Edilizia e infrastrutture viarie
progettare la sostenibilità

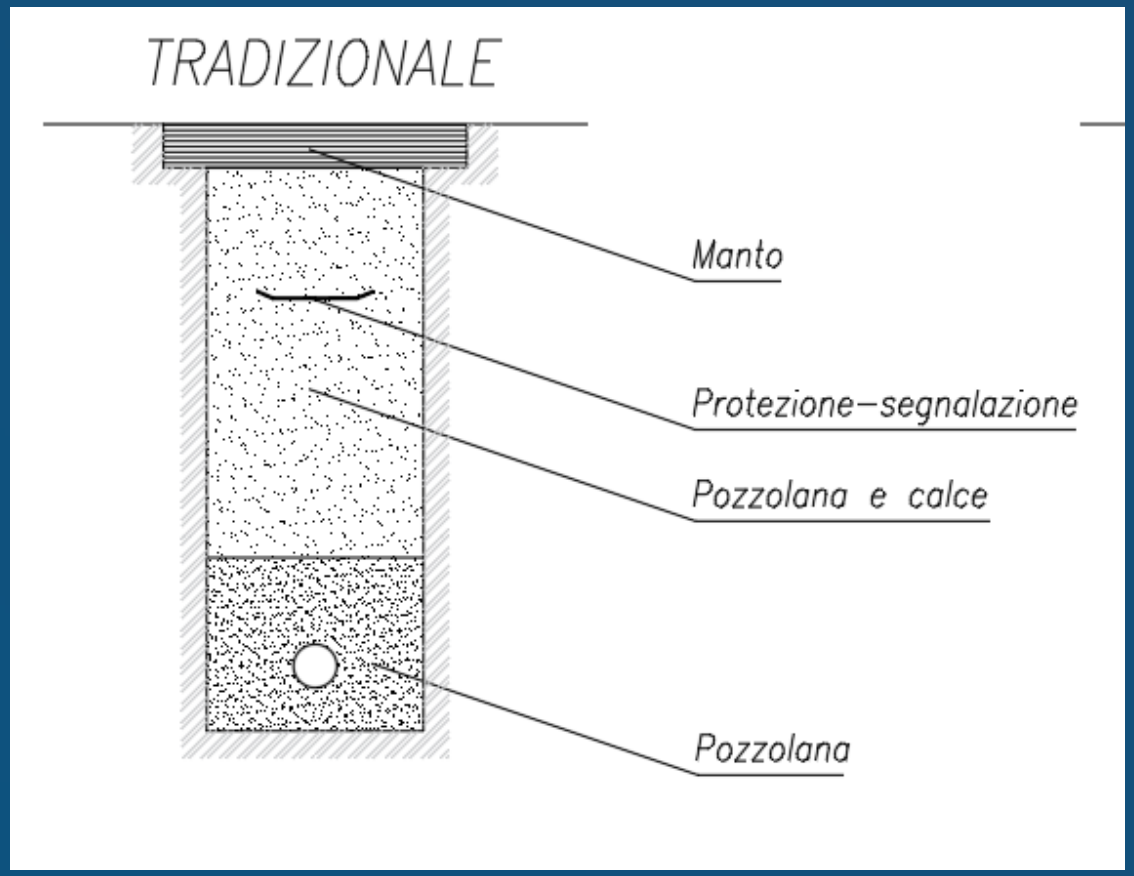
L'utilizzo di materiali riciclati per la realizzazione di infrastrutture sostenibili

ANTONIO D'ANDREA

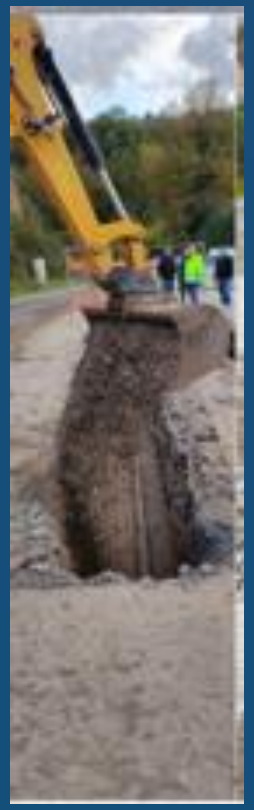
Sapienza Università di Roma

Lunedì 16 novembre 2026

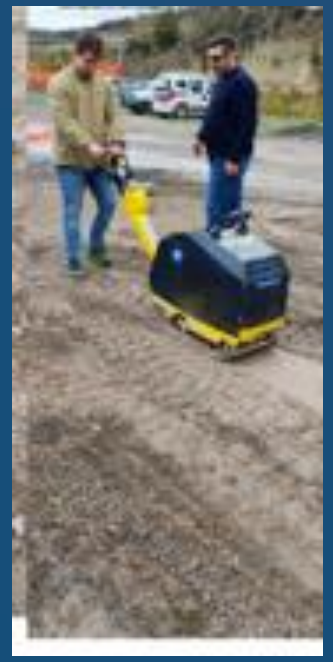
Metodologie di riempimento delle trincee per sottoservizi











LEGAMBIENTE
Edilizia e infrastrutture viarie
progettare la sostenibilità

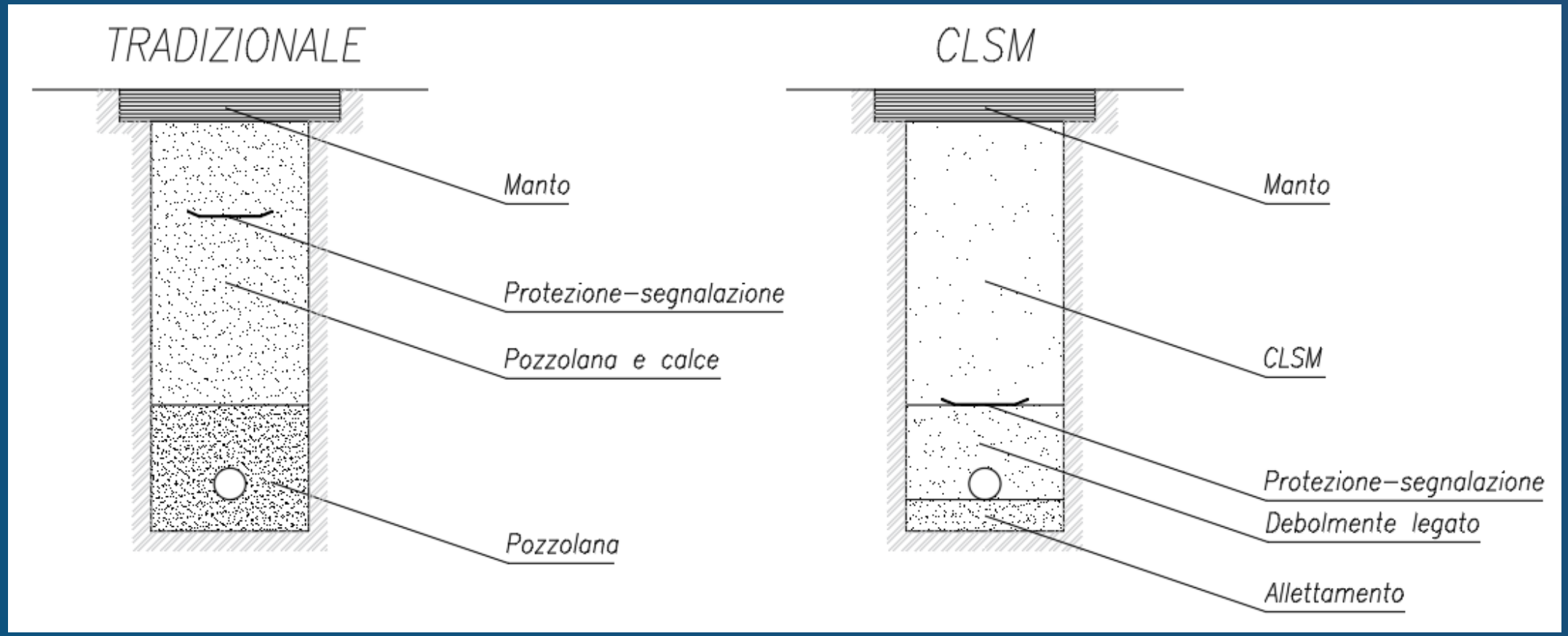
Metodologie di riempimento delle trincee per sottoservizi

Mariano Cupo Pagano

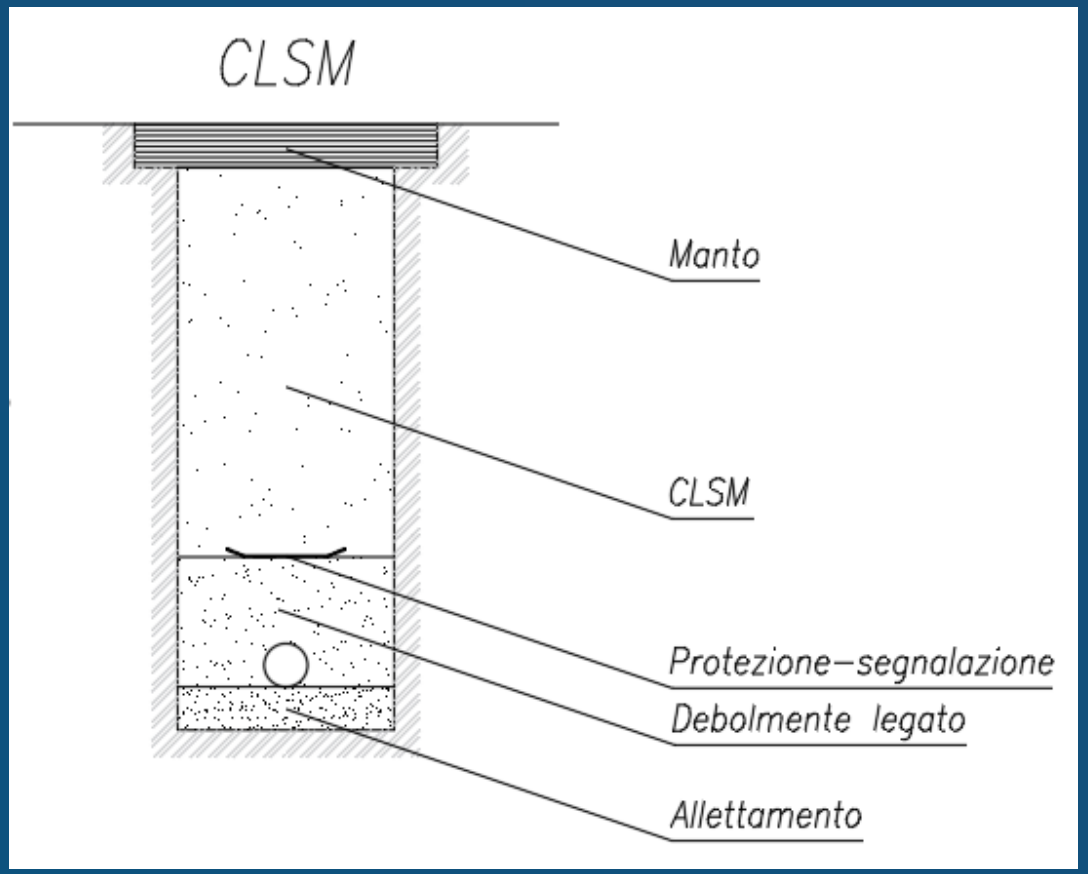




Metodologie di riempimento delle trincee per sottoservizi



Metodologie di riempimento delle trincee per sottoservizi



Miscele a bassa resistenza controllata

Materiali cementizi autolivellanti, da non costipare

Controlled Low Strength Material (CLSM)

Origine: 1964, Stati Uniti, poi Nuova Zelanda, etc.

Elevata fluidità per un facile e veloce riempimento senza mezzi costipanti.

Tempi di posa in opera 60 m^3/h, circa sei volte minori rispetto ai tradizionali riempimenti.

Costo delle materie prime e della preparazione all'impianto maggiore dei materiali tradizionali

Costo dell'intervento nel complesso più economico.

Caratteristiche prestazionali dipendenti dalla qualità del mix, ma non dall'accuratezza della posa in opera.

National Cooperative *Highway* Research Program (*NCHRP*)

I vantaggi che tipicamente si traggono dall'uso dei CLSM sono:

- Prontamente disponibile
- Facile da trasportare
- Facile da posare
- Resistente e durevole
- Transitabile in breve tempo
- Non vi sono abbassamenti significativi
- Aumenta la sicurezza degli operatori
- Può essere facilmente rimosso
- Riduce i test di ispezione
- Non richiede stoccaggio



La scelta dei materiali da impiegare nella preparazione della miscela è funzione di disponibilità, costo, specificità dell'applicazione, densità, resistenza, fluidità ed escavabilità.

Additivi aeranti e schiumogeni per ottenere specifiche caratteristiche prestazionali a breve o lungo termine in funzione dell'applicazione.

Letteratura sul Controlled Low Strength Material



ACI Report

La demolibilità è caratteristica fondamentale dei CLSM per riempimento cavi per sottoservizi.

L'escavabilità è correlata alla resistenza a compressione:

- minore di 3 daN/cm^2 → rimovibili manualmente;
- tra 7 daN/cm^2 e 14 daN/cm^2 → mezzi meccanici.

ma …… è importante anche il tipo di aggregati utilizzati:

- CLSM con aggregati grossi difficili da scavare anche se di bassa resistenza e.l.l.;
- CLSM con aggregati fini facili da scavare anche se di alta resistenza e.l.l.

NRMCA National Ready Mixed Concrete Association

resistenza a e.l.l. minore di 10 daN/cm^2 → scavabili con apparecchi e macchine convenzionali;

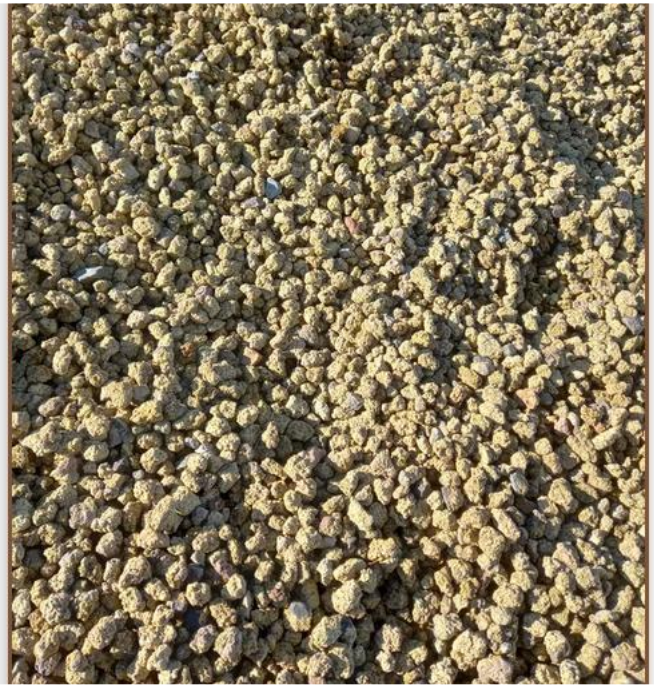
resistenze superiori ai 10 daN/cm^2 → non escavabili.

Dipendenza anche dalle dimensioni dell'aggregato, dalle capacità di drenaggio del terreno che delimita lo scavo e dal sito che condiziona il tipo di attrezzatura da poter utilizzare.

La soluzione di Sapienza - Laboratorio Materiali Stradali

Primo materiale impiegato - Cretoni di pozzolana

- Cretone di pozzolana: i cretoni di pozzolana per fondazioni, massicciate, vespai, massetti; opportunamente selezionati i cretoni di pozzolana possono essere utilizzati come materiali drenanti
- Granello di pozzolana: per fare malte betonabili miscelato con pozzolana fina, pacciamatura di giardini e aree verdi, decoro verde urbano nella realizzazione e manutenzione di parchi e giardini
- Graniglia di pozzolana: per campi sportivi, piste ciclabili e pedonali, pavimentazioni in terra battuta e pozzolana stabilizzata, vivai, giardini e ville, per pacciamatura e decoro verde urbano
- Pozzolana vagliata: per restauro e ripristini conservativi, ristrutturazioni edifici moderni e per nuove costruzioni, per campi sportivi, per malte fluide dell'Antica Roma. E' disponibile in varie colorazioni naturali: pozzolana gialla, pozzolana marrone, pozzolana rossa, pozzolana nera.



REGOLAMENTO SCAVI – COMUNE DI ROMA

C - 1 Riempimento degli scavi

Il riempimento degli scavi dovrà essere effettuato con tecniche e materiali tali da garantire l'omogeneità e la coerenza con gli strati preesistenti, il mantenimento delle loro caratteristiche strutturali, nonché compattezza, stabilità e durata nel tempo; le modalità d'intervento verranno concordati caso per caso - eventualmente previa effettuazione di cavi d'indagine - fra Società e Dipartimento LL.PP. e Manutenzione Urbana nel caso di strade appartenenti alla Grande Viabilità, fra Società e U.O.T. municipale negli altri casi. In particolare, in presenza di soletta in c.a., la stessa dovrà essere ricostruita previa ripresa a regola d'arte dei ferri d'armatura, con esclusione quindi di tecniche sostitutive quali semplice posa di rete elettrosaldata o simili.
La scelta del tipo di materiale da impiegare e le modalità di posa in opera dovranno essere descritte nella relazione tecnica allegata alla domanda di autorizzazione di scavo.
I materiali impiegabili sono - di norma - i seguenti:

a) Materiali legati betonabili
Tali materiali devono essere utilizzati per il riempimento dei cavi fino a costituire anche ripristino della fondazione della sovrastruttura stradale preesistente (escluso il caso delle pavimentazioni rigide). Essi dovranno essere praticamente autolivellanti ed esenti da ritiro, di rapida presa, facilmente scavabili e presentare caratteristiche conformi a quelle stabilite con apposite Circolari dal Dipartimento LL.PP. e Man. Urbana.
Il Dipartimento LL.PP. e Man. Urbana verifica la certificazione trasmessa dai produttori dei materiali betonabili e ne autorizza l'impiego. Il richiedente l'autorizzazione per lo scavo dovrà indicare nella relazione tecnica il nominativo del fornitore del materiale che intende utilizzare.
In caso di scavi che abbiano andamento incidente con il fronte degli edifici, al fine di evitare la trasmissione di vibrazioni alle strutture murarie degli edifici medesimi, il riempimento con materiale betonabile deve interrompersi ad una distanza di m. 1,50 dalla più vicina struttura muraria del suddetto fronte. In caso di marciapiedi di larghezza inferiore a m. 1,50 o nelle strade prive di marciapiedi, la suddetta distanza è ridotta a m.

Sperimentazione in parallelo laboratorio+campo

PROPRIETÀ ALLO STATO FRESCO

Lavorabilità

Mantenimento della consistenza nel tempo necessario al trasporto e messa in opera.

SLUMP

≥ 140 mm

Autolivellabilità

Capacità di riempire cavità senza necessità di compattazione o vibrazione meccanica.

PROPRIETÀ ALLO STATO INDURITO

Resistenza

Elevate resistenze a brevissimo termine, incremento limitato nel lungo termine.



RESISTENZA 24 H

≥ 20 N/cm²

RESISTENZA 28 GG

≥ 150 N/cm²

Demolibilità

Facilità di rimozione e scavo mediante mezzi manuali o meccanici leggeri.

INDICE DEMOLIBILITÀ

≤ 150

La prova di demolibilità

ATTREZZATURA

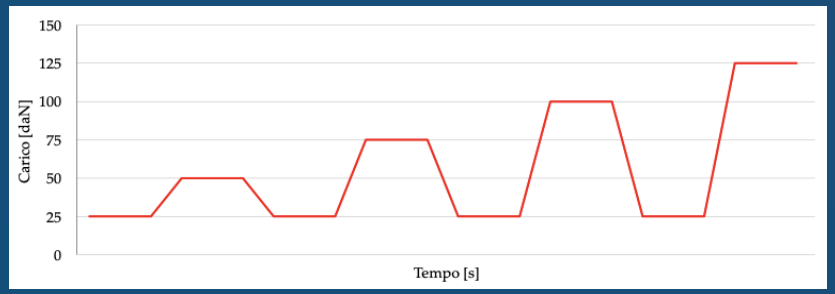
Apparecchiatura per prove dinamiche equipaggiata con **scalpello** simile al martello demolitore.

CARICO

Precarico statico di 25 daN. Cicli impulsivi progressivi (***DP* = 25 daN**) della durata di 10 millisecondi.

TERMINE DELLA PROVA

Infissione dello scalpello per **almeno metà dell'altezza del provino** oppure collasso strutturale del cubo.



INDICE DI DEMOLIBILITÀ

$$ID = \frac{1}{P}\sum_{i=1}^{n}(i \cdot \Delta P)$$





I betonabili dei decenni successivi

C&D Waste

Inerti riciclati misti (macerie): i betonabili possono essere messi a punto con modesti quantitativi di cemento per effetto di fenomeni di presa di legante preesistente.

La lavorabilità è un fattore critico, a causa dell'elevata porosità degli inerti.

L'elevato assorbimento degli aggregati rende necessario definire accuratamente le modalità e i tempi di miscelazione in modo da limitare il più possibile le sottrazioni progressive d'acqua e di additivo.

Tale fenomeno viene esaltato, durante la miscelazione, dall'effetto "frantumazione-sfregamento" degli elementi litoidi che provoca un aumento del tenore di fino, determinando un aumento della superficie specifica dell'aggregato, con una conseguente maggiore richiesta d'acqua, e minore efficienza dell'eventuale additivo.

I betonabili dei decenni successivi

C&D Waste

+

Granulato di conglomerato bituminoso

Granulato di conglomerato bituminoso disponibile in grande quantità; sprecato se non inserito in conglomerati nuovi, ma non si sa come smaltire i grandi accumuli.

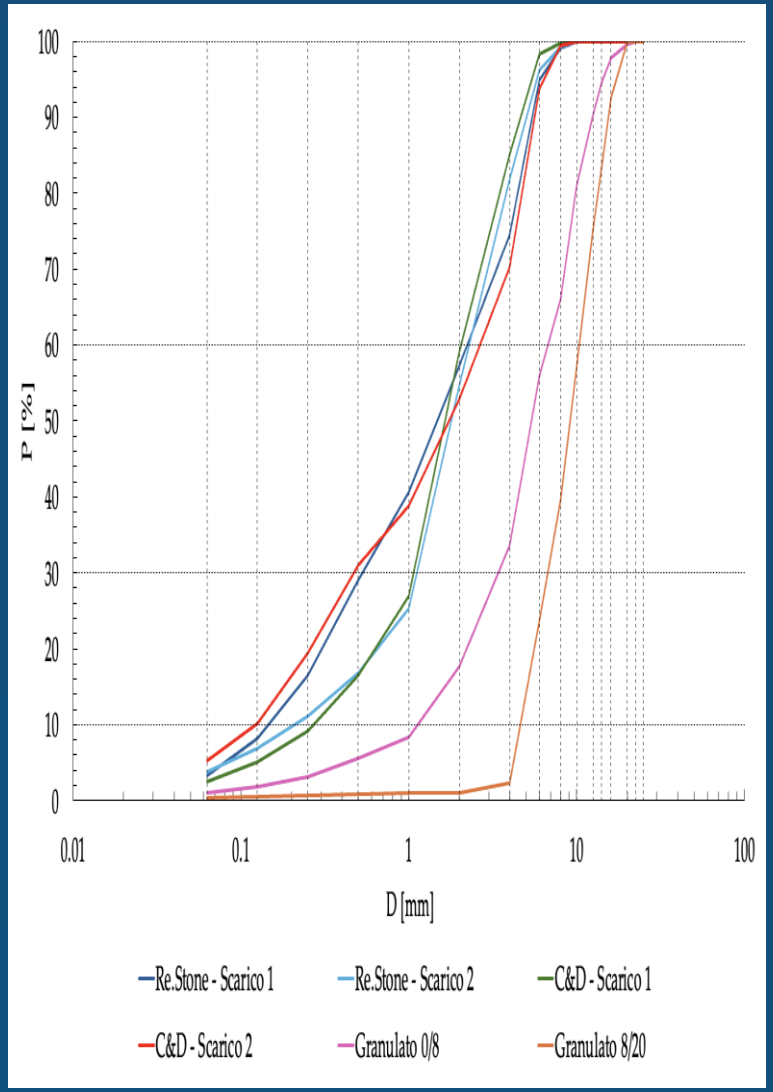
Vantaggio per la lavorabilità e il consumo di fluidificante grazie a minore porosità e assorbimento.

La richiesta di betonabili relativamente continua nell'anno consente di regolarizzare il ciclo di riutilizzo dei materiali incamerati dagli impianti di riciclaggio.

Gli sviluppi più recenti

Ceneri di Rifiuti Solidi Urbani







C&D

Frazione fine del C&D. Necessaria per bilanciare il singolare comportamento delle ceneri



Granulato 0/8 mm

Aggregato riciclato proveniente dalla fresatura delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso.



Granulato 8/20 mm

Frazione grossolana del granulato di conglomerato bituminoso.

Ceneri di Rifiuti Solidi Urbani



Gli sviluppi più recenti

Granulometria piuttosto fine delle ceneri da RSU.

Tentate varie miscele in combinazione con vari aggregati di riciclo, da sabbiose ad assortite.

Inattesa criticità nel dosaggio di acqua e additivi fluidificanti, con valori di slump e di resistenza molto diversi per contenuti d'acqua poco diversi.

Sperimentazione su piccoli campioni per comprendere comportamento.

SCHELETRI GRANULARI

- ✓ 50% Re.Stone + 50% C&D
- ✓ 10% Re.Stone + 20% C&D + 70% c.b.

DOSAGGIO LEGANTE

6.5% - 7.5% Cemento

OMOGENEIZZAZIONE A SECCO 10 min.

Miscelazione a secco degli inerti in betoniera.

FASE DI IMBIBIZIONE 20 min.

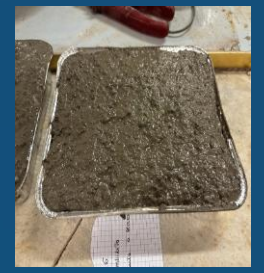
Aggiunta acqua di progetto in un'unica soluzione.

AGGIUNTA LEGANTE 10 min.

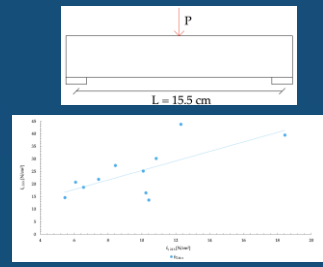
Cemento a spolvero progressivo.

AGGIUNTA ADDITIVO 15 min.

Inserimento additivo e miscelazione finale.







Verifica in campo per validare i risultati definitivi

CONFEZIONAMENTO DI 4 m³ PRESSO L'IMPIANTO DI PRODUZIONE





Parametro (per 1 m³)	Miscela M. 29		Miscela M. 39	
	Teorico	Reale	Teorico	Reale
Acqua di impasto [L]	180	**140**	200	**190**
Additivo fluidificante [L]	4	**1.25**	3.3	**3.3**

MISCELA *M. 29* (RE.STONE, C&D, GRANULATO)

COMPOSIZIONE (PESI SECCHI)	
Re.Stone	3.8 kg
C&D	7.6 kg
Granulato 8/20	30.5 kg
Cemento	2.805 kg
Acqua aggiunta	5 kg
Additivo fluidificante	110 ml

PARAMETRI CARATTERISTICI MISCELA	
a/c	2.28
Cemento/Peso secco aggregati	6.7%
Massa volumica allo stato fresco	1850.9 kg/m³

RISULTATI DELLE PROVE	
Abbassamento al cono Abrams	155 mm
Resistenza $f_{c,\,24\,h}$	20 N/cm²
Resistenza $f_{c,\,28\,gg}$	143 N/cm²
Indice di demolibilità	55
ACI REPORT 229R	
Modulo di rimovibilità	1.6

MISCELA *M. 39* (RE.STONE, C&D)

COMPOSIZIONE (PESI SECCHI)	
Re.Stone	19.9 kg
C&D	19.8 kg
Granulato 8/20	-
Cemento	3 kg
Acqua aggiunta	6.950 kg
Additivo fluidificante	110 ml

PARAMETRI CARATTERISTICI MISCELA	
a/c	3.76
Cemento/Peso secco aggregati	7.6%
Massa volumica allo stato fresco	1608.5 kg/m³

RISULTATI DELLE PROVE	
Abbassamento al cono Abrams	150 mm
Resistenza $f_{c,\,24\,h}$	25 N/cm²
Resistenza $f_{c,\,28\,gg}$	125 N/cm²
Indice di demolibilità	116
ACI REPORT 229R	
Modulo di rimovibilità	1.2

L'utilizzo di materiali riciclati per la realizzazione di infrastrutture sostenibili

ANTONIO D'ANDREA

Sapienza Università di Roma

Grazie per l'attenzione