

Attività 2.1- Report sull'utilizzo dei materiali di scarto nel calcestruzzo

Il settore delle costruzioni è uno tra quelli che maggiormente impatta sull'ambiente: il calcestruzzo infatti, che è il materiale più usato per la fabbricazione degli edifici, comporta per la sua produzione il rilascio in atmosfera di anidride carbonica per una percentuale superiore al 8% delle emissioni globali. Per rendere maggiormente sostenibile il settore è fondamentale che i progettisti prendano scelte maggiormente rispettose dell'ambiente, garantendo una svolta "green" del settore dell'edilizia. Le scelte che si possono perseguire per raggiungere questo obiettivo sono molteplici. Il gruppo di ricerca di UNIUD intende analizzare l'eventualità di perseguire le seguenti strategie al fine ultimo di ridurre le emissioni di CO₂ nell'atmosfera:

1. Ridurre il clinker all'interno del cemento;
2. Ridurre il cemento all'interno del calcestruzzo;
3. Impiego di aggregati riciclati;
4. Ridurre il calcestruzzo nelle strutture;
5. Impiegare armature alternative.

Per ciascuno di questi punti è possibile individuare delle soluzioni che coinvolgano l'impiego di materiali di scarto, poi riciclati e, pertanto, maggiormente sostenibili. In particolare nel WP 2.1, che riguarda la "valutazione dei limiti sui materiali", verranno analizzati i punti 1., 2., e 3.; nel WP 2.2, che riguarda la "valutazione dei limiti sulle strutture", verranno analizzati i punti 4. E 5. Un primo passo è stato quello di raccogliere la normativa attualmente vigente in Italia, Europa e alcuni paesi Extra UE, al fine di porre in evidenza eventuali differenze e/o similitudini.

Introduzione

Per ridurre l'impatto delle attività umane sull'ambiente, al giorno d'oggi, si stanno sviluppando in ogni campo ricerche che consentano il contenimento della quantità di CO₂ emessa nell'atmosfera. Risulta quindi necessario condurre degli studi anche per l'ambito delle costruzioni, che non può rimanere cristallizzato su tecniche produttive e modalità esecutive ormai obsolete, che vedono coinvolti gli stessi materiali, macchinari e mezzi a partire dagli anni '50 del secolo scorso. Se per l'acciaio strutturale è già possibile riciclare il materiale quasi al 100%, non si può dire lo stesso per il calcestruzzo, che, invece, nella maggior parte dei casi viene realizzato con risorse vergini. La miscela che compone questo materiale è caratterizzata da tre fondamentali componenti: il legante, costituito dal cemento, gli inerti, che sono elementi lapidei naturali o artificiali con granulometria variabile, e l'acqua. Senza considerare le fasi di posa in opera e di trasporto, il solo processo produttivo del cemento rappresenta una percentuale dell'8% rispetto alle emissioni globali di CO₂; in particolare la fase maggiormente inquinante e che contribuisce al 60% della produzione di anidride carbonica all'interno del cementificio è quella di decarbonizzazione del calcare nella formazione del clinker. Durante questo passaggio il materiale (solitamente calcare, CaCO₃ con aggiunte di gesso) viene portato ad alte temperature, ottenendo la separazione della molecola di CaO dalla CO₂, che viene rilasciata nell'ambiente. Successivamente l'ossido di calcio viene fatto legare con altre molecole, come il biossido di silicio, al fine di formare il clinker nel suo stato finale. In un'ottica di transizione verso un'industria delle costruzioni più "green", il primo grande passo è quello di ridurre la produzione di anidride carbonica derivante dal clinker, riducendone quindi l'impiego: per perseguire questo obiettivo sono state individuate quattro principali strade da percorrere.

Una prima proposta è quella di contenere la percentuale di clinker all'interno della miscela del cemento, impiegando dei materiali alternativi con proprietà leganti più o meno spiccate in sua sostituzione, garantendo ad ogni modo delle buone prestazioni meccaniche del prodotto finito. Diversamente è possibile intervenire sulla quantità di cemento nell'impasto del calcestruzzo, che anche in questo caso viene rimpiazzato dalle cosiddette "aggiunte", ossia materiali con proprietà idrauliche. Una terza possibilità è rappresentata dall'introduzione di aggregati riciclati (inerti), di pezzatura che può variare da quella della sabbia a quella della ghiaia, nella miscela del calcestruzzo in sostituzione di quelli di origine naturale, portando ad un bilancio globalmente positivo nella produzione di CO₂. Infine l'ultima proposta è quella di ridurre il volume di calcestruzzo per la

realizzazione delle strutture, ottimizzando le dimensioni degli elementi costruttivi, nonché dei copriferri di progetto. Quest'ultima soluzione può essere perseguita secondo due diverse modalità: da un lato si può optare per una progettazione maggiormente accurata, nella quale si limitano inutili sovradiimensionamenti, seguendo formulazioni di calcolo della resistenza meno cautelative e che attingano all'intera capacità degli elementi strutturali, dall'altro è possibile adottare miscele di calcestruzzo particolarmente performanti e barre di armatura opportunamente trattate per resistere alle aggressioni esterne. In quest'ultimo caso l'obiettivo è quello di aumentare la vita nominale dell'edificio, con la possibilità di una riduzione virtuale di emissioni di CO₂, diminuendo la frequenza con la quale è necessario eseguire ulteriori operazioni di demolizione e ricostruzione. Un ulteriore vantaggio che si può ottenere è quello di ridurre il copriferro necessario a garantire la durabilità degli elementi strutturali, grazie ad una minore sensibilità rispetto ai fenomeni di corrosione da parte dell'acciaio.

Per ciascuna delle quattro alternative precedentemente descritte sono presenti delle limitazioni normative sull'impiego stesso di alcuni materiali o sulla percentuale in massa con la quale questi possono essere inseriti nella miscela. Si rende pertanto necessaria una ricerca bibliografica che analizzi, per ciascuna modalità di intervento, quanto prescritto dalla legislazione vigente. Solo a seguito di questa raccolta di dati bibliografici si potranno avanzare delle proposte secondo due diversi approcci: il primo prevedendo di seguire i limiti imposti dalla normativa, e quindi individuando soluzioni innovative immediatamente applicabili nella pratica professionale, il secondo valutando nuovi materiali e tecnologie ancora non ammessi all'interno delle leggi, ma che, a seguito di una loro revisione alla luce di ottimistici risultati sperimentali, possano essere inclusi nelle future versioni delle normative stesse. L'ultima strada che è possibile percorrere, che si può definire come la quinta scelta, è quella di impiegare materiali differenti dal calcestruzzo per la realizzazione di edifici: in particolare è possibile sfruttare a) il legno, che garantisce prestazioni elevatissime (si possono costruire edifici oltre i 9 piani in zone sismiche) e allo stesso tempo ha un impatto ambientale quasi zero (il legno infatti durante il suo accrescimento ingloba CO₂, che in un'analisi tipo LCA viene tenuto in conto con un valore negativo di emissioni), e b) utilizzare l'abbinamento composti di acciaio e calcestruzzo nei pilastri incamiciati (il combinato effetto vicendevole dei due materiali aumenta notevolmente la capacità strutturale permettendo quindi di utilizzare sezioni molto ridotte rispetto alle equivalenti in cemento armato).

1. Riduzione del clinker nel cemento

La normativa esistente in materia di cemento è la UNI EN 197, che si articola in cinque parti: nella prima vengono definite le componenti ammesse nella miscela assieme al clinker e, per ciascuna di esse, sono descritte le caratteristiche che deve possedere in termini di proprietà chimiche e meccaniche. Si individuano cinque macro-categorie di cementi, che passano da CEM-I a CEM-V: nel primo il costituente principale è il clinker, con una percentuale minima in massa del 95% (si parla in questo caso del classico cemento Portland), mentre nelle altre classi si osservano delle riduzioni della quantità di clinker in favore di altri materiali. I materiali per il quale è consentito l'uso, oltre al clinker, sono ben definiti, e sono la loppa d'altoforno, i fumi di silice, la pozzolana (che può essere sia naturale che calcinata), la cenere volante di tipo siliceo o calcareo, lo scisto calcinato e il calcare. Sono ammessi dei costituenti secondari con una percentuale massima del 5% in massa (solitamente gesso), con la funzione di migliorare alcune proprietà specifiche dell'impasto.

Tabella 1 Composizione dei cementi da UNI EN 197-1

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)	Composizione (percentuale in massa ^{a)}											Costituenti secondari	
		Costituenti principali												
		Clinker	Loppadi altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare				
					naturale	naturale calcinata	silcea	calcarea		L	LL			
		K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-M	80-88	12-20						→			0-5	
		CEM II/B-M	65-79	21-35						→				
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	11-35						-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55						-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		→	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49		→	-	-	-	-	0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.

b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.

c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi compositi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento (per esempio vedere punto 8).

Con l'emissione della parte V della normativa sono state introdotte due ulteriori tipologie di miscele, una è quella del cosiddetto “cemento composito”, che prevede l'impiego di una maggiore percentuale di costituenti diversi dal clinker, anche in combinazione tra loro (nella prima parte della normativa è consentito solamente l'impiego di uno alla volta), l'altra è quella del “cemento Portland composito”.

Tabella 2 Composizione cementi da UNI EN 197-5

Tipi principali	Denominazione dei prodotti (tipi di cemento)	Composizione (percentuale in massa) ^{a)}											Costituenti secondari	
		Costituenti principali												
		Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere Volante		Scisto calcinato	Calcare				
Nome	Denominazione	K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L ^{c)}	LL ^{c)}			
CEM II	Cemento Portland- composito ^{d)}	CEM II / C-M	50-64				-----36-50-----					0-5		
CEM VI	Cemento Composito	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5		
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5		
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	6-20	6-20	0-5		

^{a)} I valori nel prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
^{b)} Qualora utilizzati, la proporzione di fumi di silice è limitata al 6-10% in massa.
^{c)} Qualora utilizzato, la proporzione di calcare (somma di L, LL) è limitata al 6-20% in massa.
^{d)} Il numero di costituenti principali diversi dal clinker è limitato a due e questi costituenti principali devono essere dichiarati nella designazione del cemento (per gli esempi vedere il punto 6).

Infine è stata pubblicata la parte VI della norma, nella quale si introduce all'interno della lista dei materiali consentiti il "fino" derivante dalla demolizione di edifici esistenti: questo viene combinato in diversi modi, anche in relazione alle miscele definite nella parte V.

Tabella 3 Composizione cementi da UNI EN 197-6

Tipi principali	Notazione dei prodotti (tipi di cemento)	Composizione (percentuale in massa) ^{a)}											Costituenti secondari	
		Costituenti principali												
		Clinker	Frazione fine di calcestruzzo riciclati	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisti calcinati	Calcare			
Nome tipo	Notazione tipo	K	F	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L ^{c)}	LL ^{c)}		
CEM II	Cemento Portland con fini riciclati	CEM II/A-F	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-F	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Cemento Portland composito ^{d)}	CEM II/A-M	80-88	6-14	-----	-----	6-14	-----	-----	-----	-----	-----	0-5	
		CEM II/B-M	65-79	6-29	-----	-----	6-29	-----	-----	-----	-----	-----	0-5	
		CEM II/C-M	50-64	6-20	-----	-----	16-44	-----	-----	-----	-----	-----	0-5	
CEM VI	Cemento composito	CEM VI	35-49	6-20	31-59	—	—	—	—	—	—	—	0-5	

^{a)} I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
^{b)} In caso di utilizzo del fumo di silice, la proporzione del fumo di silice è limitata dal 6% al 10% in massa.
^{c)} In caso di utilizzo del calcare, la proporzione della somma di calcare e frazione fine di calcestruzzo riciclati (somma di L, LL e F) è limitata al 35% in massa.
^{d)} Il numero di costituenti principali diversi dal clinker è limitato a due e tali costituenti principali devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento (per esempio, vedere punto 6). In caso di utilizzo di entrambi F ed (L o LL) nella composizione, il numero di costituenti principali diversi dal clinker è limitato a tre e tali costituenti principali devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento.

La normativa Italiana in materia di costruzioni D.M.17/01/2018 (NTC) consente integralmente l'impiego delle miscele di cemento che sono indicate all'interno della UNI EN 197 e pertanto non vi sono ulteriori limitazioni.

In estrema sintesi, combinando correttamente i materiali che compongono la miscela del cemento, si può ridurre il contenuto di clinker dal 95% al 5% in massa: risulta evidente il forte potenziale che può avere il corretto studio della miscela sulla produzione di CO₂ a parità di quantità di legante. Fonti da letteratura e articoli scientifici segnalano un differente comportamento da parte del calcestruzzo al variare della tipologia di cemento adottato, non solamente in termini di proprietà meccaniche di resistenza, ma anche per la lavorabilità e per la durabilità del materiale stesso: risulta pertanto necessaria rigorosa campagna sperimentale per valutare pregi e difetti di ciascuna.

Per tutti i cementi, indipendentemente dalla classe di appartenenza, devono essere soddisfatti dei requisiti per le proprietà meccaniche, chimiche e di durabilità.

Al capitolo 7.1 sono definite le caratteristiche meccaniche che deve possedere la miscela del cemento dopo l'indurimento, in particolare riguardanti la resistenza a 7 e 28 giorni e la velocità di presa, differenziati secondo la capacità di sviluppare una resistenza iniziale ordinaria (N), elevata (R) o bassa (L). Si riporta di seguito la tabella che riassume i requisiti:

Tabella 4 Proprietà dei cementi da UNI EN 197-1

Classe di resistenza	Resistenza a compressione MPa			Tempo di inizio presa	Stabilità (espansione)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata		
	2 giorni	7 giorni	28 giorni		
32,5 L ^{a)}	-	≥12,0	≥32,5	≤52,5	≥75
32,5 N	-	≥16,0			
32,5 R	≥10,0	-			
42,5 L ^{a)}	-	≥16,0			
42,5 N	≥10,0	-			
42,5 R	≥20,0	-			
52,5 L ^{a)}	≥10,0	-			
52,5 N	≥20,0	-			
52,5 R	≥30,0	-			

a) Classe di resistenza definita solo per i cementi CEM III.

Al capitolo 7.3 sono indicati i limiti di tipo chimico, che riguardano, come si deduce dalla seguente tabella, la perdita al fuoco, il residuo insolubile, il tenore in solfato, il tenore in cloruro e la pozzolanicità.

Tabella 5 Proprietà dei cementi da UNI EN 197-1

1	2	3	4	5
Proprietà	Riferimento della prova	Tipo di cemento	Classe di resistenza	Requisiti ^{a)}
Perdita al fuoco	EN 196-2	CEM I CEM III	Tutte	≤5,0%
Residuo insolubile	EN 196-2 ^{b)}	CEM I CEM III	Tutte	≤5,0%
Tenore in solfato (come SO ₃)	EN 196-2	CEM I	32,5 N	≤3,5%
		CEM II ^{c)}	32,5 R 42,5 N	
		CEM IV CEM V	42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤4,0%
		CEM III ^{d)}	Tutte	
Tenore in cloruro	EN 196-2	Tutti ^{e)}	Tutte	≤0,10% ^{f)}
Pozzolanicità	EN 196-5	CEM IV	Tutte	Esito positivo della prova

a) I requisiti sono espressi in percentuale in massa del cemento finale.
 b) Determinazione del residuo insolubile in acido cloridrico e carbonato di sodio.
 c) I cementi tipo CEM II/B-T e CEM II/B-M con un tenore di T >20% possono contenere fino al 4,5% di solfato (come SO₃) per tutte le classi di resistenza.
 d) Il cemento tipo CEM III/C può contenere fino al 4,5% di solfato.
 e) Il cemento tipo CEM III può contenere più dello 0,10% di cloruri, ma in tale caso si deve dichiarare il tenore massimo in cloruro sull'imballaggio e/o sui documenti di trasporto.
 f) Per applicazioni nel calcestruzzo precompresso, i cementi possono essere prodotti con un requisito inferiore. In tale caso il valore 0,10% deve essere sostituito da detto minore valore che deve essere dichiarato nei documenti di trasporto.

Al capitolo 7.4 sono indicati i requisiti di durabilità che sono necessari per un calcestruzzo ordinario resistente ai solfati: come si evince dalla seguente tabella i parametri considerati sono il tenore di solfato (come SO₃), il contenuto di C₃A del clinker e la pozzolanicità.

Tabella 6 Proprietà dei cementi da UNI EN 197-1

1	2	3	4	5
Proprietà	Riferimento della prova	Tipo di cemento	Classe di resistenza	Requisiti ^{a)}
Tenore in solfato (come SO ₃)	EN 196-2	CEM I-SR 0	32,5 N	≤3,0%
		CEM I-SR 3 CEM I-SR 5 ^{b)} CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	32,5 R 42,5 N 42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤3,5%
C ₃ A del clinker ^{c)}	EN 196-2 ^{d)}	CEM I-SR 0	Tutte	= 0%
		CEM I-SR 3		≤3%
		CEM I-SR 5		≤5%
	- ^{e)}	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	Tutte	≤9%
Pozzolanicità	EN 196-5	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR		Esito positivo della prova a 8 giorni

a) I requisiti sono espressi in percentuale in massa del cemento finale o del clinker come definito nel prospetto.
 b) Per applicazioni specifiche i cementi CEM I-SR 5 possono essere prodotti con maggior tenore in solfato. In tal caso il valore numerico del presente requisito per un maggior tenore in solfato deve essere dichiarato nei documenti di trasporto.
 c) Il CEN/TC 51 sta sviluppando un metodo di prova per la determinazione del tenore in C₃A del clinker da un'analisi del cemento finale.
 d) Nel caso specifico del CEM I, è consentito calcolare il tenore in C₃A del clinker dall'analisi chimica del cemento. Il tenore in C₃A deve essere calcolato mediante la formula: C₃A = 2,65 A - 1,69 F (vedere punto 5.2.1).
 e) Fino alla definizione del metodo di prova, il tenore in C₃A del clinker (vedere punto 5.2.1) deve essere determinato sulla base dell'analisi del clinker come parte del controllo di produzione in fabbrica eseguito dal produttore (vedere punto 4.2.1.2, della EN 197-2:2000).

In questa prima fase dello studio è stato particolarmente approfondito quanto indicato dalla normativa per l'impiego di materiali di scarto da processi produttivi di taglio della pietra naturale e di riciclati fine di calcestruzzo.

Una polvere ottenuta dal taglio di pietra naturale può essere riconosciuta all'interno della categoria di "calcare", secondo la UNI EN 197-1, se rispetta la seguente limitazione:

- Il tenore del carbonato di calcio (CaCO₃) deve essere uguale o superiore al 75% in massa;
- Il tenore di argilla (misurato con la prova al blu di metilene in conformità alla EN933-9) non deve essere maggiore di 1,2g/100g;
- Il tenore di carbonio totale (TOC) deve soddisfare uno dei seguenti criteri:
 - 1) LL: non deve essere superiore allo 0,2% in massa;
 - 2) L: non deve essere superiore allo 0,5% in massa.

Secondo la classificazione precedentemente riportata, in base al materiale impiegato e alle sue caratteristiche, la sostituzione di clinker in maggior percentuale è consentita con l'uso del CEMII/B-L e CEMII/B-LL.

Nell'ipotesi di impiegare materiale riciclato, inteso come macinato fine risultante dalla demolizione di edifici in calcestruzzo, si può fare riferimento alla UNI EN 197-6, secondo la quale, volendo massimizzare l'impiego di materiale riciclato, si può ricorrere ai CEMII/B-M e CEMII/C-M. I requisiti che il materiale deve diversi dal cemento e la presenza di cloruri o solfati.

Si ritiene idoneo il materiale riciclato se vengono rispettati i limiti imposti dalle seguenti categorie:

- Rcu₉₀: presenza di più del 90% in massa di calcestruzzo, prodotti di calcestruzzo, malta, elementi per muratura di calcestruzzo, aggregato non legato, pietra naturale, aggregato legato idraulicamente;
- Rb₁₀: presenza inferiore al 10% in massa di elementi per muratura di laterizio, elementi di silicato di calcio, calcestruzzo aerato non galleggiante;
- Ra₁: presenza inferiore al 1% in massa di materiali bituminosi;
- FL₂: presenza inferiore a 2 cm³/kg in volume di materiale galleggiante;
- XR_{g1}: presenza inferiore a 1% in massa di vetro e altri materiali;

La frazione di calcestruzzo riciclato deve rispettare i seguenti requisiti aggiuntivi:

- a) Contenuto di TOC inferiore allo 0,8% in massa;
- b) Contenuto di solfato (come SO₃) inferiore al 2% in massa;
- c) Contenuto di argilla (da prova al blu di metilene) inferiore a 1,2g/100g.

In termini di proprietà del cemento ottenuto da materiali riciclati, i limiti imposti sono:

- Contenuto di solfato (come SO₃) inferiore al 4% in massa (come valore caratteristico);
- Contenuto di cloruro inferiore allo 0,1% in massa.

1.1 Conclusioni

Dopo aver analizzato il quadro normativo Europeo si può concludere che sono emersi i seguenti limiti all'uso di materiali di scarto in sostituzione del clinker:

- Il materiale deve rientrare all'interno di una delle sei categorie comprese nella normativa UNI EN 197;
- La percentuale di sostituzione non può superare quelle strettamente indicate nella UNI EN 197.

2. Riduzione del cemento nel calcestruzzo

Quando si parla di calcestruzzo si intende quella miscela di legante (cemento), acqua e inerti che mescolati assieme fanno presa e induriscono, maturando resistenza nel tempo. Le proprietà di questo materiale variano fortemente sulla base delle componenti che si scelgono per la sua realizzazione e del loro proporzionamento: la normativa di riferimento per il calcestruzzo e per la sua composizione è la UNI EN 206. Obiettivo del presente studio è quello di ridurre il quantitativo di cemento all'interno del calcestruzzo, ottenendo un risparmio della quantità di clinker necessaria per la realizzazione di una struttura: questo è possibile facendo uso di quelle che la normativa definisce "aggiunte" all'impasto. Le aggiunte sono dei componenti inorganici finemente selezionati che possono essere di due tipi: inerti, che quindi non reagiscono se posti a contatto con acqua, e pozzolanici o ad attività idraulica latente, che reagiscono a contatto con l'acqua; il primo tipo viene definito "aggiunta di tipo I", mentre il secondo è definito "aggiunta di tipo II". Sfruttando le proprietà di questi materiali è possibile pertanto sostituire una parte del cemento all'interno della miscela, senza alterare eccessivamente le caratteristiche finali in termini di resistenza del calcestruzzo. Per poter intervenire attivamente sulla quantità di cemento dell'impasto è necessario che le aggiunte siano riconosciute come di tipo II: sono già presenti all'interno di un elenco fornito al capitolo 5 della normativa i materiali che si possono impiegare con questa funzione. Uno di questi è il "fumo di silice", che, per definizione fornita dalla UNI EN 13263-1, è ottenuto dalla riduzione di quarzo ad elevata purezza con carbone in forni ad arco elettrico nella produzione di silicio, ed è caratterizzato dalle seguenti proprietà:

- Contenuto di SiO_2 maggiore dell'85% in massa;
- Contenuto di silicio elementare inferiore allo 0,4% in massa;
- Contenuto di CaO inferiore all'1% in massa;
- Contenuto di solfato (come SO_3) inferiore al 2% in massa;
- Contenuto di cloruro come Cl^- inferiore allo 0,3% in massa;
- Perdita al fuoco con tempo di calcinazione di 1h inferiore al 4% in massa;
- Superficie specifica dei fumi trattati superiore o uguale a $15 \text{ m}^2/\text{g}$ e inferiore o uguale a $35 \text{ m}^2/\text{g}$;
- Contenuto in sostanza secca non deve scostarsi di più del 2% (in più o in meno) dalla massa in sospensione;
- Indice di attività superiore o uguale al 100% per provini con maturazione di 28gg.

Nell'ipotesi di impiegare ceneri ottenute dalla combustione di biomasse (come per esempio la lolla del riso), che possiedono proprietà conformi a quelle del fumo di silice è necessario prevedere una loro inclusione all'interno della normativa sotto tale definizione, oppure si dovrà procedere con il superamento di un iter per il riconoscimento delle sostanze proposte dal presente studio all'interno della lista dei materiali consentiti dalla normativa.

L'impiego di un'aggiunta di tipo II, conformemente alla UNI EN 206, avviene attraverso il metodo k: considerando una quantità totale di legante c'(definito a priori per rispettare i requisiti di resistenza e durabilità), che nel caso di miscele ordinarie è pari alla quantità di cemento c, in presenza di aggiunte di tipo II, viene calcolata come $c' = c + k \times \text{aggiunta}$ (k sempre minore di 1). Il coefficiente k è fornito dalla normativa per i materiali per i quali è consentito l'utilizzo, mentre, nel caso di introduzione di nuove soluzioni, il calcolo della costante deve essere svolto sulla base di studi sperimentali. In particolare, al punto 5.2.5.2.3 della normativa è consigliato, per il fumo di silice, un valore k pari a 0,6.

2.1 Conclusioni

Dopo aver analizzato il quadro normativo Europeo si può concludere che sono emersi i seguenti limiti all'uso di materiali di scarto in sostituzione del cemento:

- Impiegare materiali già compresi all'interno della lista fornita dalla UNI EN 206 come aggiunta di "Tipo II". In questo caso, conformemente alle indicazioni fornite dalla normativa, è possibile applicare la sostituzione del cemento secondo il "metodo k";
- Risulta fondamentale verificare che i materiali proposti soddisfino le caratteristiche per essere riconosciuti all'interno dei materiali della UNI EN 206 (per esempio sono da rispettare i limiti della UNI EN 13263-1 per rientrare nella categoria dei "Fumi di silice");
- I materiali non compresi nella lista della UNI EN 206 non sono ammessi e, volendo utilizzarli come sostitutivi del cemento, vanno certificati e aggiunti alla lista.

3. Impiego di aggregati riciclati

Gli aggregati rappresentano lo scheletro della miscela del calcestruzzo, influenzando fortemente la sua resistenza meccanica e alterandone la durabilità. Tuttora nella pratica professionale vengono generalmente prescritti aggregati naturali, solitamente da cava o da sghiacciamento di fiumi, secondo fusi granulometrici standard. In un'ottica di riduzione del consumo di risorse naturali e di riciclo di materiali che diversamente diventerebbero "rifiuti", è necessario considerare la possibilità di impiegare come inerti i prodotti della demolizione delle strutture in calcestruzzo armato. Attualmente la normativa italiana sulle costruzioni NTC2018 consente l'impiego di aggregati riciclati da calcestruzzo, purchè vengano soddisfatte le caratteristiche indicate nelle UNI EN 8520-1 e UNI EN 8520-2.

Tutti i materiali che provengono dalla costruzione e dalla demolizione die edifici sono categorizzati come "rifiuti" e pertanto per poter procedere con un secondo utilizzo è necessario che vi sia la cessazione dello stato di "rifiuto" tramite l'applicazione del Decreto del Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica 28 giugno 2024, n.127. Quest'ultimo definisce le categorie di aggregato che possono essere prese in considerazione e gli scopi per i quali il materiale può essere recuperato: in ogni caso deve essere sottoposto a controlli di vario tipo per attestarne la qualità. Cessata la qualifica di "rifiuto", come tutti i materiali da costruzione, l'aggregato riciclato deve essere marcato CE e quindi venire sottoposto alle prove previste per gli aggregati dalla UNI EN 12620, superando con esito positivo tutti i controlli.

Al capitolo 11.2.9.2 del D.M.17/01/2018 viene riportata la seguente tabella con i valori massimi di sostituzione di aggregato naturale con quello riciclato:

Tabella 7 Massime percentuali di sostituzione dell'aggregato naturale da NTC 2018

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%

Per calcestruzzi comunemente impiegati, come possono essere i C30/37, il limite superiore di sostituzione indicato è pari al 30%; facendo riferimento alla UNI EN 11104 sono fornite delle indicazioni maggiormente restrittive:

Tabella 8 Massime percentuali di sostituzione di aggregato naturale da UNI EN 206

Tipo di aggregato riciclato	Classi di esposizione			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Tutte le altre classi di esposizione ^{a)}
Tipo A: $(Rc_{90}, Rcu_{95}, Rb_{10-}, Ra_{1-}, FL_{2-}, XRg_{1-})$	50%	30%	30%	0%
Tipo B^{b)}: $(Rc_{50}, Rcu_{70}, Rb_{30-}, Ra_{5-}, FL_{2-}, XRg_{2-})$	50%	20%	0%	0%
a) Gli aggregati riciclati di tipo A di origine nota possono essere utilizzati nelle classi di esposizione alle quali era destinato il calcestruzzo originale con una percentuale di sostituzione massima del 30%. b) Gli aggregati riciclati di tipo B non dovrebbero essere utilizzati nel calcestruzzo con classi di resistenza a compressione >C30/37.				

In questo caso infatti la percentuale massima di sostituzione dell'aggregato naturale è funzione anche della classe di esposizione del calcestruzzo e della percentuale di riciclato da calcestruzzo sulla massa totale dell'aggregato riciclato.

Si riporta di seguito la descrizione fornita dalla UNI EN 12620 al capitolo 5.8 per le tipologie di aggregati riciclati:

Tabella 9 Classificazione aggregati riciclati da UNI EN 12620

Costituente	Contenuto Percentuale in massa	Categoria
Rc	≥90	Rc ₉₀
	≥80	Rc ₈₀
Rc + Ru	≥70	Rc ₇₀
	≥50	Rc ₅₀
Rb	<50	Rc _{Dichiarato}
	Nessun requisito	Rc _{NR}
Ra	≥95	Rcu ₉₅
	≥90	Rcu ₉₀
X + Rg	≥70	Rcu ₇₀
	≥50	Rcu ₅₀
FL	<50	Rcu _{Dichiarato}
	Nessun requisito	Rcu _{NR}
Rb	≤10	Rb ₁₀₋
	≤30	Rb ₃₀₋
Ra	≤50	Rb ₅₀₋
	>50	Rb _{Dichiarato}
Ra	Nessun requisito	Rb _{NR}
	≤1	Ra ₁₋
X + Rg	≤5	Ra ₅₋
	≤10	Ra ₁₀₋
X + Rg	≤0,5	XRg _{0,5-}
	≤1	XRg ₁₋
X + Rg	≤2	XRg ₂₋
	Contenuto cm ³ /kg	
FL	≤0,2 ^{a)}	FL _{0,2-}
	≤2	FL ₂₋
FL	≤5	FL ₅₋

a) La categoria ≤0,2 è destinata solo ad applicazioni speciali che richiedono alta qualità di finitura superficiale.

Costituente	Descrizione
Rc	Calcestruzzo, prodotti di calcestruzzo, malta Elementi di calcestruzzo per muratura
Ru	Aggregato non legato, pietra naturale Aggregato legato idraulicamente
Rb	Elementi di laterizio per muratura (mattoni e piastrelle) Elementi di silicato di calcio per muratura Calcestruzzo aerato non galleggiante
Ra	Materiali bituminosi
FL	Materiale galleggiante in volume
X	Altro: Coesivo (cioè argilla e terreno) Vari: metalli (ferrosi e non ferrosi) Legno non galleggiante, plastica e gomma Intonaco di gesso
Rg	Vetro

L'aggregato grosso riciclato con elevata percentuale di calcestruzzo (superiore al 90% in massa) possiede delle ottime caratteristiche fisico-meccaniche, in quanto solitamente è caratterizzato da una forma sferoidale, non è gelivo (non assorbe grandi quantità di acqua) e garantisce una buona resistenza a compressione: si può pertanto ipotizzare che sia possibile svolgere prove su calcestruzzi con percentuali crescenti di questo tipo di inerte. Ulteriore obiettivo è quello di avviare una campagna sperimentale su miscele che includano aggregati a minore percentuale di calcestruzzo, che quindi richiedano una minor precisione nella demolizione di edifici esistenti e che rendano più facilmente reperibile il materiale da impiegare nella costruzione delle strutture.

All'interno della normativa europea Eurocodice 2 UNI EN 1991-1-1:2024 è presente un annesso specifico per l'impiego di aggregati riciclati nella produzione del calcestruzzo: Annex N. In aggiunta a quanto specificato nel primo punto, viene indicato che nel caso di calcestruzzi con percentuale di sostituzione dell'aggregato riciclato superiore a quella massima proposta dalla norma UNI EN 206, è possibile prendere in considerazione come proprietà di progetto quelle derivanti da prove di laboratorio sul materiale. Per calcestruzzi con aggregato riciclato è quindi possibile, a seconda della percentuale di sostituzione dell'aggregato tradizionale, definire le proprietà da adottare nel calcolo secondo la seguente classificazione:

- Rapporto di sostituzione α_{RA} inferiore al 20%: non ci sono variazioni nelle proprietà del materiale finale;
- Rapporto di sostituzione compreso tra 20 e 40%: si adottano i valori proposti dalla tabella N.10 (riportata di seguito), oppure si definiscono tramite prove sperimentali;
- Rapporto di sostituzione superiore al 40%: si impiegano le formulazioni secondo la tabella N.111, valutate tramite prove sperimentali su prove su un campione di materiale.

Tabella 10 Calcolo delle proprietà di calcestruzzi con inerte riciclato in percentuale tra 20 e 40% da UNI EN 1991-1-1:
2024

Reference to original clause	Values and terms to be modified for recycled aggregates concrete	Provisions and formulae for recycled aggregates concrete ^a
5.1.3(3)	Maximum compressive strength	$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$
Table 5.1	Concrete tensile strength $f_{ctm}, f_{ctk,0,05}, f_{ctk,0,95}$	Determine by testing if relevant. Alternatively may be used: $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$
5.1.4	Modulus of elasticity E_{cm}	Determine by testing if relevant. Alternatively, the following may be used: $E_{cm} = \eta_{ERA} \cdot f_{cm}^{1/3}$ where $\eta_{ERA} = k_E \cdot (1 - 0,25 \cdot \alpha_{RA})$.
5.1.5(2), Table 5.2	Creep coefficient	Determine by testing if relevant. Alternatively the creep coefficient for basic and drying creep should be multiplied by a factor $\eta_{cRA} = 1 + 0,6 \cdot \alpha_{RA}$.
5.1.5(4), Table 5.3	Shrinkage strain	Determine by testing if relevant. Alternatively the basic and drying shrinkages should be multiplied by a factor $\eta_{shRA} = 1 + 0,8 \cdot \alpha_{RA}$.
5.1.6(3)	Stress-strain relationship	Multiply in 5.1.6(3), Formulae (5.9) and (5.10) the values ε_{c1} and ε_{cu1} respectively, by $\eta_{ec} = 1 + 0,33 \cdot \alpha_{RA}$: $\varepsilon_{c1} (\%) = \eta_{ec} \left(0,7 f_{cm}^{\frac{1}{3}} \right) \leq 2,8 \%$ $\varepsilon_{cu1} (\%) = \eta_{ec} \left(2,8 + 14 \left(1 - \frac{f_{cm}}{108} \right)^4 \right) \leq 3,5 \%$
5.1.6(5)	Density	$\rho_c = 2\,500 - 220\alpha_{RA}$
Table 6.3 (NDP), Table 6.4 (NDP)	Minimum cover $c_{min,dur}$ due to durability requirement	Determine ERC by testing if relevant. For concrete including recycled aggregate, the same minimum cover depth for durability $c_{min,dur}$ applies provided the material pertains the same exposure resistance class (ERC) as concrete including natural aggregate only. Adaptation of the limiting values and/or performance thresholds ensuring compliance with ERCs for concrete including recycled aggregate are given in EN 206 complemented by the provisions valid in the place of use. If the ERC is not determined, the values of $c_{min,dur}$ given in 6.5.2.2 should be increased by +5 mm in case of exposure classes XC2, XC3 and XC4, and by +10 mm in case of all XD/XS-exposure classes.
8.2.1(4) 8.2.2(2)	Shear resistance of members not requiring design shear reinforcement	Shear strength without shear reinforcement: Multiply in 8.2.1(4), Formula (8.20) and in 8.2.2(2), Formula (8.27) by $\eta_\tau = 1 - 0,2 \cdot \alpha_{RA}$.

Tabella 11 Calcolo delle proprietà di calcestruzzi con inerte riciclato in percentuale superiore a 40% da UNI EN 1991-1-1: 2024

Reference to original clause	Values and terms to be modified for recycled aggregates concrete	Provisions and formulae for recycled aggregates concrete ^a
Table 9.3	Simplified deflection control by span/depth-ratio	Span/depth ratios should be multiplied by the coefficient $1/(1 + 0.12 \cdot \alpha_{RA})$.
9.3.4(3)	General method for deflection calculations	$\zeta = 1 - \beta_{tRA} \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \geq 0$ with $\beta_{tRA} = 1,0$ for a single short term loading and $\beta_{tRA} = 0,25$ for sustained loads or many cycles of repeated loading.
B.5(1)	Creep coefficient	Determine by testing if relevant. Alternatively the creep coefficient for basic and drying creep should be multiplied by a factor $\eta_{ccRA} = 1 + 0,6 \cdot \alpha_{RA}$ (high dispersion of the results).
B.6(1)	Shrinkage strain	Determine by testing if relevant. Alternatively the basic and drying shrinkages should be multiplied by a factor $\eta_{shRA} = 1 + 0,8 \cdot \alpha_{RA}$ (high dispersion of the results).

^a In Formulae is α_{RA} the substitution rate of recycled concrete aggregates (varying from 0 to 1):

$$\alpha_{RA} = \frac{\text{quantity of fine and coarse recycled aggregates}}{\text{total quantity of aggregates}}$$

Come si evince dalla tabella, la normativa penalizza l'impiego del riciclato imponendo delle riduzioni sulla resistenza degli elementi strutturali proporzionali alla percentuale di sostituzione dell'aggregato naturale con quello riciclato. Un'ulteriore riduzione della prestazione del materiale è imposta in termini di durabilità, poiché se non è definita la ERC (classe di resistenza all'esposizione), si prevede un incremento del coprifero minimo rispetto a quello del calcestruzzo con aggregati naturali. Risulta pertanto necessario uno studio approfondito che consideri la resistenza di elementi strutturali con alta percentuale di sostituzione con calcestruzzo riciclato, riducendo le forti penalizzazioni attualmente imposte. Si sono analizzate anche le prescrizioni previste da altre normative europee (austriaca e tedesca) ed extra-europee (cinese, giapponese e canadese)

a) Normativa austriaca

Rispetto alla normativa italiana, in quella austriaca sono presenti alcune differenze non sostanziali, che verranno evidenziate nel testo che segue. Una prima variazione è presente nella definizione delle tipologie di aggregato riciclato, in particolare per la normativa italiana si definisce un Tipo A, che corrisponde alle categorie RB-A1 (calcestruzzo da prefabbricati) e RB-A2 (calcestruzzo riciclato generico) per quella austriaca, e un tipo B che corrisponde a RH-B in Austria. Nella normativa italiana non viene specificato un effettivo limite per l'impiego di aggregato fine, mentre per quella austriaca i limiti di utilizzo sono specificati sia per l'aggregato riciclato grosso che per quello fine. Si riporta una tabella riassuntiva nella quale vengono messe a confronto le due normative.

CLASSE CALCESTRUZZO	MASSIMA CLASSE DI ESPOSIZIONE	ITALIA	AUSTRIA
C8/10	X0	100 % TIPO A	100% RB-A1 100% RB-A2
		100% TIPO B	75% RH-B
C12/15	X0	60 % TIPO A	100% RB-A1 100% RB-A2
		0% TIPO B	75% RH-B
C25/30	XC2	30 % TIPO A	50% RB-A1 50% RB-A2
		0% TIPO B	35% RH-B
C30/37	XC3	30 % TIPO A	50% RB-A1 50% RB-A2
		0% TIPO B	0% RH-B
C30/37	XF2	20 % TIPO A	30% RB-A1 0% RB-A2
		0% TIPO B	0% RH-B
C32/40	XC4	20 % TIPO A	50% RB-A1 30% RB-A2
		0% TIPO B	0% RH-B
C40/50	XC4	20 % TIPO A	50% RB-A1 30% RB-A2
		0% TIPO B	0% RH-B
C45/55	XF2	20 % TIPO A	0% RB-A1 0% RB-A2
		0% TIPO B	0% RH-B

È possibile osservare come nella normativa italiana ci sia una minore percentuale di riduzione per tutte le classi di resistenza, l'impiego del riciclato è concesso per una maggiore variabilità delle classi di esposizione e di resistenza, raggiungendo anche la classe XF. Al contrario la normativa austriaca consente di impiegare materiali riciclati in quantità molto maggiori per classi di resistenza più modeste e per ambienti poco aggressivi.

b) Normativa tedesca

La normativa tedesca di riferimento per l'impiego di aggregati riciclati è la DIN 4226-101, oltre che la norma europea Eurocodice 2. Il limite imposto è pari alla classe C30/37 per l'impiego di aggregato riciclato, che deve essere solamente di tipo I o di tipo II (classificazione descritta nei precedenti paragrafi) con percentuali variabili a seconda della classe di esposizione.

Classe di esposizione	Tipo I	Tipo II
XC1-XC4	45%	35%
XF1-XF3	35%	25%
XA1	25%	25%

c) Normativa cinese

Sulla base della qualità dell'aggregato, secondo la normativa cinese è possibile sostituire aggregato riciclato di tipo I per tutte le classi di resistenza (aggregato composto per il 98% da calcestruzzo), di tipo II per resistenze inferiori a C32/40 e di tipo III per resistenze inferiori a C20/25. Non viene invece consentito l'uso dell'aggregato riciclato per calcestruzzi in ambienti sottoposti a cicli di gelo e disgelo e nel caso di precompressi. La normativa consiglia di utilizzare aggregato riciclato in percentuale non superiore al 50%, con un massimo del 100% nel caso del tipo I; si sconsiglia invece l'impiego di aggregato riciclato di bassa qualità (tipo III).

d) Normativa giapponese

La normativa giapponese JIS-5021, JIS-5022 e JIS-5023 definisce tre diverse tipologie di aggregato riciclato, rispettivamente H, M e L (secondo un ordine decrescente in termini di qualità del materiale). Per la prima di esse consente l'utilizzo senza limitazioni rispetto alla classe di esposizione e alla resistenza (fino a 45 MPa); per la seconda è necessario che l'ambiente non sia soggetto a cicli di gelo e disgelo, che la classe di resistenza (secondo gli standard locali) non superi i 36 MPa e che lo slump non superi i 180 mm; per la terza non ci devono essere ambienti con possibili aggressività nei confronti del calcestruzzo (XC0) e la massima classe di resistenza è quella associata ai 24 MPa. La

differenza tra le tre tipologie di aggregato risiede nel fatto che il tipo H è aggregato riciclato da calcestruzzo nel quale è stata rimossa completamente la matrice cementizia, il tipo M costituito dal calcestruzzo con una percentuale di impurità massima del 2% e tipo L, con impurità massima pari al 3%.

e) Normativa canadese

Secondo la normativa canadese è possibile impiegare aggregati riciclati da calcestruzzo in percentuale massima del 30% senza modifiche rispetto alle resistenze garantite da miscele tradizionali. A seconda della qualità dell'aggregato ottenuto è possibile usare il prodotto finito per tutte le classi di esposizione (per alta qualità del riciclato) oppure con limitazione delle classi di esposizione per le quali può essere impiegato (bassa qualità del riciclato).

3.1 Conclusioni

Sulla base di uno studio svolto da A.T.E.C.A.P. nel 2018 sono emerse diverse problematiche relative all'uso dell'aggregato riciclato nel confezionamento del calcestruzzo nella zona Alpina. Si elenca di seguito una sintesi di quanto scritto:

- Da parte dei progettisti e delle imprese di costruzione non vi è sufficiente utilizzo di calcestruzzo con materiale riciclato tale da avviare delle produzioni continuative. Questo fattore è dovuto da un lato da una carenza di conoscenza di prodotti sostenibili da parte dei progettisti e dall'altro da una assenza di normativa che imponga l'impiego di riciclati neppure in minima quantità;
- Non sono state svolte sufficienti sperimentazioni che attestino il comportamento del calcestruzzo contenente aggregato riciclato nel tempo e pertanto non vi è un'esatta certezza sulla durabilità e sulle prestazioni di questi materiali. In questo caso, per cercare di ovviare a questa problematica verranno sviluppate all'interno del presente progetto delle campagne di prova su calcestruzzi con inerti provenienti da riciclo da costruzione e demolizione;
- Spesso nelle demolizioni non c'è selezione dei materiali e pertanto non vi è offerta di aggregato riciclato con una qualità sufficiente per riuscire a rispettare i requisiti da Normativa. Il mercato non rende sufficientemente redditizio il riutilizzo dei materiali da demolizione tanto da giustificare dei processi di selezione dei materiali accurati e precisi. Se la normativa rendesse obbligatorio l'impiego di riciclato all'interno di tutte le miscele di calcestruzzo ci sarebbe una crescente domanda di questo materiale, con un conseguente aumento del suo prezzo, tale da incentivare un'accurata selezione dei rifiuti in fase di demolizione degli edifici;
- Per l'utilizzo dell'aggregato riciclato è fondamentale che il materiale sia provvisto di marcatura CE: sul mercato non risultano presenti (o sono troppo poco numerosi) i produttori dotati di questa certificazione.

Alla luce delle problematiche sottolineate, molti produttori di calcestruzzo non sviluppano ricerca nell'ambito dell'individuazione di nuove miscele che includano aggregati riciclati e che allo stesso tempo garantiscono una sufficiente resistenza: sarà quindi un obiettivo del presente studio sviluppare delle possibili miscele con presenza di aggregato riciclato che garantiscono elevate prestazioni meccaniche. Un ultimo aspetto che non è da trascurare è legato al costo dei materiali, infatti nella zona del Nord-Est dell'Italia è presente un'elevata disponibilità di aggregato naturale di elevatissima qualità (proveniente da sghiaiamento torrenti) e a prezzi economicamente vantaggiosi e pertanto impiegare aggregato riciclato comporta un incremento del costo del materiale del 10%. Si ritiene che solamente con una presa di posizione da parte dell'Ente Normatore, che imponga percentuali minime di riciclato all'interno delle miscele, sia possibile mutare la situazione attuale.

È possibile sfruttare materiali riciclati non solamente ad uso strutturale, ma anche per scopi non strutturali, in particolare è possibile considerare l'impiego di misti cementati per la formazione di sottofondi stradali. Il riutilizzo dei sottoprodotti industriali nella costruzione stradale rappresenta un'alternativa a due questioni rilevanti: il grave problema relativo allo smaltimento di questi rifiuti e

la necessità di cercare tipi alternativi di materiali litici, rispetto ai materiali convenzionali utilizzati per le infrastrutture stradali. Tuttavia, non c'è ancora un ampio consenso sul riciclo dei materiali di scarto poiché le loro proprietà meccaniche non sono ben note e completamente comprese. Inoltre, tali materiali rappresentano un potenziale problema ambientale, che deve essere indagato e verificato caso per caso. Secondo recenti studi è possibile realizzare misto cementato per fondazioni interamente sfruttando aggregato riciclato. Tali miscele devono essere densificate per raggiungere la massima resistenza, garantita dall'intreccio dei granuli, dopo la compattazione. Il legante idraulico, ossia il cemento, deve semplicemente garantire, nel tempo, la configurazione compatta tra i granuli di aggregato ottenuta durante il processo di densificazione (Pasetto e Baldo, 2010). Questa tecnologia è tipicamente utilizzata per gli strati di fondazione di pavimentazioni autostradali e stradali. Date le significative profondità coinvolte, notevoli quantità di rifiuti possono essere riciclate. Una delle alternative che è possibile prendere in considerazione è rappresentata sabbia di fonderia di scarto, scoria di forno ad arco elettrico e ceneri di fondo dall'incenerimento dei rifiuti solidi. Da un lato quindi sono disponibili grandi quantità di materiale da poter riciclare nelle pavimentazioni stradali, dall'altro è fondamentale che si proceda con la ricerca per consolidare la conoscenza del comportamento di questi materiali così da poter procedere ad un utilizzo diffuso di queste miscele innovative.

Esempi di buone pratiche costruttive

Vengono presentati di seguito alcuni buoni esempi di applicazione del concetto di “sostenibilità” al mondo dell’edilizia con il raggiungimento di ottimi risultati in termini di prestazioni meccaniche, sfruttamento del materiale e resa estetica.

1) Progetto Recygénie, Parigi (Francia)

Un esempio di buona pratica nell’utilizzo di calcestruzzo ottenuto dal riciclaggio è fornito dal progetto Recygénie, che a Parigi ha sviluppato la progettazione di un edificio ad uso residenziale con 76 unità abitative, impiegando calcestruzzo con il 100% di riciclato. Per la sua produzione sono infatti stati adottati aggregati di origine riciclata e un cemento composto da clinker ottenuto da materie prime provenienti da riciclo. Attraverso un piano speciale di monitoraggio è stato possibile ricorrere ad una percentuale di materiale riciclato superiore a quella imposta da normativa, garantendo una fortissima limitazione del quantitativo di anidride carbonica emessa in atmosfera. Il progetto risulta unico nel suo genere e fornisce la dimostrazione dell’effettiva applicabilità del riciclo al 100% nel calcestruzzo, anche per complessi di edifici di dimensioni considerevoli, garantendo un’ottima prestazione del materiale.



Figura 1 Render dell’opera e immagine del cantiere tratte da <https://buildingicons.holcim.com/recygenie>

2) Kunsthaus Zurigo (Svizzera)

Un ottimo esempio di impiego di calcestruzzi ottenuti da materie prime riciclate è rappresentato dall'ampliamento della Kunsthaus nella città di Zurigo, dove la percentuale di riciclato ha raggiunto il 98%. Anche in questo caso si è dimostrato come queste miscele innovative garantiscano le medesime prestazioni meccaniche di quelle tradizionali, e, allo stesso tempo, consentano di ridurre le emissioni di anidride carbonica legate alla produzione/costruzione.



Figura 2 Immagine dell'opera tratta da <https://zuercher-museen.ch/en/museums/kunsthaus-zuerich>

3) Tubohotel, Tepoztlán (Messico)

Un'ottima possibilità per ridurre le emissioni di anidride carbonica è rappresentata dal riutilizzo di componenti strutturali di altri edifici ormai dismessi: in questo modo infatti si risparmia sulla quantità di materiale che deve essere prodotto e si riduce lo scarto che deve essere conferito in discarica. Spesso si portano a demolizione elementi strutturali ancora in ottime condizioni e che potrebbero garantire più di 50 anni di vita nominale a seguito di piccole manutenzioni: un ottimo approccio progettuale è quello di procedere con una decostruzione controllata invece di una demolizione sommaria, con l'obiettivo di recuperare il maggior numero possibile di elementi strutturali in condizioni tali da poter essere riutilizzati in nuovi edifici. Un esempio di questo buon approccio è fornito dal "Tubohotel" in Messico, a Tepoztlán, dove per la realizzazione delle camere d'albergo sono stati utilizzati dei vecchi tubi in calcestruzzo del diametro di 2,44 m e lunghezza di 2,5 m.



Figura 3 Immagine dell'opera tratta da <https://architizer.com/projects/tubohotel/>

4) Parco Olimpico di Londra 2012, Londra (Regno Unito)

Un intervento estremamente virtuoso in termini di sostenibilità ambientale delle costruzioni è stato la costruzione del parco olimpico di Londra 2012, realizzato tra il 2007 ed il 2012 nel centro abitato di Stratford (London). Per il cantiere sono stati impiegati il 20% di materie prime che avevano già avuto un primo ciclo di vita e il 22% di aggregati per calcestruzzo provenienti da riciclo, con un totale di circa 2200 tonnellate di materiale riutilizzato in situ. Degli edifici preesistenti che sono stati demoliti, il 98,5% del materiale è stato deviato dalla discarica tramite il riciclo. In questa opera la demolizione è stata altamente selettiva: la maggior parte degli elementi lapidei esistenti sono stati nuovamente impiegati per realizzare le nuove pavimentazioni, i laterizi sono stati, dove possibile, separati e destinati ad un secondo utilizzo, il calcestruzzo è invece stato frantumato in situ, per poi diventare aggregato per la produzione di nuovo materiale. Non potendo riutilizzare interamente l'aggregato riciclato in situ, è stato conferito a imprese locali specializzate nel settore, che hanno fornito una certificazione rispetto all'effettivo reimpegno del materiale per la realizzazione di nuove costruzioni. Le travi e le componenti strutturali in acciaio esistenti, dove possibile, sono state smontate e destinate al riutilizzo tramite apposite ditte. Di seguito vengono descritti alcuni degli edifici costruiti, che si sono distinti per comportamenti particolarmente virtuosi in termini di risparmio delle emissioni di anidride carbonica.

4.1 Stadio Olimpico

L'idea di riutilizzare elementi strutturali provenienti da altri edifici esistenti viene spesso inteso come sinonimo di scarse prestazioni e di insicurezza: questa falsa convinzione viene sfatata da un esempio come la costruzione dello stadio olimpico a Londra, per il quale la maggior parte delle travi in acciaio provengono dalla demolizione di vecchi fabbricati. Un'ulteriore nota positiva nella progettazione di questo edificio è dovuta all'aver sviluppato l'edificio nell'ottica della decostruzione, quindi consentendo, a seguito dello svolgimento dei giochi olimpici, di ridurre le dimensioni dello stadio, rispondendo alle esigenze delle società sportive locali. In questo modo tutti gli elementi strutturali alla fine della vita dell'infrastruttura potranno essere smontati e impiegati nuovamente in una seconda vita.



Figura 4 Viste dello stadio olimpico tratte da <https://www.totaldesign.it/stadio-olimpico-londra-2012-dopo-le-olimpiadi/>

4.2 Velodrome

Il legno è un materiale che durante la sua fase di crescita immagazzina anidride carbonica al suo interno, sottraendola dall'atmosfera: ricorrere al suo impiego significa quindi abbattere le emissioni di CO₂. Un esempio estremamente virtuoso nell'impiego del legno, che ha poi dato il via al suo utilizzo su larga scala come elemento strutturale per grandi edifici, è stato il Velodrome all'interno del villaggio olimpico di Londra 2012. Questa scelta ha consentito il risparmio del 27% dell'embodied carbon della struttura rispetto ad una situazione in cui questo fosse stato costruito in acciaio.



Figura 5 Foto dell'edificio "Velodrome" tratte da <https://www.archdaily.com/252812/london-2012-velodrome-hopkins-architects>

4.3 Aquatics Centre

Per la realizzazione di questo edificio è stato utilizzato calcestruzzo con una percentuale di aggregato riciclato pari al 51%, dimostrando le ottime prestazioni che si possono garantire con miscele di questo tipo.



Figura 6 Sezione di progetto e render dell'edificio "Aquatics center" tratte da <https://www.arch2o.com/london-aquatics-centre-zaha-hadid-architects/>

5) Villa Welpeloo, Enschede (Paesi Bassi)

Realizzata nel 2000 a Enschede nei Paesi Bassi, questa villa è caratterizzata dal riutilizzo, per l'esecuzione della copertura, di un 90% di travi in acciaio provenienti da una preesistente impianto tessile. In questo modo è stato possibile ridurre fortemente l'impatto ambientale rispetto al caso di utilizzo di travi di nuova produzione. Nella costruzione sono stati reimpiegati anche altri componenti non strutturali, consentendo di ottenere un riciclo complessivo del 60%.



Figura 7 Foto di villa Welpeloo tratta da <https://www.superuse-studios.com/projectplus/villa-welpeloo/>

6) BedZED, Wallington (Regno Unito)

Questo edificio è un nuovo insediamento a Wallington, Sulley, London (UK), realizzato nel 2002 e con un'estensione totale di 3000 mq, e comprende al suo interno sia abitazioni che attività imprenditoriali. Una prima peculiarità è rappresentata dalla vita nominale considerata nella progettazione, pari a 120 anni, garantendo una forte riduzione delle emissioni di anidride carbonica, in quanto si prevede che per questo periodo di tempo non siano necessarie manutenzioni straordinarie (più del doppio rispetto ad un edificio ordinario); tutti gli elementi strutturali sono stati concepiti nell'ottica di un futuro smontaggio e riutilizzo per l'edificazione di nuovi fabbricati. L'edificio è un esempio anche per lo sfruttamento di elementi costruttivi esistenti: si è infatti calcolata una percentuale pari al 95% di travi in acciaio pre-esistenti che sono state impiegate nella realizzazione della copertura.



Figura 8 Foto dell'edificio "BedZED" tratta da <https://www.bioregional.com/projects-and-services/case-studies/bedzed-the-uks-first-large-scale-eco-village>

7) Leopold Quartier, Vienna (Austria)

Attualmente in fase di costruzione, il Leopold Quartier è un intero complesso strutturale a nove piani con destinazione d'uso sia per uffici che per abitazioni, all'interno della città di Vienna. Gli edifici sono caratterizzati da una progettazione estremamente accorta in termini di sostenibilità: viene infatti impiegata una tecnologia costruttiva estremamente innovativa, che prevede la collaborazione di legno e calcestruzzo. La struttura è infatti costituita da un piano terra con elevazioni e solaio in calcestruzzo, mentre i piani superiori sono caratterizzati da pilastri e solai in legno, misti a cordolo il c.a. collaboranti con essi. Grazie a questa tecnologia è stato possibile sfruttare la capacità del legno di immagazzinare CO₂ durante il suo ciclo vitale, riducendo di 4000 tonnellate le emissioni di anidride carbonica (riduzione dell'80% rispetto ad una costruzione tradizionale).



Figura 9 Render del complesso di edifici "Leopold quartier" tratti da <https://www.leopoldquartier.at/>