



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA

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

Rapporto di sintesi

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

Collaboratori: Alessandra Diotti, Simone Baronio

Aprile 2018

Sommario

1.	Caratteristiche dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) e degli aggregati riciclati (AR)	1
1.1.	Rifiuti da costruzione e demolizione (C&D)	1
1.2.	Aggregati riciclati (AR)	2
1.2.1.	Composizione chimica	3
1.2.2.	Rilascio di inquinanti mediante test di cessione	4
2.	Indicazioni tecniche per la produzione dell'aggregato riciclato (AR)	5
2.1.	Pretrattamenti	6
2.1.1.	Procedura di demolizione selettiva	6
2.1.2.	Selezione di frazioni specifiche	6
2.2.	Trattamenti	7
2.2.1.	Procedura di doppia frantumazione del rifiuto da C&D	7
2.2.2.	Trattamento di pulizia del rifiuto C&D	7
3.	Indicazioni tecniche per l' utilizzo dell'aggregato riciclato (AR)	8
3.1.	Calcestruzzo e manufatti cementizi	8
3.1.1.	Aspetti chimici	8
3.1.2.	Condizioni operative ottimali	10
3.1.3.	Durabilità	11
3.2.	Opere stradali e geotecniche	13
3.2.1.	Aspetti ambientali	13
3.2.2.	Condizioni operative ottimali	13
3.2.3.	Durabilità	14
4.	Certificazione dell'aggregato (AR)	15
5.	Linee guida italiane ed estere per la corretta gestione dei rifiuti C&D	16
6.	Fattibilità del recupero	16
6.1.	Fattibilità ambientale	16
6.2.	Fattibilità tecnica	17
6.3.	Fattibilità economica	17
7.	Proposte future	18

1. Caratteristiche dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) e degli aggregati riciclati (AR)

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 1: 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.

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).

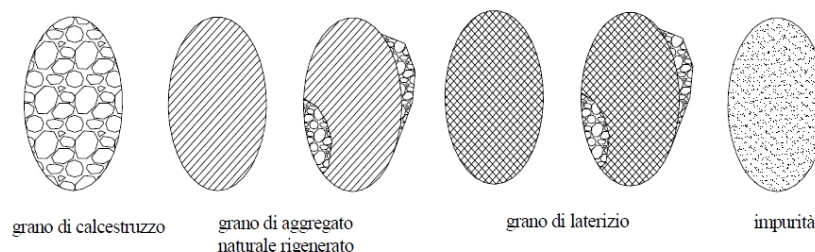


Figura 1: Tipologie di aggregati riciclati.

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.

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 invece 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.

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 **solfo** 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 perchè 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.

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.

3. Indicazioni tecniche per l'utilizzo dell'aggregato riciclato (AR)

3.1. Calcestruzzo e manufatti cementizi

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.

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 fare in modo 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.

E' 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.

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°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 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.

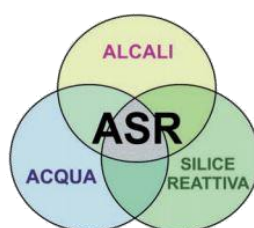


Figura 2: Alkali-Silica Reaction.

3.2. Opere stradali e geotecniche

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 compactazione in sito possa influenzare il rilascio di inquinanti all'interno dell'acqua percolata attraverso gli aggregati compattati.

In particolare si evidenzia come **prima della compactazione** 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 compactazione 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.

E' 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 compactazione); 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.

E' possibile quindi evidenziare come la compactazione 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.

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 rigidezza (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.

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.

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 uno scarso drenaggio, dovuto alla presenza di particelle bituminose. 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.

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).

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 a Portogallo, Germania, 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. 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.

6.1. 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.

6.2. 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.

6.3. 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.

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.