) si sono determinati i domini resistenti di progetto per la sezione di figura

(eseguita con i 3 differenti tipi di calcestruzzo sperimentale) e per una “sezione modello” in cui è stato indicato dal produttore del travetto stesso un valore standard inderogabile di riferimento prestazionale minimo pari a  $R_{bk} = 250 \text{ daN/cm}^2$ .

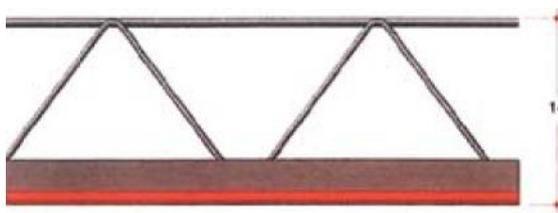


Figura 131: Schema di disposizione delle armature del travetto.

Sono stati, così, determinati i valori delle sollecitazioni ultime di progetto  $N_{rd}$ ,  $M_{rd}$  ed il momento di rottura ultimo medio ottenuto con le prove di flessione in semplice appoggio con due carichi agenti ad  $\frac{1}{3}$  della luce dal rispettivo appoggio ( $M_{ru}$ ).



Figura 132: Prova di flessione su un travetto confezionato con materiale riciclato.

	$N_{rd}$ (daN)	$M_{rd}$ (daNm)	$R_{bk}$ (daN/cm <sup>2</sup> )	$M_{ru}$ (daNm)
PROS 3Q (d=8cm)	- 14231	1417	250	
NORM (d=8cm)	- 1101	802	81	699
MISTO (d=8cm)	- 1800	836	90	700
RICICL (d=8cm)	2162	650	39	639

Tabella 96: Valori delle sollecitazioni ultime di progetto  $N_{rd}$ ,  $M_{rd}$  e di rottura  $M_{ru}$  della sezione del travetto con riferimento alle quattro tipologie di calcestruzzo studiato.

- **Conclusioni**

I risultati analitici sperimentali, se si fa riferimento allo standard prestazionale richiesto dal produttore del travetto tralicciato ed imposto da questo tramite un vincolo assegnato di resistenza caratteristica del calcestruzzo utilizzabile nei getti pari a  $R_{bk} = 250 \text{ daN/cm}^2$ , conducono ai sotto indicati parametri quantitativi di confronto se si considera pari al 100% il valore assunto da  $N_{rd}$  ed  $M_{rd}$  per questa tipologia di calcestruzzo (PROS 3Q).

	$N_{rd}$	$M_{rd}$	$R_{bk} \text{ (daN/cm}^2\text{)}$	$M_{rd} \text{ (daNm)}$
PROS 3Q	100%	100%	250	
NORM	41,87%	56,59%	81	49,32%
MISTO	45,30%	58,99%	90	49,40%
RICICL	27,87%	45,87%	39	45,09%

*Tabella 97: Valori percentuali di confronto dei parametri prestazionali  $N_{rd}$  ed  $M_{rd}$ .*

Come emerge dai parametri di confronto assunti, in ogni caso l'impiego di calcestruzzo sperimentale riciclato, misto o normale ad alto rapporto acqua/cemento, abbassa i valori delle resistenze caratteristiche secondo le percentuali sopra indicate, incidendo sulle caratteristiche prestazionali del travetto gettato in opera.