



PRODUZIONE E CONTROLLO DI AGGREGATI RICICLATI O ARTIFICIALI PER IL CONFEZIONAMENTO DI CALCESTRUZZO



Ing. Flora Faleschini
Ricercatore di Tecnica delle Costruzioni
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – ICEA
Università degli Studi di Padova

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Aggregati nel calcestruzzo

- Gli aggregati artificiali si possono classificare in base alla loro **PROVENIENZA** ed alle loro **CARATTERISTICHE**.
- Si possono distinguere in aggregati derivanti da **minerali trattati** (es. vermiculite e perlite), da **residui industriali** (es. loppe d'altoforno) oppure **organici** (es. particelle di legno o polistirolo espanso).
- In relazione alla loro proprietà, si possono distinguere in **aggregati alleggeriti** realizzati con argilla espansa, particelle riciclate di polietilene tereftalato (PET), granuli di cloruro di polivinile (PVC), etc.; gli **aggregati pesanti**, realizzati a partire dal riciclo di scorie di acciaieria da forno elettrico ad arco (scorie EAF); **altri aggregati volti a conferire specifiche proprietà al calcestruzzo**, ad esempio in gomma da riciclo di pneumatici.



27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Aggregati nel calcestruzzo Normativa di riferimento

QUADERNI PER I PRODUTTORI
DI CALCESTRUZZO PRECONFEZIONATO

- DM 17/01/2018: Norm
- UNI EN 12620: 2008 -
- UNI 8520-1: 2015 - I
della EN 12620 – Parte
- UNI 8520-2: 2016 – I
della EN 12620 – Parte
- UNI EN 206: 2016 - C
produzione e conformit
- UNI 11104: 2016 - C
conformità - Specificaz
UNI EN 206
- UNI EN 933-11 - F
geometriche degli agg
per i costituenti degli a

04

IL CONFEZIONAMENTO
DEL CALCESTRUZZO CON
AGGREGATI RICICLATI O
ARTIFICIALI
LINEE GUIDA



SETTEMBRE
2018

one
one
one,
ie e
lella
che
one



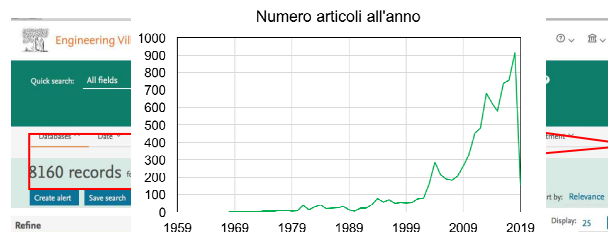
27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Aggregati nel calcestruzzo

Studi e ricerche .. da oltre 30 anni

- 1979: l'ASTM definisce alcuni requisiti per l'accettazione del materiale proveniente da demolizioni strutturali, quale aggregato per il confezionamento di nuovi calcestruzzi nella norma **ASTM C 125**.
- 1981: nascita del primo comitato tecnico **RILEM 37-DRC (Demolition and Reuse of Concrete)** per lo studio delle potenzialità di impiego degli aggregati riciclati, e successiva definizione delle caratteristiche prestazionali minime.



numero crescente di
studi riguardanti l'uso
di aggregati riciclati
negli ultimi 15 anni

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



NTC2018

•Le Norme Tecniche per le Costruzioni prevedono la possibilità di utilizzare aggregati di **origine naturale, artificiale e provenienti da processi di riciclo**, **conformi** alla norma EN 12620 (EN 13055 per i leggeri).

•**Conformità** per uso strutturale: sistema di valutazione 2+.

•L'**idoneità** all'utilizzo di questi aggregati è riportata al **Capitolo 11**, dove sono indicate le **percentuali massime di aggregato grosso proveniente da riciclo** impiegabile, distinte in base all'**origine** del materiale da riciclo ed alla **classe di resistenza del calcestruzzo** da confezionare.

•Non vi sono riferimenti sulla **classe di esposizione ambientale** del calcestruzzo dove essi sono impiegati.



NTC2018: aggregati riciclati

Tab. 11.2.III

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



Tabella E.2 EN 206 - Massima percentuale di sostituzione dell'aggregato grosso (% in massa)

Tipologia di aggregati riciclati	Classi di esposizione			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Tutte le restanti classi di esposizione
Tipo A: (R _c , R _{cu} , R _{b10} , R _a , F _L , X _{Rg}) ^{a)}	50%	30%	30%	0%
Tipo B: (R _c , R _{cu} , R _b , R _a , F _L , X _{Rg}) ^{b)}	50%	20%	0%	0%

a) Aggregati riciclati di Tipo A derivanti da una fonte nota possono essere usati in classi di esposizione in cui il calcestruzzo originale era progettato con una percentuale massima di sostituzione del 30%.

b) Aggregati riciclati di Tipo B non possono essere usati in calcestruzzo con classi di resistenza a compressione > C30/37.

Non vi sono limitazioni per gli aggregati di origine industriale, né per le % di sostituzione né per le dimensioni dell'inerte



NTC2018: aggregati riciclati – classificazione secondo UNI EN 12620

COSTITUENTE	DESCRIZIONE
Rc	Calcestruzzo, prodotti di calcestruzzo, malte. Mattoni in calcestruzzo
Ru	Aggregati non legati, aggregati naturali. Aggregati legati con leganti idraulici
Rb	Frammenti di mattoni in argilla (i.e. mattoni e tegole). Frammenti di mattoni silicei. Calcestruzzo aerato non galleggiante
Ra	Materiali bituminosi
FL	Materiale lapideo galleggiante (in volume)
	Altri materiali:
X	Materiali coesivi (i.e. argilla e terre). Materiali vari: metalli (ferrosi e non ferrosi), Legno non galleggiante, plastica e sughero. Cartongesso
Rg	Vetro

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



NTC2018: aggregati riciclati – classificazione secondo UNI EN 12620

Costituente	Contenuto % in massa	Categoria	Costituente	Contenuto % in massa	Categoria
Rc	≥ 90	Rc₉₀	Ra	≤ 10	Ra₁₀₋
	≥ 80	Rc₈₀		≤ 5	Ra₅₋
	≥ 70	Rc₇₀		≤ 1	Ra₁₋
	≥ 50	Rc₅₀		No requirement	Ra_{NR}
	< 50	Rc_{Declared}	X + Rg	≤ 0,5	XRg_{0,5-}
Rc + Ru	No requirement	Rc_{NR}		≤ 1	XRg₁₋
	≥ 95	Rcu₉₅		≤ 2	XRg₂₋
	≥ 90	Rcu₉₀	FL	≤ 0,2 ^{a)}	FL_{0,2-}
	≥ 70	Rcu₇₀		≤ 2	FL₂₋
	≥ 50	Rcu₅₀		≤ 5	FL₅₋
Rb	< 50	Rcu_{Declared}	a) La categoria ≤ 0,2- è destinata solo ad applicazioni speciali che richiedono alta qualità di finitura superficiale		
	No requirement	Rcu_{NR}			
	≤ 10	Rb₁₀₋			
	≤ 30	Rb₃₀₋			
	≤ 50	Rb₅₀₋			
	> 50	Rb_{Declared}			
	No requirement	Rb_{NR}			

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



NTC2018: aggregati riciclati – UNI EN 12620

Proprietà ^{a)}	Rif.to della EN 12620	Tipo	Categoria secondo EN 12620
Contenuto di fini	4.6	A + B	Categoria o valore da dichiarare
Indice di appiattimento/forma	4.4	A + B	$\leqslant FI_{50}$ or $\leqslant SI_{55}$
Resistenza alla frammentazione	5.2	A + B	$\leqslant LA_{50}$ or $\leqslant SZ_{38}$
Massa volumica delle particelle essiccate in stufa ρ_{rd}	5.5	A B	$\geqslant 2\ 100\ kg/m^3$ $\geqslant 1\ 700\ kg/m^3$
Assorbimento d'acqua	5.5	A + B	Valore da dichiarare
Costituenti ^{b)}	5.8	A B	$Rc_{90}\ Rc_{u95}\ Rb_{10-},\ Ra_1,\ FL_2,\ XRg_1,$ $Rc_{50}\ Rc_{u70}\ Rb_{30-},\ Ra_5,\ FL_2,\ XRg_2.$
Contenuto di solfati idrosolubili	6.3.3	A + B	$\leqslant SS_{0,7}$
Contenuto di ioni cloruro solubili in acido	6.2	A + B	Valore da dichiarare
Influenza sul tempo di inizio presa	6.4.1	A + B	$\leqslant A_{40}$

a) La categoria NR (nessun requisito) si applica a tutte le altre proprietà non specificate nel presente prospetto per le quali può essere dichiarata una categoria NR in accordo alla EN 12620.

b) Per applicazioni speciali che richiedono una finitura superficiale di qualità il costituente FL dovrebbe essere limitato alla categoria $FL_{0,2}$.

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Aggregati industriali/artificiali

• **Definizione** (EN 12620:2008): aggregati ottenuti **sottoponendo a processi industriali** (che implica una modificazione termica o di altro tipo) materie prime organiche e inorganiche.

• **Origine**: sono **rifiuti non pericolosi e inerti** che vengono recuperati, e pertanto non possono dare adito a trasformazioni fisiche, chimiche e biologiche.

• **Analisi merceologica (esempi)**:

- scorie di fonderia da acciaieria;
- scorie di fusione;
- rifiuti del trattamento delle scorie;
- rivestimenti e materiali refrattari a base di carbone;
- provenienti dalle lavorazioni metallurgiche e non;
- rifiuti derivanti dalla lavorazione della pietra;
- rifiuti prodotti dalla lavorazione della pietra;
- forme e anime da fonderia utilizzate e non;
- scarti di ceramica, mattoni, mattonelle e materiali da costruzione (sottoposti a trattamento termico);
- rifiuti della produzione di materiali compositi a base di cemento;
- rifiuti e fanghi di cemento;
- miscele bituminose.

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Aggregati industriali/artificiali: esempio – Espansione delle scorie di acciaieria

fessure dovute
all'espansione della
scoria «fresca»



Superficie della scoria durante il
trattamento di «stabilizzazione
volumetrica»

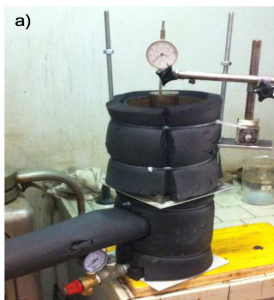


Densities	Fraction	Apparent Density (kg/m ³)	Water Absorption (%)	Bulk density (kg/m ³)	Porosity (%)
Fresh slag	Mixed	3750	1 – 1.5	3850	1.76-7.78 *
Weathered slag	0-4 mm	3800	1 - 1.5	3940	2
	4-8 mm	3970	< 1	4270	0.49 – 2.69 **
	8-12 mm	3950			
	12-16 mm	3900			

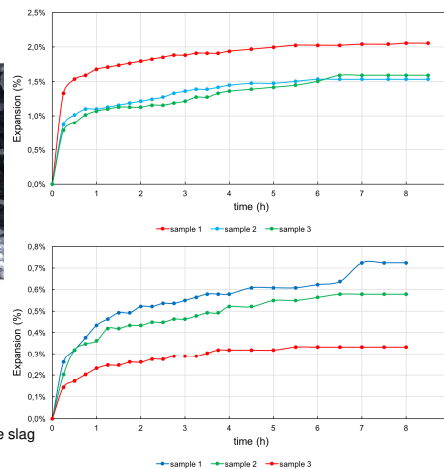
27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Aggregati industriali/artificiali: esempio – Espansione delle scorie di acciaieria



riferimento normativo:
EN 1744 –1, punto 19.3



Santamaria et al. (2018) Dimensional stability of Electric Arc Furnace slag
in civil engineering applications. J Clean Prod 205: 599-609.

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Calcestruzzi con aggregati riciclati e industriali/artificiali: CAM Edilizia

- Vista la loro origine dai rifiuti il mondo del calcestruzzo ha da sempre avuto una certa **diffidenza nei confronti dell'impiego di aggregati alternativi ai naturali** poiché la loro qualità non sempre si era dimostrata adeguata allo scopo.
- L'introduzione dei **CAM Edilizia** (DM 11/10/2017) in questo senso può fare da **volano** per l'implementazione dell'uso di aggregati riciclati e artificiali nei calcestruzzi.

17A07435

DECRETO 11 ottobre 2017.

Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici.

IL MINISTRO DELL'AMBIENTE
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO
E DEL MARE

2.4_Specifiche tecniche dei componenti edilizi:

Criteri specifici per calcestruzzi confezionati in cantiere, preconfezionati e prefabbricati

- I CLS usati per il progetto devono essere prodotti con un contenuto minimo di materiale riciclato (secco) di **almeno il 5% in peso**;
- Tale contenuto è inteso come **somma delle percentuali di materia riciclata contenuta nei singoli componenti** (cemento, aggregati, aggiunte, additivi);
- Al fine del calcolo della massa di materiale riciclato va considerata la **quantità che rimane effettivamente nel prodotto finale**.

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Calcestruzzi con aggregati riciclati e industriali/artificiali: CAM Edilizia

È possibile produrre calcestruzzi ad uso strutturale che siano conformi al CAM? Quali sono gli step necessari per un corretto sviluppo di «calcestruzzi green» per un loro utilizzo sicuro in ambito strutturale?

1. Progettazione delle miscele con aggregati riciclati e/o artificiali (e alternative)
2. Verifica delle performances allo stato fresco
3. Verifica delle performances meccaniche e di durabilità
4. Valutazione degli impatti ambientali associati ad ogni miscela
5. Valutazione del comportamento strutturale con il «calcestruzzo green»

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Calcestruzzi con aggregati industriali/artificiali: esempio – CALCESTRUZZO EAF

1. Progettazione delle miscele con aggregati artificiali

Kubik Building (Zamudio, Spain):



* Courtesy of Prof. Manuel Manso (U Burgos) and Dr. Amaia Santamaria (U Basque Country)

R = 76%



FONDAZIONI*

156 m³ di calcestruzzo strutturale con scorie EAF:
375 kg/m³ CEM II – 42.5R; w/c=0.45;
80% di scoria EAF impiegata in sostituzione alla ghiaia;
100% di scoria EAF impiegata in sostituzione alla sabbia.



Calcestruzzi con aggregati industriali/artificiali: esempio – CALCESTRUZZO EAF

1 Progettazione delle miscele con aggregati artificiali

Product	HA-30/F/IIa+Qa (Agg. Siderurgical)
Cement II/B-M(V-L-S) 42,5R	385 +/- 15 Kg
Siliceous Sand	20%
Aggregate sand 0/4 (EAFS)	20%
Aggregate 8/12 (EAFS)	25%
Aggregate 12/25 (Escoria)	35%
Ratio water/cement	0,46 +/- 0,02
Mira 41(Grace)	0,4-0,6% spc
Adva 144 (Grace)	0,6-0,8% spc

R = 65%



* Courtesy of Prof. Manuel Manso (U Burgos) and Dr. Amaia Santamaria (U Basque Country)

PARETI *

55 m³ di calcestruzzo strutturale con scorie EAF:
385 kg/m³ CEM II – 42.5R; w/c=0.45;
100% di scoria EAF impiegata in sostituzione alla ghiaia;
50% di scoria EAF impiegata in sostituzione alla sabbia.



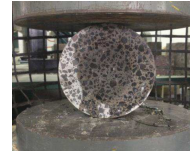
Calcestruzzi con aggregati industriali/artificiali: esempio – CALCESTRUZZO EAF

2.Verifica delle performances allo stato fresco

3.Verifica delle performances meccaniche e di durabilità

→ leggera riduzione della lavorabilità (additivi!), incremento della resistenza a compressione, a trazione, modulo elastico, minore porosità della matrice cementizia, riduzione del coefficiente di permeabilità, migliore durabilità*, migliore resistenza della ITZ, migliore aderenza del calcestruzzo con le barre di armatura, ...

A fronte di un incremento del peso specifico.



Mix ID:	TRA0-400
w/c ratio:	0.45
Admixture SP:	2
Test Name:	Chloride depth
Test Date:	13-04-15

Mix ID:	TRA0-400
w/c ratio:	0.45
Admixture SP:	2
Test Name:	Chloride depth
Test Date:	13-04-15

D_{app}: C400 = 59 mm²/y

D_{app}: E400 = 50 mm²/y

* Faleschini et al. (2015) High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties. Constr Build Mater 101: 113-121.



Calcestruzzi con aggregati industriali/artificiali: esempio – CALCESTRUZZO EAF

4.Valutazione degli impatti ambientali associati ad ogni miscela

Categoria	C400	E400	E350-1
Climate Change (kg CO ₂ eq.)	1.57E02	1.54E02	1.36E02
Eutrophication (kg PO ₄ eq.)	5.49E-02	5.48E-02	4.83E-02
Acidification (kg SO ₂ eq.)	5.26E-01	5.11E-01	4.53E-01



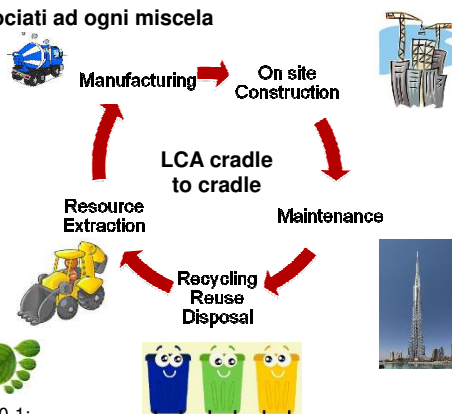
EFP C400:
157 kg CO₂/m³



EFP E400:
154kg CO₂/m³



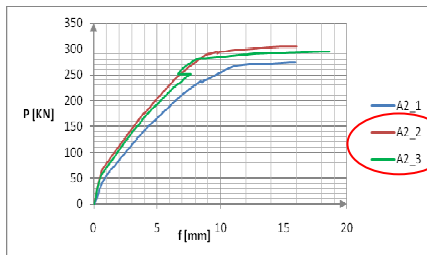
EFP E350-1:
136kg CO₂/m³



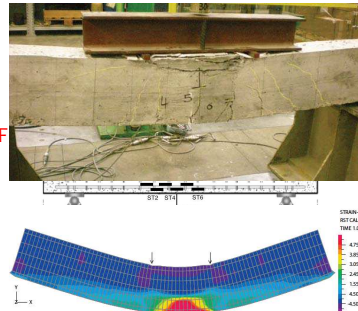


Calcestruzzi con aggregati industriali/artificiali: esempio – CALCESTRUZZO EAF

5. Comportamento strutturale della struttura realizzata con il «calcestruzzo green»:



CLS con
SCORIE EAF



Capacità portante di travi armate a flessione soggette a carichi verticali *

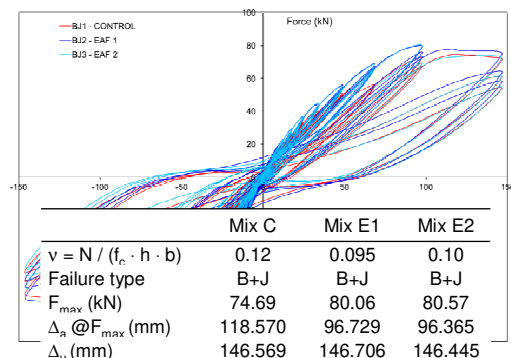
* Pellegrino & Faleschini (2013) Experimental Behavior of Reinforced Concrete Beams with Electric Arc Furnace Slag as Recycled Aggregate. ACI Materials Journal; 110(2): 197-205.

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Calcestruzzi con aggregati industriali/artificiali: esempio – CALCESTRUZZO EAF

5. Comportamento strutturale



Comportamento ciclico di nodi trave-colonna con calcestruzzo EAF*

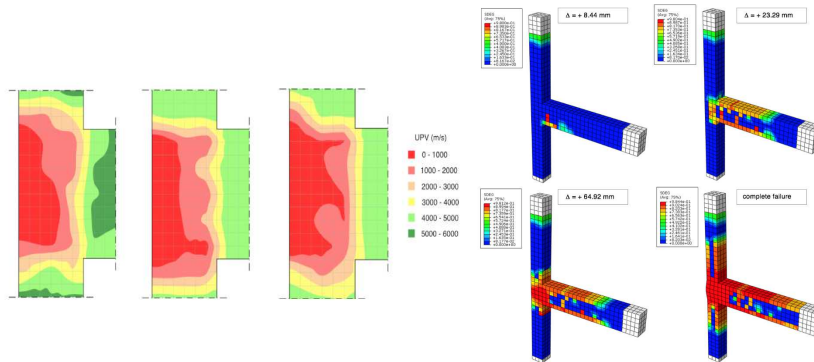
* Faleschini et al (2017) Experimental behavior of beam-column joints made with EAF concrete under cyclic loading. Engineering Structures 139: 81-95

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



Calcestruzzi con aggregati industriali/artificiali: esempio – CALCESTRUZZO EAF

5. Comportamento strutturale



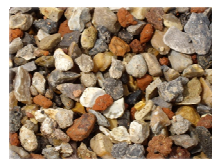
Comportamento ciclico di nodi trave-colonna con calcestruzzo EAF*

* Faleschini et al (2017) Experimental and numerical investigation on the cyclic behavior of RC beam column joints with EAF slag concrete. Eng Struct 152: 335-347.

27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



- Le attuali normative e linee guida stanno recependo le conoscenze relative alla valorizzazione di aggregati riciclati e artificiali per la produzione di calcestruzzo e miscele a base cementizia sviluppate in **più di trent'anni di attività di ricerca.**
- Il primo comitato scientifico 37-DRC (Demolition and Reuse of Concrete della RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de recherche sur les Matériaux et les constructions) nacque nel lontano 1981...
- ... dopo più di 35 anni, quale futuro si delinea per i calcestruzzi con aggregati artificiali e da riciclo?



27 Febbraio 2019 – RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE – Prospettive di economia circolare
Centro Conferenze alla "Stanga" — Padova



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria
Civile, Edile e Ambientale



Grazie per la vostra
attenzione!

contatto:

flora.faleschini@unipd.it