

I° Giornata di Studi “Riduci, Ripara, Riusa, Ricicla”

---

# **IL RICICLAGGIO COME PRATICA VIRTUOSA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

---

A cura di Adolfo F. L. Baratta e Agostino Catalano

---

Questo libro è stato realizzato con il contributo del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi Roma Tre e del Dipartimento di Scienze Umanistiche, Sociali e della Formazione dell'Università degli Studi del Molise.

Tutti i contributi sono stati valutati seguendo il metodo del *double-blind peer review*.

### **Comitato Scientifico**

Adolfo F. L. Baratta

*Università degli Studi Roma Tre*

Pepa Cassinello

*Universidad Politécnica de Madrid*

Agostino Catalano

*Università degli Studi del Molise*

Enrico Dassori

*Università degli Studi di Genova*

Fabio Enrique Forero Suárez

*Universidad El Bosque*

Remo Pedreschi

*University of Edinburgh*

Marco Sala

*Università degli Studi di Firenze*

### **Comitato organizzatore**

Adolfo F. L. Baratta

*Università degli Studi Roma Tre*

Laura Calcagnini

*Sapienza Università di Roma*

Agostino Catalano

*Università degli Studi del Molise*

Silvia Pinci

*Università degli Studi Roma Tre*

Camilla Sansone

*Università degli Studi del Molise*

---

### **Partner istituzionali**



---

### **Sponsor**



[www.geoconsultlab.it](http://www.geoconsultlab.it)

---

### **Media partner**



[www.ecoera.it](http://www.ecoera.it)



[www.recyclind.it](http://www.recyclind.it)

---

### **Progetto grafico**

Silvia Pinci

# INDICE

---

## INTRODUZIONE

---

**11**    **PREMESSA. I RIFIUTI NON ESISTONO**  
Adolfo F. L. Baratta, Agostino Catalano

**14**    *PREMISE. WASTES DON'T EXIST*  
Adolfo F. L. Baratta, Agostino Catalano

## RICERCA

---

**18**    **DALLA DEMOLIZIONE SELETTIVA AL REIMPIEGO DEI RICICLATI:  
OTTIMIZZARE LA GESTIONE DEI FLUSSI DI RIFIUTI C&D**  
*FROM SELECTIVE DEMOLITION TO REUSE OF RECYCLED  
MATERIALS: IMPROVING THE C&D WASTE MANAGEMENT*  
Ernesto Antonini

**30**    **PROGETTARE SENZA RIFIUTI. PRIMUM NON NOCERE**  
*PLANNING WITHOUT WASTE. PRIMUM NON NOCERE*  
Adolfo F. L. Baratta

**44**    **RIUSO DI MATERIALI LOCALI NELLE CHIUSURE VERTICALI  
OPACHE. PRESTAZIONE ENERGETICO-AMBIENTALE DI UN  
CASO STUDIO**  
*REUSE OF LOCAL MATERIALS IN BUILDING ENCLOSURE  
TECHNOLOGY. ENERGY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE  
OF A CASE STUDY*  
Laura Calcagnini

**60**    **RIUSARE SENZA RIFIUTARE: IL RIUSO COME STRUMENTO DI  
CONSERVAZIONE DI ENERGIA E MATERIA**  
*REUSING NOT REFUSING: REUSE AS AN ENERGY-MATTER  
SAVING TOOL*  
Ignazio Caruso

- 74** POSSIBILITÀ DI UTILIZZO DI CALCESTRUZZI CON INERTI DA RICICLAGGIO PER SISTEMI COSTRUTTIVI DUREVOLI E ARCHITETTURE SOSTENIBILI  
*THE POSSIBLE USE OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES FOR LASTING CONSTRUCTION SYSTEMS AND SUSTAINABLE ARCHITECTURE*  
Agostino Catalano
- 86** AGGREGATI PLASTICI RICICLATI PER CALCESTRUZZI: DALLA SPERIMENTAZIONE ALLA PRODUZIONE  
*RECYCLED PLASTIC AGGREGATES FOR CONCRETE: FROM TESTING TO PRODUCTION*  
Ornella Fiandaca, Raffaella Lione
- 102** METODOLOGIA PER LO SVILUPPO DI PRODOTTI DERIVATI DA RICICLAGGIO DI DETRITI DESTINATI ALLO SPAZIO PUBBLICO SULL'ASSE DI CALLE 45, BOGOTÁ D.C.  
*METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF PRODUCTS WITH RUBBLE RECYCLE FOR THE PUBLIC SPACE OF THE 45 STREET, BOGOTÁ D.C.*  
Fabio E. Forero Suárez, Leonardo Gutiérrez, Javier Rojas
- 116** MATERIALI RI-PENSATI: PROSPETTIVE DI RICERCA SULL'USO DEI BIOCOMPOSITI NEL SETTORE COSTRUTTIVO  
*RE-THINKED MATERIALS: RESEARCH PERSPECTIVES ON THE USE OF BIO-COMPOSITES IN CONSTRUCTION SECTOR*  
Francesca Giglio, Giulia Savoja
- 130** I MATERIALI DI RIFIUTO POSSONO ANCORA SERVIRE? NEL RESTAURO, CERTAMENTE  
*CAN THE WASTE MATERIALS STILL BE USEFUL? IN THE RESTORATION, CERTAINLY*  
Luigi Marino
- 144** L'UPCYCLING IN ARCHITETTURA. UN CASO DI STUDIO DANESE  
*UPCYCLING IN ARCHITECTURE. A DANISH EXAMPLE*  
Angela Masciullo

- 158** IL ROTTAME DI VETRO: DA RIFIUTO A RISORSA  
*WASTE GLASS FROM SCRAP TO BUILDING MATERIAL*  
Luigi Mollo, Rosa Agliata
- 172** PRINCIPALI ADEMPIMENTI NORMATIVI PER LA CORRETTA GESTIONE DEI RIFIUTI INERTI DA C&D E VANTAGGI DAL RECUPERO  
*MAJOR REGULATORY REQUIREMENTS FOR A PROPER C&D INERT WASTE MANAGEMENT AND BENEFITS FROM RECOVERY*  
Francesco Montefinese
- 182** ASPETTI TECNICI RELATIVI ALL'USO DI AGGREGATI RICICLATI NEL CALCESTRUZZO STRUTTURALE  
*TECHNICAL ASPECTS CONCERNING THE USE OF RECYCLED AGGREGATES IN STRUCTURAL CONCRETE*  
Giacomo Moriconi
- 196** ZERO WASTE. COME STA CAMBIANDO LA PROGETTAZIONE? QUALI PRODOTTI VERRANNO USATI NELL'EDILIZIA? ESISTE UN'ESTETICA DEL RICICLO?  
*ZERO WASTE. HOW DESIGN IS CHANGING? WHICH PRODUCTS WOULD BE USED IN CONSTRUCTION INDUSTRY? IS THERE ANY RECYCLING AESTHETIC?*  
Alberto Raimondi, Simona Tannino
- 212** RICICLAB: DIDATTICA DEL RIUSO  
*RICICLAB: TEACHING OF RE-USE*  
Rossana Raiteri, Fausto Novi, Andrea Giachetta
- 226** COSTRUIRE EDIFICI STRAORDINARI CON MATERIALI DI RECUPERO: ESPERIENZE TRA RICERCA, DIDATTICA E PROFESSIONE  
*DESIGN AND BUILD EXTRAORDINARY BUILDINGS USING UNCONVENTIONAL MATERIALS: EXPERIENCES AND EXAMPLES BETWEEN RESEARCH, TEACHING AND PROFESSION*  
Alessandro Rogora

**242** PROCESSI TECNOLOGICI PER IL REINSERIMENTO DEI MATERIALI DA DEMOLIZIONE NEL CICLO DI PRODUZIONE EDILIZIA

*TECHNOLOGICAL PROCEDURES FOR THE REINTEGRATION OF DEMOLITION MATERIALS IN THE BUILDING PRODUCTION CYCLE*

Camilla Sansone

## **AUTORI**

---

**257** PROFILI DEGLI AUTORI



**GIACOMO MORICONI**

*Università Politecnica delle Marche*

*g.moriconi@unipm.it*

**ASPETTI TECNICI RELATIVI ALL'USO  
DI AGGREGATI RICICLATI NEL  
CALCESTRUZZO STRUTTURALE**

---

***TECHNICAL ASPECTS  
CONCERNING THE USE OF  
RECYCLED AGGREGATES IN  
STRUCTURAL CONCRETE***



### **Parole chiave**

Calcestruzzo strutturale, Aggregati riciclati, Carico ciclico, Corrosione



### ***Keywords***

*Concrete for structural use, Recycled aggregates, Cyclic loading,  
Reinforcement corrosion*





---

## SOMMARIO

Numerosissimi studi nella letteratura internazionale hanno ormai da tempo dimostrato la fattibilità della produzione di calcestruzzo per uso strutturale utilizzando aggregati riciclati provenienti dalla demolizione di opere civili al termine della loro vita in servizio, dopo trattamento in idonei impianti di riciclaggio. Pertanto, attualmente buona parte del dibattito sulla sostenibilità dell'industria del calcestruzzo riguarda problemi di riutilizzo del calcestruzzo proveniente dalla demolizione di strutture esistenti. Tuttavia, qualsiasi discussione sulla sostenibilità del calcestruzzo non può prescindere da considerazioni di più ampio respiro che non i meri aspetti ecologici di una determinata tecnologia. Così, se l'opinione pubblica o i progettisti percepiscono il calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati come materiale non durevole o come materiale con il quale è più difficile progettare, la sua sostenibilità ne risente, essendo la durabilità della struttura un aspetto più facilmente percepibile dall'opinione pubblica. È opportuno, quindi, valutare come gli aggregati riciclati influenzano due aspetti importanti per una struttura in calcestruzzo armato: il comportamento al sisma e la corrosione delle armature, facilmente riconoscibili dall'opinione pubblica e rilevanti per consentire il superamento di ingiustificati pregiudizi.

## ABSTRACT

*A great number of long standing papers in the international literature have proved the feasibility of producing concrete for structural use by employing recycled aggregates coming from properly processed concrete demolished at the end of buildings service life. Therefore, a large part of the actual debate about concrete industry sustainability relates to issues concerning the reuse of concrete from the demolition of old structures. However, any such discussion cannot avoid larger-scale concerns beyond merely ecological aspects of a given technology. Thus, if public opinion or structural designers perceive that concrete made with recycled aggregate is not a suitably durable material or a material implying design difficulty, then the sustainability of concrete is obviously affected, since durability is more in the public eye. Therefore, it seems appropriate to evaluate how recycled aggregates may influence two important issues for reinforced concrete structures, as seismic behaviour and steel reinforcement corrosion. They are both significant and easily recognizable by the public opinion and then able to promote the elimination of unjustified prejudices.*

## **Introduzione**

Lavori pubblicati nell'ultimo decennio [Corinaldesi e Moriconi, 2001; Moriconi, 2005a; Naik e Moriconi, 2005] mostrano come l'obiettivo del completo riutilizzo delle macerie da demolizione degli edifici esistenti sia ragionevolmente e facilmente conseguibile. Ad esempio, si è dimostrato [Corinaldesi e Moriconi, 2001] che, in relazione al loro impiego nel calcestruzzo strutturale, la perdita di resistenza conseguente alla totale sostituzione dell'aggregato naturale con quello riciclato può essere recuperata mediante l'uso contemporaneo di cenere volante e additivi superfluidificanti, così come sono state messe in evidenza [Naik e Moriconi, 2005] la fattibilità e l'opportunità dell'impiego dell'aggregato riciclato, come azione in grado di conciliare sostenibilità e durabilità.

Sulla base di questi risultati è possibile effettuare un confronto tra le prestazioni di un calcestruzzo ordinario e quello confezionato con aggregati riciclati, appartenenti alla stessa classe di resistenza. In particolare, a parità di resistenza a compressione, il calcestruzzo con aggregati riciclati mostra [Corinaldesi e Moriconi, 2006]:

- una resistenza a trazione inferiore (10% circa);
- un modulo elastico inferiore (20% circa);
- la stessa tensione di aderenza con le barre di acciaio;
- lo stesso grado di vulnerabilità alla fessurazione;
- caratteristiche di durabilità almeno equivalenti;
- nessun problema di cessione di sostanze potenzialmente pericolose per l'ambiente [Sani et al., 2005].

In effetti, la possibilità di utilizzare aggregati riciclati da demolizione di strutture civili per confezionare calcestruzzo strutturale per nuove strutture è stata recepita dalle Norme Tecniche per le Costruzioni emanate nel 2008.

## **Normativa, pregiudizi ed alibi**

Le Norme Tecniche per le Costruzioni attualmente in vigore, emanate con D.M. 14 gennaio 2008 (Suppl. Ord. n. 30 G.U. 04/02/2008 n. 29), al Cap. 11 (Materiali e prodotti per uso strutturale), 11.2 (Calcestruzzo), Par. 11.2.9 (Componenti del calcestruzzo), 11.2.9.2 (Aggregati), affermano che “sono idonei alla produzione di calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, ovvero provenienti da processi di riciclo conformi alla norma europea armonizzata UNI EN

12620 [1] e, per gli aggregati leggeri, alla norma europea armonizzata UNI EN 13055-1". Il sistema di attestazione della conformità di tali aggregati, ai sensi del DPR n. 246/93, è 2+ per l'uso in calcestruzzo strutturale. La stessa norma indica che: "È consentito l'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo, secondo i limiti di cui alla *Tabella 11.2.III*".

| Origine del materiale da riciclo   | Classe del calcestruzzo                   | Percentuale di impiego |
|--|---|------------------------|
| Demolizioni di edifici (macerie)   | = C 8/10                                  | fino al 100%           |
| Demolizioni di solo calcestruzzo e calcestruzzo armato   | ≤ C30/37                                  | ≤ 30%                  |
|  | ≤ C20/25                                  | fino al 60%            |
| Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe da calcestruzzi > C45/55 | ≤ C45/55                                  | fino al 15%            |
|  | Stessa classe del calcestruzzo di origine | fino al 5%             |

**Tabella 11.2.III**

Limiti nell'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo.

Nonostante l'intenzione del normatore di emanare una norma prestazionale, è indubbio che la Tabella 11.2.III mantiene un carattere decisamente prescrittivo, e che l'indicazione che nelle prescrizioni di progetto si debbano "individuare i requisiti chimico-fisici, aggiuntivi rispetto a quelli fissati per gli aggregati naturali, che gli aggregati riciclati devono rispettare, in funzione della destinazione finale del calcestruzzo e delle sue proprietà prestazionali (meccaniche, di durabilità e pericolosità ambientale, ecc.), nonché quantità percentuali massime di impiego per gli aggregati di riciclo, o classi di resistenza del calcestruzzo, ridotte rispetto a quanto previsto nella tabella sopra esposta" sia quanto meno protezionistica.

E se appare ancora protezionistica l'indicazione che vincola "l'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo, secondo i limiti di cui alla Tabella 11.2.III" alla "condizione che la miscela di calcestruzzo confezionata con aggregati riciclati, venga preliminarmente qualificata e documentata attraverso idonee prove di laboratorio", la prescrizione che per gli aggregati riciclati "le prove di controllo di produzione in fabbrica di cui ai prospetti H1, H2 ed H3 dell'annesso ZA della norma europea armonizzata UNI EN 12620, per le parti rilevanti, devono essere effettuate ogni 100 tonnellate di aggregato

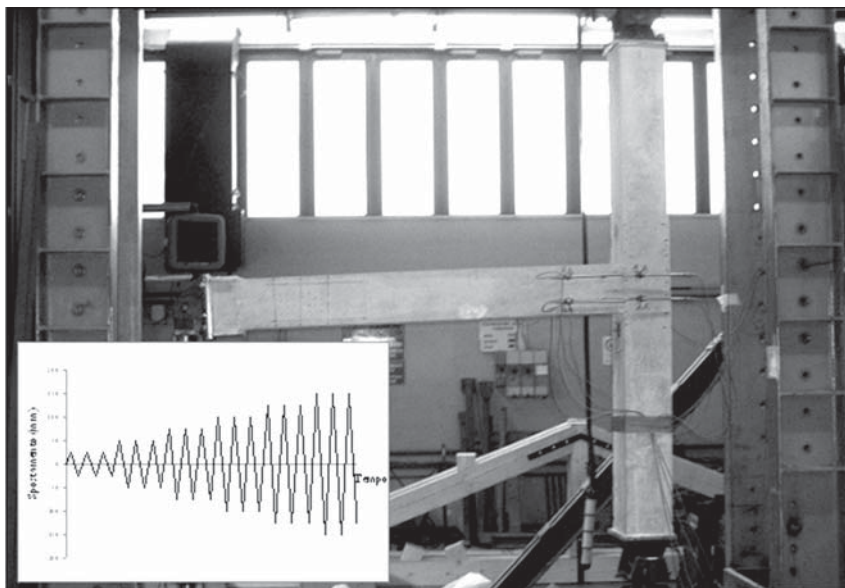
prodotto e, comunque, negli impianti di riciclo, per ogni giorno di produzione” sembra certamente dissuasiva dal loro impiego. In questo quadro, apparentemente tendente a favorire l'utilizzo di aggregati riciclati limitando lo sfruttamento di risorse naturali non rinnovabili, non solo tale utilizzo non è decollato, ma la disponibilità di aggregati riciclati si è drasticamente ridotta, rendendo di fatto irrealizzabili anche le sparute applicazioni in cui l'impiego di tali aggregati era previsto in capitolati di amministrazioni pubbliche nel rispetto del D.M. 08 maggio 2003 n. 203 (noto anche come “Decreto 30%”), emanato con l'obiettivo di incentivare il ricorso a materie prime seconde e quindi a sostenere la nascita e lo sviluppo di un mercato dei materiali riciclati e recuperati, imponendo ad amministrazioni pubbliche e società a controllo pubblico il ricorso a prodotti riciclati per coprire almeno il 30% del fabbisogno annuo di materiali e beni. Sulla base di una recente indagine condotta da ATECAP [ATECAP, 2013], secondo gli operatori dell'industria delle costruzioni le cause del mancato utilizzo risiedono nell'ordine in:

- scarsità o addirittura assenza di domanda di calcestruzzo preconfezionato prodotto utilizzando aggregati riciclati;
- mancanza di certezza sulle caratteristiche tecniche degli aggregati riciclati (che, peraltro, devono essere marcati CE per l'utilizzo);
- difficoltà nel reperimento di tale materia prima seconda;
- mancanza di compatibilità delle proprietà degli aggregati riciclati con le norme tecniche sulla produzione di calcestruzzo;
- assenza di offerta di aggregati riciclati nel territorio di competenza;
- mancato sviluppo di adeguate miscele.

Appare evidente come il problema del mancato decollo dell'uso di aggregati riciclati non sia pertanto riconducibile ad aspetti tecnici o tecnologici, quanto normativi, economici, amministrativi e legislativi. È, in realtà, innegabile che, se da un lato le norme autorizzano l'uso di aggregati riciclati per il confezionamento di calcestruzzo strutturale, dall'altro lo rendono quanto meno complicato con indicazioni specifiche spesso protezionistiche, quando non illogiche ed ingiustificate, e talora persino dissuasive dall'utilizzo, inducendo sospetti nel progettista che intendesse ricorrervi. E la disponibilità di aggregati riciclati sarà sempre scarsa, se non nulla, in assenza di precise direttive governative che incidano sul mercato di tali risorse, sugli obblighi delle amministrazioni locali e sulla repressione di forme di sfruttamento e smaltimento illecite.

## L'aspetto tecnico ed i pregiudizi da superare

### *Comportamento sotto carico ciclico del calcestruzzo con aggregati riciclati*



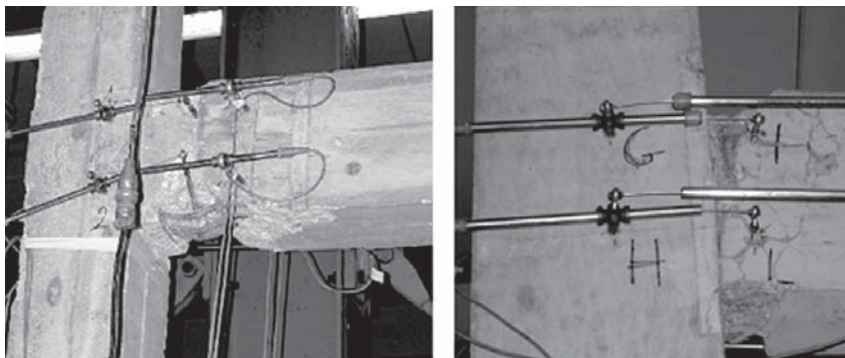
**Figura 1.**

Assemblaggio della prova di carico ciclico sul nodo trave-pilastro con relativo diagramma degli spostamenti imposti.

Al fine di superare un pregiudizio non più difendibile, soprattutto nell'ottica di uno sviluppo realmente sostenibile, si è verificato il comportamento sotto carico ciclico di nodi trave-pilastro (*Figura 1*) realizzati in calcestruzzo confezionato con aggregati grossi in calcestruzzo riciclato [Letelier et al., 2014], considerando che il minor valore della resistenza a trazione e del modulo elastico di tale calcestruzzo può indurre un diverso meccanismo di rottura del nodo trave-pilastro (*Figura 2*).

I risultati della sperimentazione, condotta su elementi di dimensioni quasi reali, hanno dimostrato che è possibile ottenere anche per questi nodi, adottando opportuni accorgimenti di calcolo che tengano conto del diverso comportamento a taglio e della diversa rigidità degli elementi strutturali in calcestruzzo con aggregato riciclato, soddisfacenti valori di duttilità e tenacità durante cicli di carico che simulino l'azione sismica.

Infatti, la maggiore deformabilità del calcestruzzo con aggregati riciclati consente di ottenere gli stessi livelli di duttilità del calcestruzzo ordinario nonostante la minore resistenza a trazione.



**Figura 2.** Danneggiamento del nodo in calcestruzzo ordinario (a sinistra) e di quello con aggregati riciclati (a destra).

In particolare, l'analisi delle curve di isteresi mostra come, allontanandosi dal campo elastico, e quindi per gli spostamenti imposti più elevati, si riscontri un maggior effetto di ingranamento degli aggregati riciclati lungo le fessure a causa della loro maggiore rugosità superficiale.

Questo effetto contribuisce ad aumentare la resistenza a taglio del calcestruzzo con aggregati riciclati, poiché risultano maggiori i valori di forza ottenuti per lo spostamento massimo. Inoltre, per il calcestruzzo con aggregati riciclati il rapporto fra energia dissipata,  $E_d$ , ed energia assorbita,  $E_a$ , (Tabella 1) aumenta all'aumentare dello spostamento imposto.

Il calcestruzzo con aggregati riciclati, pertanto, mostra sotto sollecitazione sismica un comportamento simile al calcestruzzo tradizionale, ma è in grado di accentuare la dissipazione di energia grazie al suo minor modulo elastico e quindi alla sua maggior duttilità.

Questo comportamento suggerisce nuovi criteri di progettazione per questo calcestruzzo, basati sulla resistenza a taglio piuttosto che a trazione e sulla rigidità, che lo rendono idoneo e perfettamente funzionale per impieghi strutturali anche in aree sismiche, non consentendo pertanto alibi di natura tecnica o progettuale che ne possano prevenire o sconsigliare il normale impiego.

| Spostamento imposto, d | Ciclo di carico | $E_d$ (kNmm) | $E_a$ (kNmm) | $E_d/E_a$ |
|------------------------|-----------------|--------------|--------------|-----------|
| ± 25 mm                | I               | 353,86       | 503,04       | 0,70      |
|                        | II              | 293,06       | 474,51       | 0,62      |
|                        | III             | 302,99       | 491,94       | 0,62      |
| ± 50 mm                | I               | 1178,02      | 1579,35      | 0,75      |
|                        | II              | 992,32       | 1408,47      | 0,70      |
|                        | III             | 867,63       | 1280,02      | 0,68      |
| ± 75 mm                | I               | 2144,89      | 2610,14      | 0,82      |
|                        | II              | 1963,24      | 2468,02      | 0,80      |
|                        | III             | 1859,85      | 2362,99      | 0,79      |
| ± 100 mm               | I               | 3291,66      | 3845,36      | 0,86      |
|                        | II              | 3007,39      | 3572,09      | 0,84      |
|                        | III             | 3144,56      | 3690,02      | 0,85      |
| ± 125 mm               | I               | 4172,00      | 4752,01      | 0,88      |
|                        | II              | 4027,48      | 4467,50      | 0,90      |
|                        | III             | 2617,37      | 3058,85      | 0,86      |

**Tabella 1.**

Energia dissipata ( $E_d$ ) rispetto a quella assorbita ( $E_a$ ).

### ***La corrosione delle armature nel calcestruzzo con aggregati riciclati***

Il comportamento alla corrosione del calcestruzzo strutturale confezionato con materiali di riciclo, specialmente in presenza di fessure (sempre presenti con diversa apertura nelle strutture reali in calcestruzzo [Coleman, 2013]), è stato già studiato [Moriconi, 2005b]. Di fatto, per una stessa classe di resistenza, l'impiego di aggregati riciclati al posto di quelli naturali non risulta così influente sulla corrosione delle armature come invece potrebbe esserlo l'aggiunta di cenere volante, a causa della depassivazione indotta dalla sua reazione pozzolanica. Tuttavia, è opportuno anche osservare che, quando viene utilizzata cenere volante in un calcestruzzo con aggregati riciclati, la sua struttura porosa risulta migliorata, in particolare con la riduzione del volume di macropori ed il conseguente miglioramento delle prestazioni in termini di resistenza a compressione e trazione e di tensione di aderenza con le barre di armatura [Corinaldesi et al., 2002].

I risultati che seguono derivano da una ricerca su vasta scala [Moriconi,

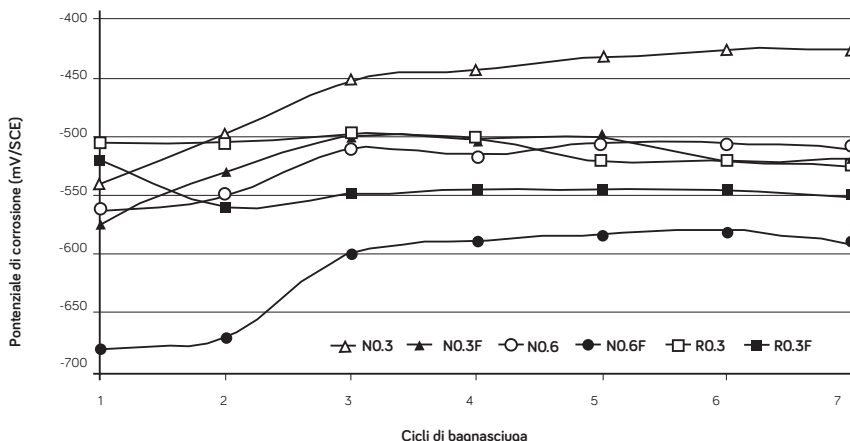


2005b] condotta mediante prove di corrosione su provini di calcestruzzo armato fessurati. L'armatura era costituita da lamine in acciaio, invece di barre, allo scopo di modulare l'apertura della fessura e di accelerare il processo corrosivo in conseguenza di un rapporto fra area catodica ed area anodica molto maggiore. Il processo corrosivo è stato monitorato mediante misure del potenziale di libera corrosione e di resistenza di polarizzazione durante l'esposizione dei provini a cicli settimanali di bagnasciuga in una soluzione al 10% di cloruro di sodio, per simulare un ambiente particolarmente aggressivo come, ad esempio, quello del trattamento con sali disgelanti. Sono state utilizzate differenti miscele di calcestruzzo (identificate attraverso il tipo di aggregato, N se naturale e R se riciclato, il rapporto acqua/cemento, 0,3 o 0,6, e l'aggiunta di cenere volante, F quando presente) allo scopo di classificare i calcestruzzi in tre diverse classi di resistenza, [2] pari a 50-60 MPa, 30-40 MPa e 10-20 MPa rispettivamente. I dati riportati nella *Figura 3* indicano che, sostituendo integralmente l'aggregato naturale con quello riciclato e/o aggiungendo elevati volumi (50% in peso del cemento) di cenere volante alla miscela del calcestruzzo, non si hanno effetti negativi sul comportamento alla corrosione dell'armatura di acciaio a parità di classe di resistenza del calcestruzzo. In effetti, l'acciaio assume valori di potenziale corrispondenti a livelli di rischio di corrosione diversi in funzione della classe di resistenza del calcestruzzo ed indipendentemente dalla composizione della miscela adottata: minimo rischio (potenziale meno negativo) per la classe di resistenza più alta (NO.3), massimo rischio (potenziale più negativo) per la classe di resistenza più bassa (NO.6F e RO.3F), e rischio intermedio per la classe di resistenza intermedia (NO.6, NO.3F e RO.3). Questo andamento del potenziale di libera corrosione è stato completamente confermato dalle misure di resistenza di polarizzazione.

Tuttavia, le prove elettrochimiche rappresentano un quadro parziale del comportamento alla corrosione dell'armatura, poiché le misure possono essere effettuate solo durante il periodo di immersione, senza alcuna possibilità di valutazione dell'area della superficie metallica che si sta effettivamente corrodendo.

Pertanto, dopo sette cicli di bagnasciuga, da tutti i provini sono state estratte le lamine di armature allo scopo di valutare visivamente l'area corrosa (*Figura 4*). Tutte le lamine sono caratterizzate da un forte attacco

corrosivo all'apice della fessura, giustificato dall'elevata concentrazione di cloruri rilevata sulla superficie delle lamine (2-5% in peso del cemento), molto maggiore del valore ritenuto critico (0.4% in peso del cemento) per l'innescò della corrosione. Tuttavia, da un punto di vista morfologico, in presenza di aggregati riciclati e di cenere volante, l'attacco appare più diffuso e meno penetrante rispetto a quello rilevato nel calcestruzzo con aggregati naturali, in cui un attacco più localizzato ha persino provocato la tranciatura della lamina nonostante l'elevata classe di resistenza del calcestruzzo.



**Figura 3.**

Influenza degli aggregati riciclati (R) e/o dell'aggiunta di cenere volante (F) sul potenziale di libera corrosione dell'acciaio annesso in calcestruzzo fessurato in funzione del numero di cicli di bagnasciuga in soluzione acquosa al 10% di cloruro di sodio.



**Figura 4.**

Osservazione visiva dell'attacco corrosivo sulle lamine di acciaio annesso in calcestruzzo con aggregati naturali (NO.3, a sinistra), con aggregati riciclati (RO.3, al centro) e con elevato volume di cenere volante (NO.3F, a destra).

## Conclusioni

La fattibilità e l'efficacia dell'utilizzo di materiali riciclati nel calcestruzzo, strutturale o meno, e nei materiali da costruzione in generale, è stata ampiamente confermata da numerosi studi che hanno, in particolare, dimostrato il buon comportamento in area sismica ed alla corrosione delle armature del calcestruzzo con aggregati riciclati. Pertanto, solo pregiudizi culturalmente ingiustificati e la latitanza di indirizzi politici responsabili impediscono l'affermazione di una scelta ineludibile nell'unico scenario possibile di uno sviluppo sostenibile.

## Note

- [1] In Italia dal 2006 i controlli di qualità relativi alle proprietà chimiche, fisiche e geometriche degli aggregati riciclati per la loro marcatura CE devono essere condotti secondo la norma UNI EN 12620 per poter essere impiegati nella produzione di calcestruzzo.
- [2] Il calcestruzzo della classe di resistenza più alta, di riferimento, è rappresentato da N0.3. Calcestruzzi ordinari con resistenza a compressione di circa 30-40 MPa sono rappresentati da N0.6.  
I calcestruzzi N0.3F e R0.3 appartengono a questa classe di resistenza, poiché in presenza di cenere volante o aggregati riciclati il rapporto acqua/legante deve essere ridotto a 0,3 per raggiungere la stessa classe di resistenza. Infine, calcestruzzi di scarsa qualità con resistenza a compressione di circa 10-20 MPa sono rappresentati da R0.3F e N0.6F.

## Riferimenti bibliografici

- ATECAP [2013]. "Rapporto ATECAP sull'uso degli aggregati riciclati nella produzione di calcestruzzo preconfezionato", 9/2013.
- Coleman, J. W. [2013]. "Cracking ... Defect or Normal?", Concrete International, 35(9), 35-38.
- Corinaldesi, V. e Moriconi, G. [2001]. "Role of chemical and mineral admixtures on performance and economics of recycled-aggregate concrete" in Malhotra, V. M. (ed.), Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Proc. Seventh CANMET/ACI Intern. Conf., Madras (IND), 22-27 July 2001, SP-199, American Concrete Institute, Farmington Hills, (USA), 869-884.
- Corinaldesi, V. e Moriconi, G. [2006]. "Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading", Journal of Materials in Civil Engineering, 18(5), 650-658.
- Corinaldesi, V.; Moriconi, G. e Tittarelli, F. [2002]. "Sustainable and Durable Reinforced Concrete Construction" in Malhotra, V. M. Innovations in Design with Emphasis on Seismic, Wind and Environmental Loading, Quality Control and

- Innovations in Materials/Hot-Weather Concreting, SP-209, American Concrete Institute, Farmington Hills (USA), 169-186.
- Letelier González, V. C. e Moriconi, G. [2014]. "The influence of recycled concrete aggregates on the behavior of beam-column joints under cyclic loading", *Engineering Structures*, 60, 148-154.
  - Moriconi, G. [2005a]. "Aggregate from recycled concrete and demolition wastes" in Bhanumathidas, N. e Kalidas, N. (eds.), *Concrete Technology for Sustainable Development with Emphasis on Infrastructure*, Proc. Second Intern. Symp., Hyderabad (IND), 27 February – 3 March 2005, 543-555.
  - Moriconi, G. [2005b]. "Reinforcement corrosion experience with concrete mixtures containing fly ash" in Bhanumathidas N. e Kalidas, N. (eds.), *Concrete Technology for Sustainable Development with Emphasis on Infrastructure*, Proc. Second Intern. Symp., Hyderabad (IND), 27 February – 3 March 2005, 69-81.
  - Naik, T. R. e Moriconi, G. [2005]. "Environmental-friendly durable concrete made with recycled materials for sustainable concrete construction" in Malhotra, V. M. e Sakai, K. (eds.), *Sustainable development of cement, concrete and concrete structures*, Proc. Three-day Intern. Symp., Toronto (CND), 5-7 October 2005, 485-505.
  - Sani, D; Moriconi, G; Fava, G; Corinaldesi, G. [2005]. "Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates", *Waste Management*, 25(2), 177-182.