

l'industria italiana del **CEMENTO**



RICICLAGGIO DELLE STRUTTURE DI C.A. E C.A.P. DEMOLITE PER IL CONFEZIONAMENTO DI NUOVI CALCESTRUZZI

LUIGI COPPOLA*, SAVERIA MONOSI**, STEFANO SANDRI***, ANTONIO BORSOI*

INTRODUZIONE

A causa delle crescenti difficoltà nel disporre di siti idonei per allocare gli scarti provenienti dalla demolizione di opere in calcestruzzo, diventa sempre più stringente la necessità di riciclare il conglomerato cementizio demolito per il confezionamento di calcestruzzi da destinare alla realizzazione di nuove strutture. Infatti, le discariche al momento disponibili - peraltro in fase di esaurimento - non saranno in grado di far fronte alla crescente domanda di stoccaggio proveniente dal settore delle demolizioni strutturali.

Si calcola che ogni anno in Europa Occidentale [1] vengano demoliti circa 50 milioni di tonnellate di calcestruzzo di cui circa 15 in Italia, 13 in Francia, 11 in Gran Bretagna e 5 in Svizzera (Figura 1). Il primato della produzione di macerie, tuttavia, spetta agli Stati Uniti e al Giappone con 60 e 50 milioni di tonnellate annue rispettivamente.

Per quanto attiene alla situazione italiana Bassan e Galimberti [2] ipotizzano che la produzione di detriti potrebbe raggiungere nel 2063 i 60 milioni di metri cubi annui.

Nonostante i rilevanti volumi di scarti disponibili, solo il 10% dei rifiuti di calcestruzzo provenienti da demolizioni strutturali viene recuperato. È emblematico, inoltre, come in Svizzera - nazione notoriamente attenta ai problemi ecologico-ambientali - solo il 5% delle macerie di calcestruzzo venga recuperato, mentre percentuali più consistenti di rifiuti ven-

gono riciclate nel settore della plastica, del vetro e dei metalli.

Se da una parte il volume di calcestruzzo demolito è in forte aumento, dall'altra occorre sottolineare che le riserve di ghiaia e di sabbia naturale tendono a diminuire per una limitata sensibilità della legislazione urbanistica a favore della conservazione e della salvaguardia del territorio. La tendenza attuale di creare aree protette e parchi naturalistici in sede di Piano Regolatore e Piani Regionali di Settore ha ridotto drasticamente le aree in concessione per l'estrazione degli aggregati, limitando il dragaggio di fiumi alla conservazione dell'alveo fluviale naturale. La ridotta disponibilità di aggregati ha ovviamente determinato un incremento del costo di questa materia prima che è destinato a crescere ulteriormente.

In definitiva, il crescente volume di macerie prodotte annualmente, la difficoltà di trovare siti idonei per la loro allocazione e la scarsità di riserve di aggregati naturali ha accresciuto l'interesse ed ha stimolato la ricerca a valutare le possibilità di impiego del calcestruzzo proveniente dalle demolizioni strutturali, quale aggregato per il confezionamento del conglomerato da destinare alla realizzazione di nuove strutture.

AGGREGATI RICICLATI: STORIA E NORMATIVA

Il riciclaggio delle strutture in calcestruzzo demolite consiste in una serie di operazioni quali la demolizione dell'opera, la frantumazione delle macerie, la vagliatura e la decontaminazione, necessarie per conseguire l'ottenimento di un prodotto granulare che possa essere utilizzato per il confezionamento del conglomerato cementizio destinato a vari settori dell'ingegneria civile. Il riciclaggio di materiali provenienti dalla demolizione di edifici esistenti viene segnalata da Vitruvio [3] come una pratica largamente diffusa già ai tempi della Roma Antica. Altri esempi di riciclaggio vengono segnalati in Germania per la realizzazione del canale Eifel [4] e nella costruzione di manufatti prefabbricati alla fine del secolo scorso. Tuttavia, le prime importanti realizzazioni in calcestruzzo confezionato con aggregati provenienti dalla demolizione strutturale si registrano soltanto dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale. Nel periodo della ricostruzione post-bellica, infatti, si rese necessario da una parte soddisfare l'enorme richiesta di materiale lapideo per le nuove costruzioni, dall'altra risolvere il problema dell'allocazione delle macerie prodotte dai bombardamenti. La risposta ad entrambe le problematiche venne dal riciclaggio delle strutture demolite. Nell'arco di 10 anni (fino al 1955), gli impianti tedeschi produssero circa 12 milioni di metri cubi di aggregato riciclato con cui furono realizzate circa 175.000 unità abitative, tutt'oggi in buono stato [5]. Anche la Gran Bretagna fu impegnata nel riutilizzo

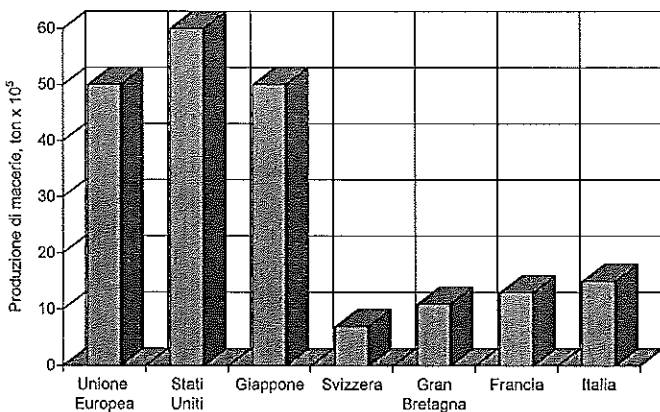


Fig. 1 - Produzione di macerie provenienti da demolizioni strutturali (in milioni di tonnellate) in alcuni Paesi [1], [18], [25].

* Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV).

** Dip. di Scienza dei Materiali e della Terra, Università di Ancona.

*** Libero professionista, Treviso.

degli scarti provenienti dallo smantellamento delle installazioni militari utilizzate durante la guerra per la difesa delle coste.

Il settore in cui attualmente l'aggregato riciclato viene estesamente impiegato - con una logica di tipo industriale - è quello delle pavimentazioni stradali. Il riciclaggio dei calcestruzzi ottenuti dalla demolizione di pavimentazioni - stradali o industriali - consente il conseguimento di notevoli risparmi in termini economici. La produzione dell'aggregato riciclato, infatti, può avvenire direttamente sul cantiere eliminando, quindi, gli alti costi sia di tipo economico che ambientali legati al trasporto del materiale presso l'impianto di produzione.

Al fine di studiare le potenzialità di impiego dell'aggregato riciclato, di definirne le caratteristiche prestazionali minime e soprattutto di sensibilizzare le Autorità Pubbliche e gli operatori del settore, nel 1976 la RILEM istituì un gruppo di studio che produsse un primo rapporto [6] sullo stato dell'arte per il confezionamento di nuovi conglomerati con aggregati riciclati da demolizioni strutturali.

Nel 1982 l'ASTM definì alcuni requisiti per l'accettazione del materiale proveniente da demolizioni strutturali, quale aggregato per il confezionamento di nuovi calcestruzzi. Successivamente l'U.S. Army Corps of Engineers modificò le proprie specifiche e raccomandazioni al fine di promuovere l'impiego degli aggregati riciclati. La conseguenza di ciò è che negli Stati Uniti non esistono particolari limiti per l'impiego degli aggregati riciclati nel calcestruzzo.

Anche il Giappone ha emanato una specifica legislazione per l'impiego degli aggregati riciclati [7]. La B.C.S.J. (Associazione dei Costruttori Giapponesi) ha definito con precisione i requisiti fisico-meccanici ed il contenuto massimo di sostanze pericolose (gesso, argilla, materiale plastico, bitume, etc.) per l'aggregato riciclato. Inoltre, la normativa giapponese ha proposto l'impiego differenziato degli aggregati riciclati fini e grossi in funzione del tipo di struttura a cui il calcestruzzo è destinato. Sono anche fissati un valore massimo per il rapporto acqua/cemento (a/c) e per il contenuto di cemento minimo per il confezionamento di calcestruzzo con aggregati riciclati.

Relativamente ai paesi europei l'Olanda [8, 9], la Russia [10], e la Danimarca [11] hanno sviluppato ed emanato delle raccomandazioni tecniche relative all'impiego degli aggregati riciclati. Le norme olandesi e quelle danesi sembrano orientate a consentire l'impiego degli aggregati riciclati anche per il confezionamento di calcestruzzi strutturali destinati a strutture armate e precomprese. Altri paesi quali l'ex Unione Sovietica e la Gran Bretagna ritengono la ricerca e la sperimentazione in questo settore ancora non sufficientemente approfondite, e limitano pertanto l'utilizzo degli aggregati riciclati solo alla produzione di calcestruzzi per pavimentazio-

ni stradali e industriali o per opere di sottofondazione e rivestimento non particolarmente impegnate dal punto di vista statico.

Questa situazione si riscontra anche in Italia dove attualmente si registra l'impiego di aggregati riciclati esclusivamente quale materiale per la realizzazione di sottofondi per pavimentazioni stradali e industriali. Gli aggregati riciclati restano esclusi dall'impiego nel calcestruzzo dalle disposizioni di legge contenute nell'Allegato 2 (Requisiti sui materiali) del D.M. del 14/2/92 [12]. Le norme di legge, infatti, stabiliscono che gli aggregati per il confezionamento dei conglomerati cementizi destinati alla realizzazione di strutture in c.a. e c.a.p. debbono essere costituiti esclusivamente da materiale lapideo naturale.

Una situazione analoga a quella italiana si rileva in Germania dove attualmente non è consentito l'impiego degli aggregati riciclati per la produzione del calcestruzzo strutturale. Non è da escludere, tuttavia, che la posizione assunta dalle Autorità Italiane e Tedesche non possa essere rivista se si raggiungerà a livello europeo un accordo sulle caratteristiche che gli aggregati riciclati per il confezionamento del calcestruzzo debbono possedere. In quest'ottica il CEN intende istituire un gruppo di lavoro, nel quale sarà rappresentato l'UNICEMEN-TO, per la definizione delle norme tecniche di impiego per gli aggregati riciclati che non sono conformi ai limiti di accettazione (norma UNI 8520 parte 2^a) previsti per gli elementi lapidei naturali. Infine, occorre sottolineare il lavoro del Comitato Tecnico RILEM 121-DRG che ha elaborato le Raccomandazioni per il calcestruzzo confezionato con inerti riciclati [13] che, attualmente in forma di bozza, potrebbero costituire in futuro un possibile standard europeo valido per tutti i paesi della Comunità.

PROCESSO E TECNOLOGIA DEL RICICLAGGIO

Il riciclaggio degli scarti provenienti dalla demolizione delle strutture in calcestruzzo si inquadra nel problema più generale dell'impiego dei residui definiti dal D.L. 8 novembre 1995, n. 463 come «sostanza o materiale residuale derivante da un processo di produzione o di consumo suscettibile di essere avviato a riutilizzo» [14].

La trasformazione di un rifiuto in un prodotto o in un bene altrimenti ottenibile da risorse naturali consiste in una serie di azioni che definiscono il processo di riciclaggio e la cui pianificazione consente di conseguire un risparmio economico ed attenuare al tempo stesso l'impatto ambientale [15]. Il processo di riciclaggio degli scarti provenienti dalle demolizioni strutturali consta specificatamente di quattro fasi sulle quali sono basati gli schemi di funzionamento degli impianti per il trattamento delle macerie [16]: la selezione e la riduzione degli scarti



Fig. 2 - Vista d'insieme di un impianto di riciclaggio.



Fig. 3 - Particolare di un impianto di riciclaggio.

nelle pezzature desiderate, la decontaminazione e la miscelazione con altro materiale.

Gli impianti di riciclaggio delle macerie di calcestruzzo non sono molto differenti da quelli di produzione degli aggregati mediante frantumazione e sono generalmente costituiti da macchine di frantumazione, estrattori, vagli, separatori magnetici e sistemi per l'eliminazione delle sostanze contaminanti (Figura 2 e 3). Tali installazioni possono essere, inoltre, di tipo "supermobili" (di solito su mezzo cingolato), "mobili" (trasportati per mezzo di rimorchi) oppure "fissi". I primi due tipi, generalmente costituiti da moduli componibili, consentono di effettuare l'operazione di riciclaggio direttamente sul cantiere di demolizione dove solitamente vengono montate in prossimità di impianti di betonaggio mobili. Le installazioni fisse hanno lo svantaggio di essere distanti dal cantiere dove si effettua la demolizione. Tuttavia, il maggior onere legato al trasporto delle macerie viene compensato dalla maggiore produttività dell'impianto (80-120 tonnellate/ora).

In Figura 4 è mostrato schematicamente un ciclo di funzionamento di un impianto di riciclaggio fisso. I materiali provenienti dalla demolizione di strutture civili, industriali e stradali vengono solitamente stoccati nell'impianto assieme a materiali della stessa categoria merceologica. Successivamente il materiale viene prelevato dai cumuli e caricato nella tramoggia. Se le dimensioni degli scarti provenienti dalla demolizione dovessero superare quelle della bocca del frantoio si provvede ad una riduzione delle macerie con macchine

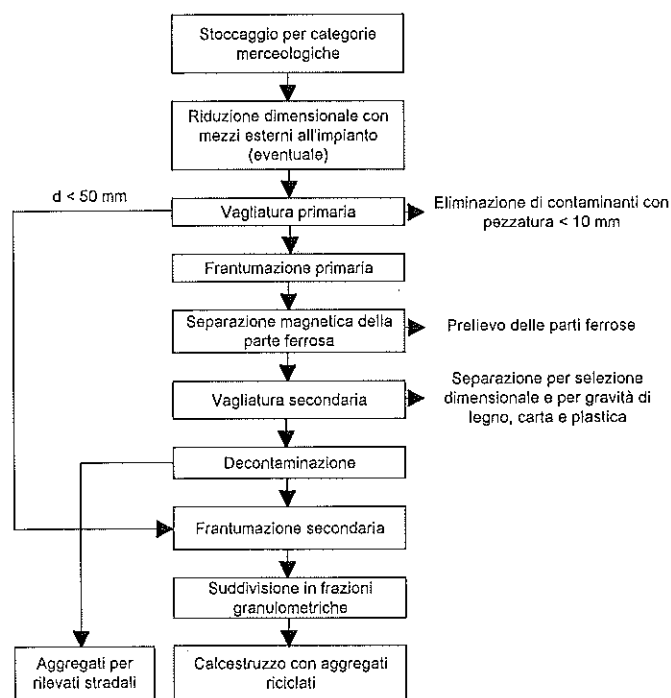


Fig. 4 - Schema di funzionamento di un impianto fisso per la produzione di aggregati riciclati.

che non appartengono all'impianto di riciclaggio. Prima di essere inviato al frantoio primario il prodotto viene prevagliato per eliminare le frazioni di dimensioni inferiori a 10 mm costituite generalmente da terriccio, argilla e materiale di origine vegetale. Il materiale di pezzatura inferiore a 50 mm viene inviato direttamente alla decontaminazione senza essere sottoposto al processo di frantumazione primaria; a questo processo, invece, vengono destinate le macerie di dimensioni maggiori le quali mediante un frantoio (solitamente a mascella) vengono ridotte in elementi di pezzatura inferiore a 100-150 mm. Il materiale frantumato viene successivamente raccolto sopra un nastro trasportatore sul quale è sistemato un separatore magnetico che consente di eliminare i materiali metallici presenti. I detriti vengono, quindi, inviati ad un vaglio vibrante che consente di effettuare una ulteriore selezione eliminando il legno, la carta, la plastica. Il materiale risultante è già impiegabile per la realizzazione di sottofondi per pavimenti o per sottofondi di rilevati stradali. L'impiego del materiale riciclato per il confezionamento di nuovi calcestruzzi richiede, invece, una ulteriore frantumazione e una definitiva selezione in classi granulometriche [17].

Occorre, tuttavia, sottolineare che, accanto ai notevoli vantaggi derivanti dal riciclaggio delle demolizioni strutturali si debbono tener presenti gli aspetti negativi connessi con la produzione degli aggregati riciclati e relativi all'eccessiva polverosità e rumorosità degli impianti di riciclaggio. Il disturbo ambientale e paesaggistico può comunque essere attenuato impiegando frantoi a mascella in grado di ridurre il quantitativo di polveri rispetto a quelle prodotte da un analogo impianto ad urto. Un'ulteriore riduzione dei materiali volatili può essere, inoltre, conseguita con appositi impianti di captazione delle polveri.

AGGREGATI RICICLATI: PROPRIETÀ

Nei paragrafi che seguono vengono analizzate alcune proprietà chimico-fisiche degli aggregati ottenuti dal processo di riciclaggio degli scarti provenienti dalle demolizioni strutturali.

Massa volumica

La massa volumica degli aggregati dipende dalle porosità aperte o chiuse che caratterizzano il materiale. A seguito del processo di frantumazione, l'aggregato riciclato si presenta in forma di elementi lapidei (granuli di sabbia o di ghiaia) avvolti da uno strato più o meno spesso di malta di cemento. Essendo la porosità della malta di cemento maggiore di quella degli elementi lapidei naturali, ne consegue che la massa volumica dell'aggregato riciclato risulta, nella totalità dei casi, sempre inferiore a quella dell'aggregato naturale. La Tabella 1 riporta i valori massimi e minimi registrati per aggregati riciclati grossi e fini (questi ultimi con granuli di dimensioni inferiori a 4 mm). Come si può notare la riduzione di massa volumica è più marcata per gli aggregati fini riciclati che non per quelli grossi a causa di una maggiore percentuale di pasta di cemento che avvolge il materiale fine di riciclo rispetto all'aggregato grosso di riciclo.

La massa volumica dell'aggregato riciclato non sembra dipendere dalla qualità del calcestruzzo originario da cui esso

TABELLA 1

MASSA VOLUMICA S.S.A. (SATURO A SUPERFICIE ASCIUTTA) PER AGGREGATI NATURALI E RICICLATI GROSSI E FINI [18]	
Aggregato	Massa Volumica s.s.a. (Kg/m ³)
Grosso riciclato	2290-2510
Fine riciclato	2190-2320
Naturale	2600-2700

Relativamente al problema della rumorosità essa può essere riportata a livelli minimi concentrando opportunamente i frantoi all'interno di un edificio studiato per ottenere il massimo isolamento acustico [17].

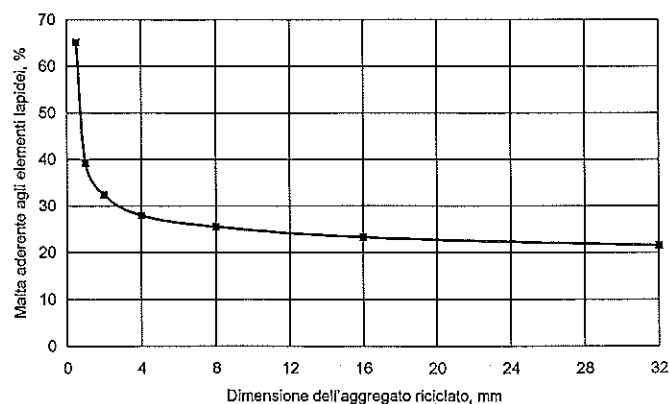


Fig. 5 - Contenuto percentuale di malta originale nell'aggregato riciclato in funzione della dimensione dell'inerte da riciclo.

viene ottenuto. I dati riportati in Tabella 2 confermano che la diminuzione della massa volumica è tanto più marcata quanto minore è la dimensione dell'aggregato riciclato a causa dell'aumento dello strato di malta che avvolge gli elementi lapidei di pezzatura più piccola. Il contenuto percentuale di malta originale - determinato con un metodo simile a quello riportato nella norma ASTM C457 [19] - per l'aggregato fine riciclato, infatti, può variare tra il 30 ed il 65%; per l'aggregato grosso riciclato, invece, raramente il contenuto di malta originale supera il 40% [20-22]. La Figura 5 mostra come il contenuto di malta originale nell'aggregato riciclato aumenti considerevolmente quando le dimensioni del granulo risultano inferiori a 2 mm. Siccome, come si vedrà anche nei prossimi paragrafi, la presenza della malta originale influisce negativamente sulle proprietà dell'aggregato e del calcestruzzo riciclato, l'impiego di frazioni di dimensioni inferiori a 2 mm deve essere escluso per gli aggregati riciclati destinati al confezionamento del calcestruzzo, soprattutto se destinato a scopi strutturali.

TABELLA 2

MASSA VOLUMICA DELL'AGGREGATO RICICLATO,
IN FUNZIONE DELLA PEZZATURA E DEL RAPPORTO
ACQUA/CEMENTO DEL CALCESTRUZZO DI ORIGINE [20]

Rapporto acqua/cemento dei calcestruzzi originali	Pezzatura dell'aggregato riciclato (mm)	Massa volumica dell'aggregato riciclato (Kg/m ³)
0,4	4-8	2340
	8-16	2450
	16-32	2490
0,7	4-8	2350
	8-16	2440
	16-32	2480
1,2	4-8	2340
	8-16	2420
	16-32	2490

La tendenza attuale delle normative sull'impiego degli aggregati riciclati è quella di limitare il contenuto di malta di cemento attraverso la definizione di un limite per la massa

volumica degli aggregati riciclati. Ad esempio le Raccomandazioni RILEM [13] suggeriscono per la massa volumica (γ) un valore minimo di 1500, 2000 e 2400 Kg/m³ rispettivamente per aggregati TIPO I (provenienti da scarti di murature), TIPO II (da demolizioni di calcestruzzo) e TIPO III (miscela di aggregati naturali - minimo 20% - e riciclati). Un'ulteriore limitazione per le particelle leggere viene imposta dalle Raccomandazioni RILEM limitando il contenuto di materiale con $\gamma < 2200$ Kg/m³ (deve risultare inferiore al 10% rispetto alla massa totale del materiale solo per gli aggregati TIPO II e III).

Assorbimento d'acqua

La presenza della malta aderente agli elementi lapidei naturali determina per gli aggregati riciclati un assorbimento di acqua di gran lunga superiore rispetto a quello degli aggregati naturali. L'assorbimento dell'aggregato grosso riciclato, infatti, varia tra il 4 e il 9% circa per pezzature comprese tra 4 e 32 mm e sembra essere indipendente dalla qualità del calcestruzzo di origine; per l'aggregato naturale, invece, i valori di assorbimento si attestano tra 0,5 e 2,5%. L'assorbimento degli aggregati fini riciclati, può raggiungere valori dell'ordine del 12% per la maggior porosità che contraddistingue le frazioni più piccole degli aggregati riciclati [23-25]. Kriejger [26] ha

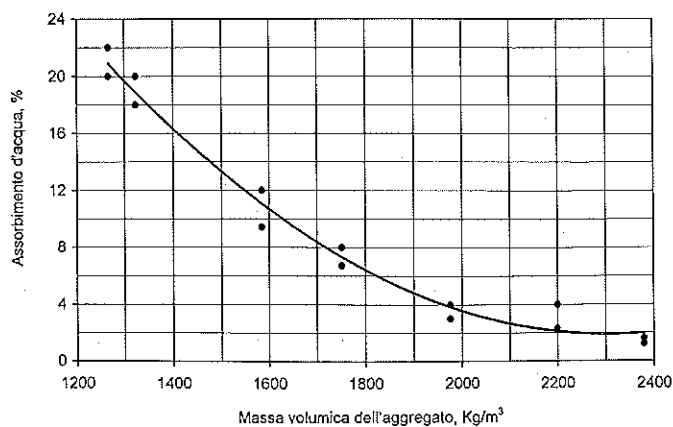


Fig. 6 - Assorbimento d'acqua in funzione della massa volumica dell'aggregato riciclato [26].

trovato una correlazione tra massa volumica e assorbimento d'acqua (Figura 6).

Gli elevati assorbimenti d'acqua registrati per gli aggregati riciclati impediscono un corretto controllo dell'acqua d'impasto e del rapporto acqua/cemento durante il confezionamento del calcestruzzo. A causa degli elevati valori di assorbimento, infatti, gli aggregati riciclati necessitano di tempi lunghi per portarsi in condizione satura a superficie asciutta (*s.s.a.*). La velocità di assorbimento dell'acqua degli aggregati, inoltre, varia sensibilmente da un tipo ad un altro soprattutto nei primi minuti che seguono la miscelazione dell'impasto. Questa situazione rende estremamente difficoltoso il controllo della lavorabilità, dell'effettivo rapporto *a/c*, e quindi della qualità del calcestruzzo.

Alcuni autori [27, 28] hanno suggerito metodi alternativi per misurare la capacità dell'aggregato riciclato di assorbire acqua e consentire quindi una più esatta previsione dell'acqua d'impasto per il confezionamento del conglomerato cementizio. Tuttavia, anche questi metodi non sono risultati sempre validi ed applicabili per qualsiasi aggregato riciclato.

Oltre ad un difficile controllo iniziale dell'acqua d'impasto, l'assorbimento elevato di acqua dell'aggregato riciclato può determinare un'eccessiva perdita di lavorabilità del calcestruzzo durante il trasporto e soprattutto sotto la pressione esercitata sul conglomerato durante il pompaggio. Se si vogliono evitare questi inconvenienti è indispensabile provvedere ad una presaturazione degli aggregati mediante bagnatura. Dopo la bagnatura è opportuno lasciare drenare l'acqua in eccesso per 2-3 ore prima del confezionamento del calcestruzzo.

Per limitare i problemi legati all'eccessivo valore dell'assorbimento d'acqua le Raccomandazioni RILEM [13] suggeriscono per questa caratteristica un valore massimo di 20, 10 e 3% rispettivamente per aggregati riciclati di TIPO I, II e III.

Sostanze non desiderabili

Un problema di particolare interesse nella produzione degli aggregati riciclati riguarda la decontaminazione da sostanze pericolose presenti nelle macerie che potrebbero risultare deleterie per la durabilità del calcestruzzo confezionato con gli aggregati riciclati. Le sostanze che possono contaminarli appartengono anch'esse a materiali da costruzione che assieme al calcestruzzo vengono impiegati per il completamento del manufatto e per la realizzazione delle finiture. Esse includono le malte di calce e gesso impiegate come intonaco o come giunti tra i mattoni, l'asfalto, il vetro e l'alluminio impiegati per la realizzazione degli infissi, materiali organici, piastrelle, laterizi, materiale refrattario, cloruri, etc. La pre-

TABELLA 3

VOLUME PERCENTUALE DI DIVERSI TIPI DI IMPURITÀ CHE PROVOCANO DECREMENTI DEL 15% SULLA RESISTENZA A COMPRESSIONE PARAGONATA A QUELLA DEL CALCESTRUZZO DI CONTROLLO [7]

Impurità	Calce	Terriccio	Legno	Gesso	Bitume	Pittura di acetato di vinile
Percentuale in volume	7	5	4	3	2	0,2

senza di queste sostanze nell'aggregato riciclato comporta generalmente una perdita di resistenza meccanica del calcestruzzo [18, 29]. La Tabella 3 mostra la percentuale di varie sostanze indesiderabili che provoca un abbattimento della resistenza meccanica del calcestruzzo del 15% rispetto a quella del calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati privi di impurità.

Nessuna penalizzazione della resistenza meccanica, invece, è stata registrata allorché gli aggregati vengono contaminati da piastrelle e vetri delle finestre [18]. Occorre tenere presente, tuttavia, che un eccessivo quantitativo di vetro nell'aggregato riciclato potrebbe determinare il degrado a lungo termine del calcestruzzo per reazione alcali-aggregato. Il vetro, infatti, costituito da silice (SiO_2) mal cristallizzata potrebbe reagire con gli alcali apportati nel calcestruzzo dal cemento o provenienti dall'esterno (esempio: acqua di mare) generando espansioni distruttive per il conglomerato cementizio.

La presenza del bitume nell'aggregato riciclato può penalizzare fortemente la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo. La presenza di bitume in misura del 30% in volume può determinare abbattimenti della resistenza meccanica del 30% [18, 30].

In base a quanto esposto, le Raccomandazioni RILEM [13] impongono un limite per il contenuto di materiali estranei (quali bitume, vetro, etc) pari al 5 o all'1% rispettivamente per aggregati riciclati di TIPO I oppure II e III.

Alcune sostanze organiche, se presenti negli aggregati riciclati, possono rallentare il processo di idratazione del cemento oppure accentuare il problema dell'instabilità dimensionale del calcestruzzo sottoposto a cicli alternati di asciutto/bagnato. Altre sostanze organiche, come ad esempio le vernici, possono favorire l'intrappolamento di eccessivi quantitativi di aria nel calcestruzzo con la conseguenza di penalizzare fortemente le pre-

stazioni meccaniche del conglomerato. Per questo motivo è opportuno limitare la presenza di sostanze organiche negli aggregati riciclati a valori esigui e comunque non superiori secondo le Raccomandazioni RILEM all'1% (0,5% per gli aggregati TIPO II e III).

La presenza di terreno vegetale e di frazioni argillose finissime è indesiderabile per gli aggregati riciclati al pari di quanto avviene per gli elementi lapidei naturali. Le sostanze limo-argillose, infatti, possono ridurre notevolmente l'aderenza matrice cementizia-aggregato determinando penalizzazioni per la resistenza meccanica a compressione del conglomerato. Per questa ragione le Raccomandazioni RILEM impongono un limite nel contenuto di materiale finissimo (sotto 0,063 mm) pari al 3 o al 2% per gli aggregati TIPO I oppure II e III rispettivamente.

I solfati sono sostanze notoriamente pericolose per il calcestruzzo in quanto essi possono reagire con gli alluminati idrati prodotti dall'idratazione del cemento determinando espansioni distruttive per il conglomerato associate alla formazione di ettringite e thaumasite [31]. Per questo motivo il contenuto di solfato negli elementi lapidei naturali destinati al confezionamento del calcestruzzo viene limitato allo 0,2% (come SO_3) rispetto alla massa dell'aggregato [32]. Tale limite per gli aggregati naturali potrebbe essere esteso anche agli aggregati riciclati. In quest'ottica è da sottolineare che il contenuto massimo di SO_3 ammesso dalle Raccomandazioni RILEM (1%) sembra eccessivo e pertanto pericoloso per la durabilità delle strutture.

Un eccesso di cloruri nell'aggregato riciclato può innescare la corrosione delle armature annegate nel conglomerato confezionato con questi inerti. Essendo i cloruri sali molto solubili, essi dopo la miscelazione degli ingredienti si trovano immediatamente disciolti nella fase acquosa. Pertanto, non esistono differenze sostanziali tra il cloruro aggiunto tramite gli aggregati riciclati, l'acqua, gli additivi oppure il cemento. Quindi, risulta più corretto stabilire un contenuto massimo di cloruro ammissibile nel calcestruzzo piuttosto che limitare il contenuto di cloruri nel solo aggregato riciclato. In quest'ottica si suggeriscono i valori massimi di Cl^- nel calcestruzzo (in percentuale rispetto alla massa di cemento) consentiti dalla prenorma europea ENV 206 [33]:

- $Cl^- < 1\%$ per calcestruzzi non armati
- $Cl^- < 0,4\%$ per strutture in c.a.
- $Cl^- < 0,2\%$ per strutture in c.a.p.

Problemi particolarmente gravi sono stati segnalati per calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati provenienti da rottami di mattoni refrattari ad alto tenore di ossido di magnesio [34]. Il degrado, legato al rigonfiamento per effetto della trasformazione dell'ossido di magnesio nel corrispondente idrossi-

TABELLA 4

RACCOMANDAZIONI RILEM PER GLI AGGREGATI GROSSI RICICLATI DA IMPIEGARE PER IL CONFEZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO [13]

Requisiti obbligatori	Aggregato grosso:		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Massa volumica particelle asciutte (Kg/m^3)	> 1500	> 2000	> 2400
Assorbimento d'acqua (%)	< 20	< 10	< 3
Materiale con massa volumica s.s.a. < 2200 Kg/m^3 (%)	—	< 10	< 10
Materiale con massa volumica s.s.a. < 1800 Kg/m^3 (%)	< 10	< 1	< 1
Materiale con massa volumica s.s.a. < 1000 Kg/m^3 (%)	< 1	< 0,5	< 0,5
Contenuto di materiali estranei: vetro, bitume, etc. (%)	< 5	< 1	< 1
Contenuto di metalli (%)	< 1	< 1	< 1
Contenuto di materiale organico (%)	< 1	< 0,5	< 0,5
Contenuto di filler (%) < 0,063 mm	< 3	< 2	< 2
Contenuto di sabbia (%) < 4 mm	< 5	< 5	< 5
Contenuto di solfato: SO_3 (%)	< 1	< 1	< 1

do, si manifesta in forma di espulsioni di "coni" di calcestruzzo che possono raggiungere i 35 cm di diametro e 5 cm di profondità. Danneggiamenti consistenti sono stati rilevati anche per aggregati provenienti da macerie contenenti refrattari in misura dello 0,01%. Siccome la massa volumica dei comuni mattoni refrattari è solitamente inferiore a 1800 Kg/m^3 è opportuno limitare il contenuto di particelle più leggere di questo valore all'1% sulla massa dei soli aggregati riciclati come propongono le Raccomandazioni RILEM per gli aggregati TIPO II e III.

Per comodità di lettura nella Tabella 4 vengono riassunti i suggerimenti proposti dalla RILEM relativamente alle caratteristiche degli aggregati grossi riciclati da destinare al confezionamento del calcestruzzo, la maggior parte delle quali sono state presentate e discusse nel presente paragrafo.

TABELLA 5

VARIAZIONE DELLA RICHIESTA D'ACQUA RISPETTO AL CALCESTRUZZO CON ELEMENTI LAPIDEI NATURALI DI PARI SLUMP, PER CALCESTRUZZI RICICLATI CON O SENZA FRAZIONE FINE RICICLATA [26]

Calcestruzzo fresco con:	Aggiunta d'acqua per avere lo stesso slump del cis originario (l/m ³)	Richiesta d'acqua aggiuntiva (variazione %)
aggregato grosso e sabbia riciclati	25-35	15
aggregato grosso riciclato e sabbia naturale	8-12	5

IL CALCESTRUZZO CON AGGREGATI RICICLATI ALLO STATO FRESCO

La presenza della malta originale che avvolge gli elementi lapidei dell'aggregato riciclato, di granuli di cemento parzialmente idratati e la tessitura ruvida della superficie del materiale riciclato determinano una maggiore richiesta d'acqua per confezionare un calcestruzzo "riciclato" di pari consistenza rispetto ad un conglomerato confezionato con elementi lapidei naturali [24, 35-37]. L'aumento dell'acqua di impasto si attesta mediamente intorno al 5% per calcestruzzi confezionati con solo aggregato grosso riciclato; un maggior incremento (circa 15%), si registra quando il conglomerato viene confezionato sia con aggregati grossi che con sabbie riciclate (Tabella 5).

Oltre ad una maggiore richiesta d'acqua rispetto ai calcestruzzi con aggregati lapidei naturali i calcestruzzi riciclati - come già segnalato in precedenza - sono caratterizzati da una più rapida perdita di lavorabilità. Non è da escludere che il precoce "irrigidimento" dell'impasto sia da ascrivere ad un aumento del materiale fine nell'impasto durante il processo di mescolamento ed agitazione a causa della disgregazione di parte della malta originaria che avvolge gli elementi lapidei degli aggregati riciclati [38].

Questa perdita di lavorabilità determina per il calcestruzzo con aggregati riciclati tempi di inizio e fine presa più brevi rispetto a quelli del calcestruzzo tradizionale [39, 40]. Questo effetto può essere completamente eliminato sottoponendo gli aggregati riciclati ad una presaturazione con acqua: 15-30 minuti di bagnatura sono sufficienti per saturare aggregati riciclati anche con elevati valori dell'assorbimento [41, 42].

I calcestruzzi riciclati, infine, sembrano manifestare una maggiore tendenza alla segregazione ed al *bleeding* rispetto ai calcestruzzi confezionati con i tradizionali elementi lapidei (Figura 7).

La maggiore tendenza all'essudazione determina per i calcestruzzi riciclati un maggior rischio che le superfici non protette

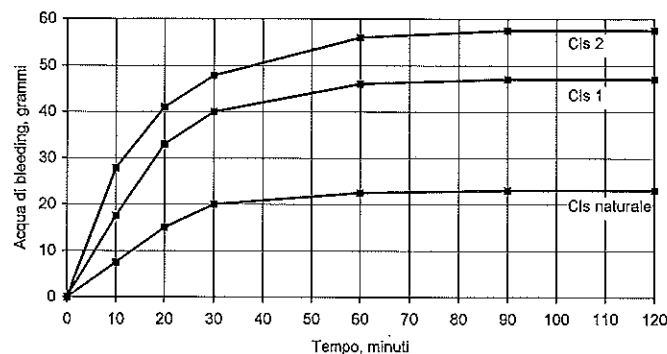


Fig. 7 - Acqua di bleeding in funzione del tempo per calcestruzzi naturali e riciclati, volume impasto = 20 litri. (Cis1 = 50% inerte grosso riciclato + 50% grosso naturale; Cis2 = 100% inerte grosso riciclato) [43].

possano fessurarsi per ritiro plastico. Le fessure prodotte dal ritiro plastico, tuttavia, possono essere opportunamente controllate introducendo nell'impasto fibre polimeriche in misura di 0,8 Kg/m³ di calcestruzzo. Occorre comunque tener presente che l'impiego delle fibre polimeriche determina sia un aumento di costo del conglomerato (da 5.000 a 8.000 lire per m³ circa) che una leggera perdita di lavorabilità quantificabile in 4-6 cm di abbassamento (slump) al cono di Abrams.

IL CALCESTRUZZO CON AGGREGATI RICICLATI ALLO STATO INDURITO

A causa della maggior porosità, della minore massa volumica e, quindi, di una minore resistenza meccanica degli aggregati riciclati rispetto agli elementi lapidei naturali, le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi riciclati risultano sempre più basse rispetto a quelle dei conglomerati tradizionali. Inoltre, a causa di una minore rigidità dell'aggregato riciclato, i calcestruzzi confezionati con questo materiale posseggono un più basso modulo di elasticità rispetto ai calcestruzzi con aggregati naturali. La minore rigidità dell'aggregato riciclato è anche responsabile di una maggiore instabilità dimensionale dei calcestruzzi riciclati rispetto ai conglomerati confezionati con elementi lapidei naturali.

Resistenza meccanica

La resistenza meccanica a compressione dei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati dipende dal rapporto acqua/cemento dell'impasto, dalla resistenza meccanica del conglomerato da cui provengono gli aggregati riciclati e dalla quantità di aggregato fine riciclato presente nel calcestruzzo.

TABELLA 6

RESISTENZA MECCANICA A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI RICICLATI (AGGREGATO GROSSO RICICLATO ED AGGREGATO FINE NATURALE) E CONFEZIONATI CON AGGREGATI LAPIDEI NATURALI

Tipo di aggregato	Resistenza a compressione del cls (N/mm ²) con a/c:		
	0,4	0,6	0,8
Lapideo naturale	68,2	31,2	16,7
Grosso riciclato da cls con a/c di:			
0,4	65,4	31,8	16,9
0,6	53,1	31,8	16,6
0,8	37,3	24,3	15,3

In presenza di solo aggregato riciclato, la resistenza del calcestruzzo dipende fortemente dalla relazione tra il rapporto *a/c* del conglomerato con aggregati riciclati e quello del calcestruzzo originale. Se il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo originale è uguale o più basso di quello del calcestruzzo riciclato allora la resistenza meccanica a compressione di quest'ultimo è uguale o maggiore della resistenza del calcestruzzo originale confezionato con aggregati lapidei naturali (Tabella 6). Inoltre, i dati riportati in Tabella 6 mettono in evidenza, che quando il calcestruzzo riciclato viene confezionato con basso rapporto acqua/cemento (ad esempio 0,4), impiegando aggregati riciclati scadenti provenienti dalla demolizione di conglomerati con elevati rapporti *a/c* (ad esempio 0,8), la resistenza del calcestruzzo riciclato (37,3 N/mm²) subisce un notevole decremento (circa 40%) rispetto alle resistenze del conglomerato di pari *a/c* confezionato con aggregati lapidei naturali (68,2 N/mm²). Al contrario, si può notare come la qualità del calcestruzzo da cui provengono gli aggregati riciclati non abbia alcuna influenza sulla resistenza meccanica del calcestruzzo riciclato confezionato con un rapporto acqua/cemento elevato (si veda ultima colonna relativa a calcestruzzo con *a/c* = 0,8).

I risultati mostrati in Tabella 6 sostanzialmente confermano quelli ottenuti da altri ricercatori [18, 20, 43, 44] e mettono in evidenza che:

TABELLA 7

RESISTENZA MECCANICA A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI RICICLATI (AGGREGATO GROSSO E FINE ENTRAMBI RICICLATI) E CONGLOMERATI CONFEZIONATI CON AGGREGATI LAPIDEI NATURALI

Tipo di aggregato	Resistenza a compressione del cls (N/mm ²) con a/c:		
	0,4	0,6	0,8
Lapideo naturale	63,2	31,2	16,7
Grosso e fine riciclato da cls con a/c di:			
0,4	57,9	20,1	8,3
0,6	51,5	21,3	9,1
0,8	43,8	20,0	8,4

— quando la resistenza a compressione del calcestruzzo originale è uguale o superiore a quella del calcestruzzo riciclato l'elemento debole della catena in corrispondenza del quale si innesca la rottura del conglomerato è rappresentato dall'interfaccia tra nuova e vecchia pasta di cemento;

— quando la resistenza a compressione del calcestruzzo originale è inferiore a quella della nuova pasta di cemento la rottura è controllata dalla resistenza della vecchia pasta di cemento e dalle proprietà dell'interfaccia tra vecchia pasta di cemento e aggregato originale:

<i>a/c</i> cls riciclato	<	<i>a/c</i> cls originale	elemento debole della catena: interfaccia tra nuova pasta e vecchia pasta di cemento
<i>a/c</i> cls riciclato	>	<i>a/c</i> cls originale	elemento debole della catena: interfaccia tra vecchia pasta di cemento e aggregato lapideo originale

Le considerazioni emerse per i calcestruzzi confezionati con solo aggregato grosso riciclato non possono, purtroppo, essere estese ai calcestruzzi confezionati con entrambi gli aggregati

(grosso e fine) riciclati. L'impiego dell'aggregato fine riciclato, infatti, determina sempre un abbattimento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo rispetto al conglomerato confezionato con aggregati lapidei naturali. Questa diminuzione della resistenza meccanica si registra anche impiegando un aggregato fine riciclato da un calcestruzzo originale con rapporto a/c più basso del calcestruzzo riciclato (Tabella 7). I dati riportati in Tabella 7 evidenziano che la diminuzione della resistenza meccanica a compressione è mediamente del 35% rispetto al valore che si ottiene per conglomerati confezionati con soli aggregati naturali e confermano quelli ottenuti da altri ricercatori [27, 42, 45, 46].

L'abbattimento della resistenza meccanica conseguente all'impiego di aggregato fine riciclato può essere attenuato sostituendo parte dell'aggregato fine riciclato con aggregato naturale di frantumazione: il 50% di aggregato frantumato naturale in sostituzione di quello fine riciclato consente di attenuare la diminuzione di resistenza meccanica rispetto al calcestruzzo confezionato con sola sabbia naturale dal 50% al 30% [47].

Modulo elastico

Il calcestruzzo può considerarsi con buona approssimazione un materiale composito per il quale il modulo elastico risulta una media ponderale dei moduli elastici degli elementi che lo compongono:

$$E_{cls} = E_{pc} \cdot x + E_{ag}(1 - x) \quad (1)$$

dove E_{cls} , E_{pc} e E_{ag} sono i moduli elastici del calcestruzzo, della pasta di cemento e dell'aggregato rispettivamente, x è la frazione in volume di pasta cementizia ed $(1 - x)$ quella dell'aggregato.

Potremmo estendere queste considerazioni anche all'aggregato riciclato considerato esso stesso come un materiale composito costituito dall'aggregato lapideo naturale originale avvolto dalla pasta di cemento del calcestruzzo originale il cui modulo elastico risulta quindi:

$$E_{agr} = E_{pco} \cdot y + E_{ago}(1 - y) \quad (2)$$

dove E_{agr} è il modulo elastico dell'aggregato riciclato e E_{pco} quello della pasta di cemento originale che avvolge l'elemento lapideo naturale con modulo elastico E_{ago} , y è la frazione di pasta di cemento originale nell'aggregato riciclato ed $(1 - y)$ quella dell'aggregato lapideo naturale. In assenza di pasta di cemento originale ($y = 0$), il modulo elastico dell'aggregato riciclato coincide con quello dell'aggregato naturale.

Essendo la pasta di cemento di gran lunga meno rigida

dell'elemento lapideo naturale, ne consegue che il modulo di elasticità dell'aggregato riciclato risulterà inferiore a quello dell'aggregato naturale. Inoltre, E_{agr} risulterà tanto più basso quanto maggiore risulterà la frazione in volume di pasta di cemento nell'aggregato riciclato. Siccome tale frazione aumenta al diminuire della dimensione dell'aggregato riciclato, ne consegue che il modulo di elasticità di quest'ultimo sarà tanto più basso quanto minore è la pezzatura dell'aggregato riciclato. La minore rigidità E_{agr} rispetto ad E_{ago} giustifica la diminuzione di rigidità del calcestruzzo riciclato rispetto al conglomerato confezionato con soli aggregati naturali.

Nel seguito vengono riportate alcune correlazioni empiriche tra modulo di elasticità e resistenza meccanica a compressione per calcestruzzi naturali e riciclati [48].

$E_{cls} = 5,31 \cdot R_c^{1/2} + 5,83$	per calcestruzzi naturali (3)
$E_{cls} = 3,48 \cdot R_c^{1/2} + 13,05$	per calcestruzzi con aggregato grosso riciclato (4)
$E_{cls} = 3,02 \cdot R_c^{1/2} + 10,67$	per calcestruzzi con aggregato grosso e fine riciclato (5)

TABELLA 8

MODULO DI ELASTICITÀ PER CALCESTRUZZI NATURALI E RICICLATI CALCOLATI CON LE EQUAZIONI (3), (4) E (5)

R_c (N/mm ²)	Modulo elastico del cls con aggregato:		
	Naturale	grosso Riciclato	fine e grosso
25	32,4	30,5	25,8
30	34,9	32,1	27,2
35	37,2	33,6	28,5
40	39,4	35,1	29,8
45	41,5	36,4	30,9
50	43,4	37,7	32,0

In Tabella 8 vengono riportati i valori del modulo elastico ottenuto con le formule (3), (4), (5) sopra esposte per calce-

struzzi con classi di resistenza (R_c) variabili da 25 a 50 N/mm².

Come si può notare i valori del modulo di elasticità del calcestruzzo con solo aggregato grosso riciclato risultano inferiori mediamente del 10% rispetto a quelli del calcestruzzo con aggregato naturale lapideo. La diminuzione del modulo di elasticità dei calcestruzzi confezionati sia con sabbia che con aggregato grosso riciclato risulta, invece, molto più marcata e pari mediamente a circa il 25%. Entrambi questi valori sembrano essere in buon accordo con quelli riportati in letteratura [36, 44, 49-53].

Ritiro e deformazione viscosa

La diminuzione di rigidità dell'aggregato riciclato rispetto a quello naturale è anche responsabile di una minore stabilità dimensionale del calcestruzzo riciclato rispetto a quello confezionato con soli aggregati lapidei naturali, sia in assenza di carico (ritiro igrometrico) che in presenza di carichi costanti agenti su una determinata struttura (deformazione viscosa).

Il ritiro dei calcestruzzi con solo aggregati grossi riciclati risulta mediamente superiore di circa il 50% di quello registrato per i conglomerati naturali [22, 54]. Valori notevolmente maggiori si registrano, invece, per calcestruzzi confe-

zionati sia con sabbia che con aggregato grosso riciclato. Per questi conglomerati, infatti, la contrazione dimensionale connessa con le variazioni igrometriche può raggiungere anche il doppio di quella registrata per i calcestruzzi tradizionali [39].

Per quanto attiene alla deformazione viscosa i valori registrati per i calcestruzzi con soli aggregati grossi riciclati risultano maggiori di quelli del calcestruzzo naturale del 25-50% [9, 24, 38, 50].

DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO RICICLATO

La durabilità del calcestruzzo dipende dalle porosità presenti all'interno della matrice di cemento. Salvo rare eccezioni gli aggregati naturali non influenzano la porosità del sistema cementizio; la durabilità della matrice cementizia, pertanto, risulta strettamente dipendente dal rapporto a/c , e, quindi, a pari lavorabilità, dal dosaggio di cemento, dalla stagionatura e dalla qualità dell'interfaccia pasta-aggregato. Nel calcestruzzo riciclato, invece, la permeabilità del conglomerato oltre a dipendere dalle grandezze sopramenzionate è influenzata dalla qualità e dalla quantità di pasta di cemento presente nell'aggregato riciclato. Essendo la permeabilità della pasta di cemento superiore a quella dell'aggregato lapideo, in linea di massima ci si deve attendere per il calcestruzzo riciclato una permeabilità maggiore del corrispondente calcestruzzo di pari a/c confezionato con soli aggregati naturali. I risultati riportati in Tabella 9

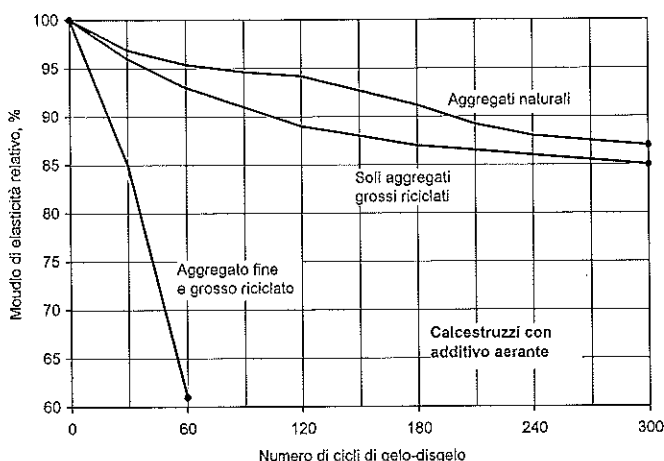


Fig. 8 - Resistenza a cicli alternati di gelo-disgelo per calcestruzzi naturali e riciclati additivati con agente aerante [43].

TABELLA 9

PENETRAZIONE D'ACQUA MISURATA SECONDO NORMA ISO DP 7031

Rapporto a/c	Penetrazione di acqua (mm) in cls con aggregati: Naturali	Grossi riciclati
0,40	4,2	4,0
0,45	7,2	11,9
0,50	12,3	17,8
0,55	17,7	26,9
0,60	27,2	31,2
0,65	31,0	39,4

confermano queste previsioni e mettono anche in evidenza come il calcestruzzo con aggregato riciclato possieda la stessa permeabilità di quello con aggregati naturali purché il rapporto *a/c* risulti inferiore a 0,45. Per rapporti *a/c* superiori a questo valore si può notare come si ottenga la stessa permeabilità all'acqua abbassando di 0,05 il rapporto *a/c* del calcestruzzo con aggregato grosso riciclato rispetto a quello del conglomerato naturale. Ne consegue che la durabilità del conglomerato cementizio con aggregato grosso riciclato negli ambienti definiti dalla norma UNI 9858 [67] potrebbe essere garantita adottando per le opere in c.a. e c.a.p. rapporti *a/c* più bassi rispetto a quelli previsti per i calcestruzzi naturali di 0,05 (Tabella 10) ed aumentando il dosaggio minimo di cemento previsto dalla norma UNI 9858 per i conglomerati con aggregati naturali di 20-40 kg/m³.

Per quanto attiene alla resistenza al gelo dei calcestruzzi riciclati, essa dipende fortemente dalla percentuale di sabbia riciclata (granuli inferiori a 4 mm) presente nell'impasto. In Figura 8 si può notare come la diminuzione del modulo di elasticità - del tutto simile per i calcestruzzi con solo aggregato grosso riciclato a quella che si registra per il calcestruzzo naturale - subisce una notevole diminuzione (50%) dopo soli 60 cicli di gelo-disgelo. Pertanto, risulta indispensabile, qualora si debbano confezionare calcestruzzi resistenti al gelo, porre una particolare cura ed attenzione nella scelta dell'aggregato riciclato che deve essere privo della frazione passante a 4 mm.

TABELLA 10

RAPPORTI A/C MAX PER LA DURABILITÀ DI CALCESTRUZZI ARMATI CON AGGREGATI GROSSI NATURALI (UNI 9858) E RICICLATI AL VARIARE DELLE CLASSI DI ESPOSIZIONE

Classe di esposizione (UNI 9858)	a/c max per strutture armate con:	
	Aggregati naturali (UNI 9858)	Aggregati grossi riciclati
1	0,65	0,60
2a	0,60	0,55
2b	0,55 + aria	0,50 + aria
3	0,50 + aria	0,45 + aria
4a	0,55	0,50
4b	0,50 + aria	0,45 + aria
5a	0,55	0,50
5b	0,50	0,45
5c	0,45	0,40

CONCLUSIONI

L'impiego degli aggregati riciclati dalle demolizioni di strutture in c.a. e c.a.p. per il confezionamento di nuovi calcestruzzi è ampiamente documentato sia da estese sperimentazioni condotte in laboratorio che da numerose applicazioni pratiche che hanno maggiormente coinvolto il settore stradale dove i conglomerati riciclati sono stati largamente utilizzati negli strati di sottofondo o nella realizzazione di opere non particolarmente impegnate dal punto di vista statico quali palificate, fondazioni marine, muri di contenimento, etc.

L'utilizzo degli aggregati riciclati per il confezionamento di calcestruzzi strutturali, invece, non è ancora diffuso. Accanto ad alcuni Enti ed associazioni favorevoli all'impiego dell'aggregato riciclato a fini strutturali si affiancano Paesi che ritengono ancora inaffidabili le prestazioni del calcestruzzo riciclato e attendono ulteriori riscontri sperimentali positivi prima di consentire l'impiego del calcestruzzo riciclato per la realizzazione di strutture in c.a. e c.a.p..

In generale le caratteristiche del calcestruzzo riciclato risultano sempre più scadenti di quelle del calcestruzzo confezionato con aggregati lapidei naturali. Tuttavia una produzione oculata dell'aggregato riciclato (che consenta di limitare la percentuale delle sostanze contaminanti e il quantitativo di materiale più fine di 2 mm), una scelta adeguata del rapporto acqua/cemento e l'impiego di additivi che consentano di compensare la maggiore richiesta d'acqua, possono dar luogo a conglomerati riciclati che per prestazioni reologiche, meccaniche e durabilità sono equivalenti a quelli confezionati con elementi lapidei naturali, pur essendo meno costosi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T.C. Hansen, "Recycling of Demolished Concrete and Masonry", Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete - RILEM, Report 6, Part I, E. & F.N. Spon/Chapman & Hall, London, (1992).
- [2] M. Bassan, V. Galimberti, "Riciclaggio del calcestruzzo: le possibilità di sviluppo in Italia", L'Edilizia, n. 5-6, pp. 29-35, Maggio-Giugno 1995.
- [3] V. Gottardi, "Appunti dalle lezioni di Tecnologia dei materiali e chimica applicata", Patron Editore, Bologna, (1992).
- [4] Schulz, F. Hendricks, "Recycling of Masonry Rubble", Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete - RILEM Report 6, Part II, E. & F.N. Spon/Chapman & Hall, London, (1992).
- [5] A.J. Newman, "The utilization of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete", Inst. Mun. Eng., 2, 113, 121, Munich, (1946).
- [6] P.J. Nixon, "Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review", RILEM TC-37-DRC, Materials and Structures (RILEM), 65, pp. 371-378, (1977).
- [7] B.C.S.J., "Proposed standard for the use of recycled aggregate and

- recycled aggregate concrete", Building Contractors Society of Japan, Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, (1981).
- [8] C.U.R., "Betonpuingranulaat als toeslagsmateriaal voor beton", (in olandese), (1986).
- [9] C.U.R., "Betonpuingranulaaten Metselwerkpuins Granulaat als Toeslagsmateriaal van Beton", Commissie voor Uitvoering van Research ingesteld door de Betonvereniging, Rapport 125 (in olandese), (1986).
- [10] "Russian Recommendations on the recycling of sub-standard concrete and reinforced concrete products", NIIZb of the U.S.S.R. Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete, (1984).
- [11] DIF, "Proposed amendment to the Danish concrete code: use of recycled demolition rubble", Dansk Beton, 6, No. 4, (1989).
- [12] D.M. 14/02/92, "Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche", G.U. No. 55, marzo, (1992).
- [13] RILEM, "Specification for concrete with recycled aggregates", Draft by RILEM TC 121, (1993).
- [14] Decreto Legge 8/11/95, n. 463, "Disposizioni in materia di riutilizzo dei residui derivanti da cicli di produzione o di consumo in un processo di combustione, nonché in materia di smaltimento dei rifiuti".
- [15] K. Hermann, "Riciclaggio del calcestruzzo - un obbligo dei nostri giorni", TFB, L'Istituto Tecnico Sperimentale delle Industrie Svizzere del Cemento, No. 6, pp. 1-10, giugno (1992).
- [16] A. Taglioni, "La demolizione strutturale", Atti del Convegno G.I. RILEM sul Riuso dei Materiali provenienti da Demolizioni e Sottoprodotti Industriali, pp. 73-75, giugno (1992).
- [17] "Impianto di riciclaggio per inerti da demolizione", Industria delle costruzioni, pp. 759-762, settembre, (1995).
- [18] B.C.S.J., "Study on recycled aggregate concrete", Building Contractors Society of Japan, Committee on Disposal and Reuse of Concrete Construction Waste, Concrete Journal, Japan, 16, 7, pp. 18-31, (1978).
- [19] Norma ASTM C457-71, "Standard recommended practice for microscopical determination of air-void content and parameters of the air-void system in hardened concrete".
- [20] T.C. Hansen, H. Narud, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate", Concrete International - Design and Construction, 5, 1, pp. 79-83, (1983).
- [21] S. Hedegaard, "Recycling of concrete with additives", Technical Report 116/82, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby, (1981).
- [22] S. Hasaba, M. Kawamura, K. Toriik, et al., "Drying shrinkage and durability of concrete made of recycled concrete aggregates", Japan Concrete Institute, 3, pp. 55-60, (1981).
- [23] H. Narud, "Recycled concrete in low-strength concrete with fly-ash", Technical Report 110/82, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby, (1981).
- [24] R.S. Ravindrarajah, T.C. Tam, "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate", Magazine of Concrete Research, 37, 130, (1985).
- [25] T. Karaa, "Evaluation technique des possibilites d'emplois des déchets dans la construction - recherche expérimentale applique au cas de béton fabrique a partir de granulats de bétons recyclés", These de doctorat, (in francese), (1986).
- [26] P.C. Kreijger, "Hergerbruik van Bouwen Sloofafval als Toeslagsmateriaal in Beton", TH-Eindhoven, Afdeling Bouwkunde, Rapport M83-1, (1983).
- [27] T.C. Hansen, M. Marga, "Strength of recycled concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregates", Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, 2: Reuse of demolition waste, Ed. Y. Kasai, pp. 605-612, Chapman & Hall, London.
- [28] K. Puckman, A. Henrichsen, "Reuse of concrete pavements", Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, 2: Reuse of demolition waste, Ed. Y. Kasai, pp. 746-755, Chapman & Hall, London.
- [29] T. Mukai, "Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete", Seminar on Energy and Resources Conservation in Concrete Technology, Japan-US Cooperative Science Programme, San Francisco, (1979).
- [30] J. H. Dierkes, "Urban recycling of portland cement concrete pavement: Edens Expressway", F.H.W.A., Proceedings of the National Seminar on PCC Pavement recycling and rehabilitation, Federal Highway Administration Report FHWA-TS-82-208, pp. 172-176, St. Louis, (1981).
- [31] M. Collepardi, L. Coppola, "Durabilità e Restauro delle opere in calcestruzzo", Ed. Enco, (1992).
- [32] Norma UNI 8520 Parte 2^a, "Aggregati per calcestruzzo. Limiti di accettazione".
- [33] ENV 206, "Concrete. Performance, production, placing and compliance criteria".
- [34] "Engineering News Record", p. 13, 20 November 1980.
- [35] A.D. Buck, "Recycled concrete as a source of aggregate", ACI Journal, pp. 212-219, (1977).
- [36] S. Frondistou-Yannas, "Waste concrete as aggregate for new concrete", ACI Journal, pp. 373-376, (1977).
- [37] V.M. Malhotra, "Use of recycled concrete as a new aggregate", Proceeding of Symposium on Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry, CANMET, Report No. 76-8, Ottawa, (1978).
- [38] Y. Kasai, "Studies into the reuse of demolished concrete in Japan", EDA/RILEM Demo-Recycling Conference, Proc. Vol. 2 Re-Use of Concrete and Brick Materials, European Demolition Association, Rotterdam, (1985).
- [39] R.S. Ravindrarajah, Y.H. Loo, C.T. Tam, "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete", Magazine of Concrete Research, 39, 141, pp. 214-220, (1987).
- [40] G. Ivanyi, R. Lardi, A. Besser, "Recycling beton", Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen No. 33, Universität-Gesamthochschule, Essen, (1985).
- [41] K. Puckman, A. Henrichsen, "Reuse of concrete pavements", Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, 2: Reuse of demolition waste, Ed. Y. Kasai, pp. 746-755, Chapman & Hall, London.
- [42] D. Morlion, J. Venstermans, J. Vyncke, "Demolition of the Zandvliet lock as aggregates for concrete", Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, 2: Reuse of demolition waste, Ed. Y. Kasai, pp. 709-718, Chapman & Hall, London.
- [43] C. Pauw, "Fragmentation and recycling of reinforced concrete", in Adhesion Problems in the Recycling of Concrete, Ed. P. Kreijger, pp. 311-317, Plenum Press, New York (1981).
- [44] Rasheeduzzafar, A. Khan, "Recycled concrete - a source of new aggregate", Cement, Concrete and Aggregates (ASTM), 6, No. 1, pp. 17-27, (1984).
- [45] C. Pauw, "Kringloopbeton", Wetenschappelijk Technisch Centrum Bouwbedrijf, Bruxelles, (1980).
- [46] G. Bernier, Y. Malier, J. Mazars, "New material from concrete demolition waste - the Bibeton", Proceedings of the International Conference on the use of by-products and waste in civil engineering, Paris, (in francese), pp. 157-162, (1978).
- [47] T. Soshiroda, "Recycled concrete", Proceedings of the 9th Congress of CIB, Stockholm, (1983).
- [48] R.S. Ravindrarajah, T.C. Tam, "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate", Magazine of Concrete Research, 37, No. 130, (1985).

-
- [49] M. Kakizaki, M. Harada, Soshiroda et al., "Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete", Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, 2: Reuse of demolition waste, Ed. Y. Kasai, pp. 565-574, Chapman & Hall, London.
- [50] J.J.A. Gerardu, C.F. Hendriks, "Recycling of road pavement materials in the Netherlands", Rijkswaterstaat Communications No. 38, the Hague, (1985).
- [51] S.R. Ravindrarajah, C.T. Tam, "Concrete with fly ash or crushed concrete fines or both", Lavoro distribuito all'ACI- CANMET, Second International Conference on the use of fly ash, silica fume fine, slag and natural pozzolans in concrete, Madrid, (1986).
- [52] K. Wesche, R. Schulz, "Beton aus aufbereitetem Altbeton", Technologie und Eigenschaften, Beton, 32, No. 2 and 3, (1982).
- [53] V.A. Zagurskij, B.V. Zhadanovskij, "Breaking reinforced concrete and recycling crushed materials", Special Technical Report, Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete (GOSSTROY), Moscow.
- [54] T. Fusjii, "Strength and drying shrinkage behaviour of concrete crushed aggregate", Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, 2: Reuse of demolition waste, Ed. Y. Kasai, pp. 660-669, Chapman & Hall, London.
- [55] Norma UNI 9858, "Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità".