



Recupero di rifiuti nel settore del calcestruzzo e delle applicazioni geotecniche

economia circolare

Alex Sanzeni – Luca Cominoli

Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica



AGGREGATI

Materiale granulare utilizzato nelle costruzioni

NATURALE (AN)

Aggregato **di origine minerale**

sottoposto unicamente a
lavorazione meccanica

Origine: da **giacimenti naturali** o
da frantumazione di rocce



RICICLATO (AR)

Aggregato risultante dalla lavorazione

di **materiale inorganico** utilizzato
nelle costruzioni

Origine: da processi di recupero di
**RIFIUTI DA COSTRUZIONE e
DEMOLIZIONE (C&D)**



ARTIFICIALE (AI)

Aggregato minerale derivante

da un **processo industriale**
che implica una modificazione
termica o di altro tipo

Origine: da impianti
incenerimento di rifiuti solidi
urbani
industrie di produzione di ferro
e acciaio

(scorie siderurgiche)



CARATTERISTICHE DEGLI AGGREGATI

Caratteristiche fisiche

PARAMETRI FISICI	NATURALI (AN)	RICICLATI (AR)	ARTIFICIALI (AI) *
FORMA	Tondeggiante Superficie liscia	Frastagliata	Frastagliata Struttura spugnosa Superficie ruvida
ASSORBIMENTO ACQUA (WA) UNI EN 1097-6	Frazione fine 0,7% -1,2% Grossolana 0,3% -0,5%	Frazione fine 6% - 12% Grossolana 1,8% - 3%	0,9 – 2,5 %
MASSA VOLUMICA DEI GRANULI (MV) UNI EN 1097-6	2500 – 2800 kg/m ³	<2100 – 2400 kg/m ³	>> 2800 (3800) kg/m ³ secondo UNI 12620
RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE (Los Angeles) UNI EN 1097-2	Rocce molto tenaci LA=10% Rocce basaltiche LA=20% Rocce compatte LA=20-30% Rocce tenere LA > 30%	Scarsa resistenza ad impatto LA ≈ 37% Assimilabile a ROCCE TENERE	18-23 %

* Scoria nera di prima fusione derivante da forno ad arco elettrico (EAF Slag)

Fonti:

Tesi sperimentale di dottorato - Alice Toffano, "Caratterizzazione petrochimica e petrofisica di materiali inerti secondare da costruzione e demolizione, per la realizzazione di impasti ceramici ordinari e calcestruzzi", 2006-2009.

Caggiano et al. , "Calcestruzzi confezionati con AR e cenere volante: risultati di una recente campagna sperimentale", Università di Salerno.

Sabrina Sorlini, "Il recupero delle scorie nell'edilizia", 2017.

PRESTAZIONI TECNICHE

Normative di settore per la **MARCATURA CE**

Le normative tecniche per la marcatura CE di aggregati naturali o riciclati nel settore delle costruzioni:

UNI EN 12620:2008 “*Aggregati per calcestruzzo*”

UNI 8520-1 “*Istruzioni per l'applicazione della EN 12620 - PARTE 1: Designazione e criteri di conformità*”

UNI 8520-2 “*Istruzioni per l'applicazione della EN 12620 - PARTE 2: Requisiti*”

UNI EN 13139:2003 “*Aggregati per malte*”

UNI EN 13043:2004 “*Aggregati per conglomerati bituminosi*”

UNI EN 13055:2003 “*Aggregati leggeri per calcestruzzi e malte*”

UNI EN 13242:2008 “*Aggregati per opere civili e stradali*”

UNI EN 13450:2003 “*Aggregati per massicciate ferroviarie*”

UNI EN 13383:2003 “*Aggregati grossi per opere idrauliche*”

UNI EN 12620: 2008

SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

La presente norma europea specifica le proprietà di aggregati e filler ottenuti mediante la lavorazione di materiali naturali, industriali o riciclati e miscele di detti aggregati per la confezione di calcestruzzo. Si applica ad aggregati aventi massa volumica dopo essiccazione in stufa maggiore di 2,00 Mg/m³ (2 000 kg/m³) per tutti i calcestruzzi, compreso il calcestruzzo in conformità alla EN 206-1 e il calcestruzzo utilizzato in strade o altre pavimentazioni e per l'utilizzo in prodotti prefabbricati di calcestruzzo.

RECUPERO DEGLI AGGREGATI NEL CALCESTRUZZO

Decreto Ministeriale 17/01/2018 – Aggiornamento NTC

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 [...]**

È consentito l'uso di **aggregati grossi provenienti da riciclo**, secondo i limiti di cui alla Tab.11.2.III, a condizione che la miscela di calcestruzzo confezionata con aggregati riciclati, venga preliminarmente **qualificata e documentata, nonché accettata in cantiere, attraverso le procedure di cui alle presenti norme.**

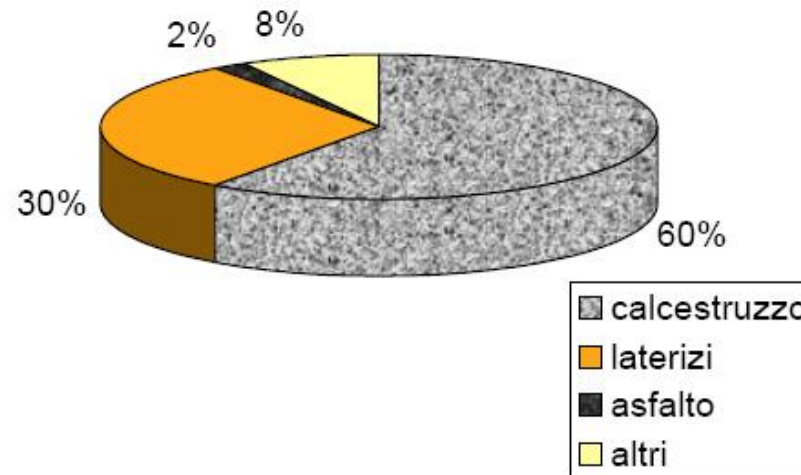
Tab. 11.2.III

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 \geq 90%, UNI EN 933-11:2009)	\leq C20/25	fino al 60%
	\leq C30/37	\leq 30%
	\leq C45/55	\leq 20%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe	Classe minore del calcestruzzo di origine	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 10%

RECUPERO DEGLI AGGREGATI NEL CALCESTRUZZO

Problematiche tecnologiche e caratteristiche meccaniche

Le proprietà fisiche e meccaniche di un RCA (Recycled Concrete Aggregate) sono fortemente influenzate dalla qualità dell'aggregato riciclato



Composizione

Può essere estremamente variabile e dipende da:

1. tecnologia di costruzione:
2. tipi di materie prime,
3. clima,
4. sviluppo economico e tecnologico del territorio
5. periodo edificazione
6. localizzazione territoriale

Mix design del calcestruzzo deve essere accuratamente studiato sia per le proprietà allo stato fresco che indurito

RECUPERO DEGLI AGGREGATI NEL CALCESTRUZZO

Problematiche tecnologiche e caratteristiche meccaniche

Massa Volumica di un RCA

Dipende dalla porosità e dallo spessore della pasta cementizia rimasta a contatto con gli aggregati originali in seguito al recupero o all'eventuale presenza di impurità

Porosità pasta cemento

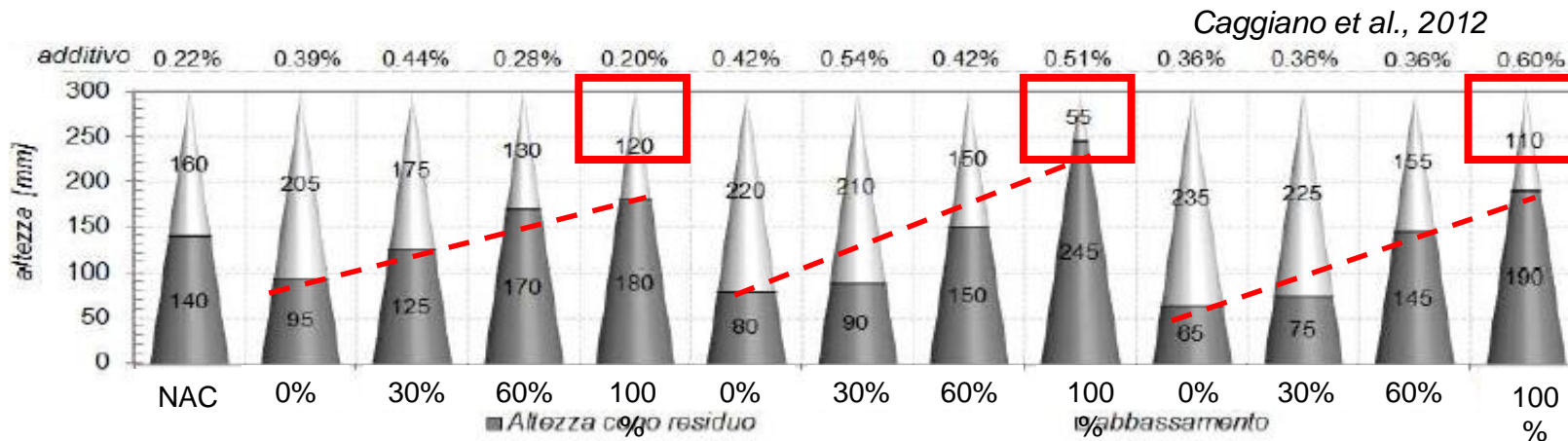


massa volumica



Assorbimento acqua di un RCA

E' la proprietà che differenzia maggiormente gli aggregati naturali da quelli di riciclo. Dipende principalmente dalla presenza della malta cementizia solidale all'aggregato originale naturale.



Minore lavorabilità



Ricorso ad additivi fluidificanti

RECUPERO DEGLI AGGREGATI NEL CALCESTRUZZO

Problematiche tecnologiche e caratteristiche meccaniche

Resistenza a compressione

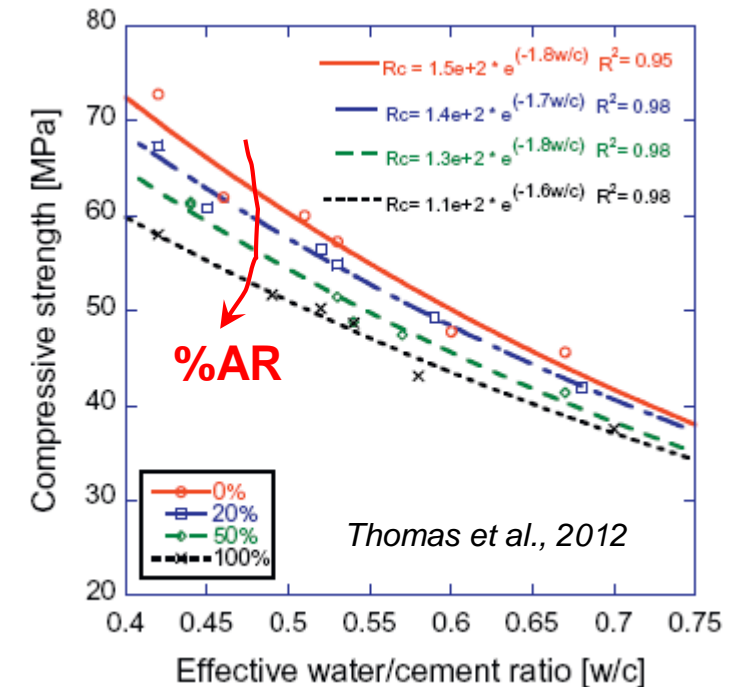
Maggiore porosità e minore massa volumica degli aggregati riciclati possono provocare decremento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

Resistenza compressione calcestruzzo funzione:

- rapporto a/c ;
- resistenza conglomerato/macerie da cui provengono aggregati riciclati;

per **rapporti a/c alti** (> circa di 0,6) elemento debole è interfaccia tra nuova e vecchia pasta di cemento, per cui la resistenza è la stessa indipendentemente dal tipo di aggregato usato

per **rapporti a/c bassi** (< circa di 0,5) elemento debole è interfaccia aggregato originale-vecchia pasta cemento, per cui la resistenza dipende dal tipo di aggregato usato



RECUPERO DEGLI AGGREGATI NEL CALCESTRUZZO



Come risolvere le problematiche tecnologiche

- **Migliorando la qualità dell'aggregato riciclato**
 - ➔ attenzione ai processi di demolizione
 - ➔ pulizia dell'AR o doppia frantumazione
 - ➔ evitare/limitare presenza di impurità
- **Progettando una miscela a «prestazione»**
 - ➔ Attenzione al rapporto a/c
 - ➔ utilizzo della sola frazione grossolana
 - ➔ utilizzo fluidificanti

RECUPERO DEGLI AGGREGATI IN APPLICAZIONI GEOTECNICHE

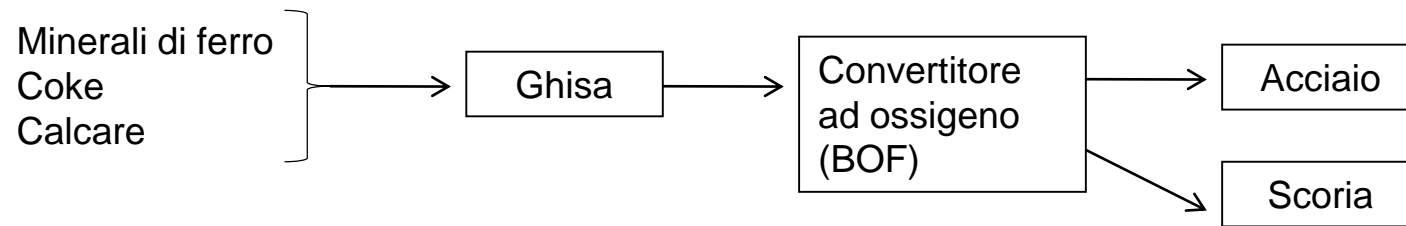
OBIETTIVO

Valutare la fattibilità del recupero delle scorie d'acciaieria come aggregato riciclato all'interno delle **miscele bituminose per le costruzioni stradali**, attraverso una caratterizzazione della scoria e di alcune miscele sperimentali (miscele di aggregati naturali e riciclati).

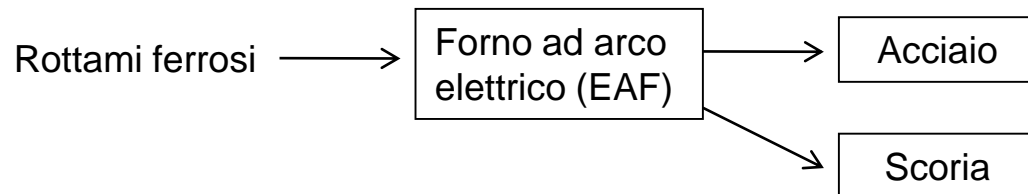
SCORIA D'ACCIAIERIA

È il residuo solido originato dal processo di produzione dell'acciaio.

CICLO INTEGRALE



FORNO AD ARCO ELETTRICO



Composizione media delle scorie siderurgiche

OSSIDI (%)	SCORIA DI ALTOFORNO (MS)	SCORIA DA CONVERTITORE AD OSSIGENO (LD)	SCORIA DI ACCIAIERIA A FORNO ELETTRICO (EAF)
SiO ₂	34 - 45	11 - 18	8 - 18
Al ₂ O ₃	5 - 23	1 - 5	3 - 10
CaO	29 - 48	45 - 54	25 - 35
MgO	2 - 18	1 - 6	2 - 9
Fe totale	0.3 - 2	14 - 22	20 - 30
Mn totale	0.1 - 2	1 - 5	2 - 8
TiO ₂	0.3 - 3	0.5 - 2	0.3 - 2.5
As (ppm)	<1	<1	< 15
Cd (ppm)	< 0.5	< 0.5	< 30
Cr (ppm)	10 - 100	1000 - 3000	5000 - 30000
Cu (ppm)	< 10	< 50	< 300
Pb (ppm)	< 20	< 10	< 90
Zn (ppm)	< 100	< 150	< 1000
S	0.5 - 1	0.1 - 1	0.5 - 1

(Plescia et al., 2010)

MATERIALI: SCORIE D'ACCIAIERIA

PROVENIENZA

Acciaiera in provincia di Brescia

TIPOLOGIA DI SCORIA

Scoria nera di prima fusione derivante da forno ad arco elettrico

SCORIA FRESCA

Scoria prelevata subito dopo
la sua produzione

SCORIA MATURA

Scoria prelevata dopo un periodo di
maturazione (3 mesi) in cumuli
all'aperto

CER 100202: scorie non trattate

GRANULOMETRIA

0/20 mm

14/32 mm

CAMPIONI ANALIZZATI

1^a campagna sperimentale: luglio '06 - giugno '07

2^a campagna sperimentale: luglio '08



CENNI NORMATIVI: recupero di scorie d'acciaieria

Normativa tecnica per il recupero nelle miscele bituminose:

- **UNI EN 13043:2004** *“Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti ed altre aree soggette a traffico”*

Questa norma prevede la definizione di:

- Requisiti chimici
- Requisiti geometrici
- Requisiti fisici

- **Catalogo delle Pavimentazioni Stradali (CNR BU 178/95)**
- **Capitolato Speciale d'Appalto della Provincia di Brescia**
- **Capitolato Speciale d'Appalto della Società Autostrada Brescia-Verona-Vicenza-Padova S.p.A.**

MATERIALI: CONGLOMERATI BITUMINOSI

PRODUZIONE

Le miscele bituminose sono state composte utilizzando scorie d'acciaieria in percentuale in peso variabile tra il 20 e il 40% dell'aggregato naturale e aggregati naturali

Il legante utilizzato è un bitume tradizionale di classe 50/70.

Aggregati	Pezzatura [mm]	Miscele con scoria [%peso]					Miscele naturali [%peso]		
		Base		Binder		Usura	Base	Binder	Usura
		30%	40%	30%	40%	20%			
Scoria 0/20	0-20	15	20	30	40	20	-	-	-
Scoria 14/32	14-32	15	20	-	-	-	-	-	-
Filler	0-0,075	5	5	5	5	7	4	5	6
Frantumato 0/4	0-4	24	22	30	30	32	32	35	46
Frantumato 2/8	2-8	15	10	15	10	20	13	21	23
Frantumato 6/14	6-14	-	-	10	8	21	12	20	25
Frantumato 10/20	10-20	11	12	10	7	-	15	19	0
Tondo 14/32	14-32	15	11	-	-	-	24	0	0
Bitume classe 50/70 [%peso]		3,8	4,2	4,5	4,8	5,5	4,2	4,8	5,5

Risultati prove su conglomerati per STRATO DI BASE, confronto con miscela tradizionale e limiti CNR BU 178/95

Parametri e risultati prove	Unità di Misura	Miscela Base 30%	Miscela Base 30%	Miscela Base 40%	Miscela aggregati naturali	Limiti CNR 178/95 e Capitolati	
						Prov. Brescia	Autostrade
Contenuto di scoria	% peso	30	30	40	0		
Data prelievo	-	Dic 2007	Apr 2007	Dic 2006	-		
Stabilità media	kg	1564	1721	1694	1558	> 800	>900
Scorrimento medio	mm	2,7	2,9	2,9	3,2	1,5-3,0	-
Rigidità media	kg/mm	595	591	595	511	> 250	> 250
Percentuale vuoti	%	5,6	5,1	4,4	2,9	4,0-7,0	4,0-7,0
Percentuale vuoti riempiti con bitume	%	62,3	66,4	71,3	77,3	< 80	-
Massa volumica apparente	g/cm ³	2,633	2,685	2,725	2,496	-	-

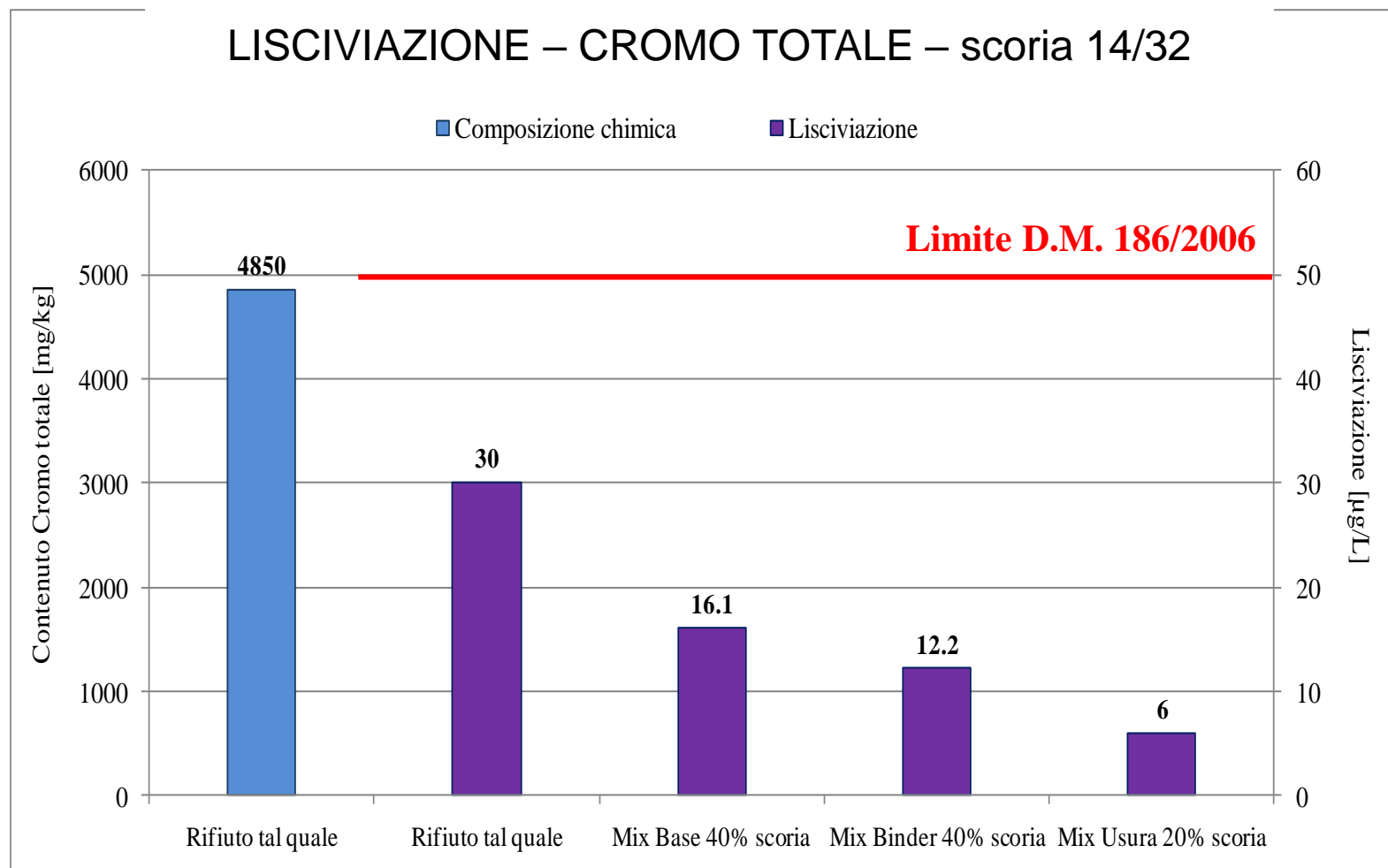
Risultati prove su conglomerati per STRATO DI USURA, confronto con miscela tradizionale e limiti CNR BU 178/95

Parametro	Miscela Unità di Misura	Miscela Usura 20%	Miscela Usura 20%	Miscela aggregati naturali	Limiti CNR 178/95 e Capitolati	
					Prov. Brescia	Autostrade
Contenuto di scoria	% peso	20	20	0		
Data prelievo	-	Dic 2006	Apr 2007	-		
Stabilità media	kg	1806	1734	1506	> 1200	> 1200
Scorrimento medio	mm	2,9	2,8	2,8	1,5-3,0	-
Rigidità media	kg/mm	624	615	528	> 350	> 350
Percentuale vuoti residui	%	4,8	2,4	2,0	3,0-6,0	3,0-6,0
Percentuale vuoti riempiti con bitume	%	73,2	84,5	86,0	< 80	-
Massa volumica apparente provini	g/cm ³	2,550	2,601	2,456	-	-
Stabilità dopo sommersione	%; kg	95,5; 1725	94,0; 1636	-	-	-
Resistenza alla trazione Indiretta	N/mm ²	1,05	0,97	-	> 0,70	0,6-1,0

METODI: CONGLOMERATI BITUMINOSI

Si è verificata l'attitudine al rilascio di inquinanti mediante test di cessione sui conglomerati bituminosi:

- Test su miscela bituminosa con **aggregati naturali** (per strato di base, binder e usura)
- Test su miscela bituminosa con **scorie d'acciaieria** (per strato di base, binder e usura)



ESPANSIONE VOLUMETRICA – UNI EN 1744-1

Products of steel slag an opportunity to save natural resources, H. Motz e J. Geiseler, Waste Management 21 (2001) 285-293

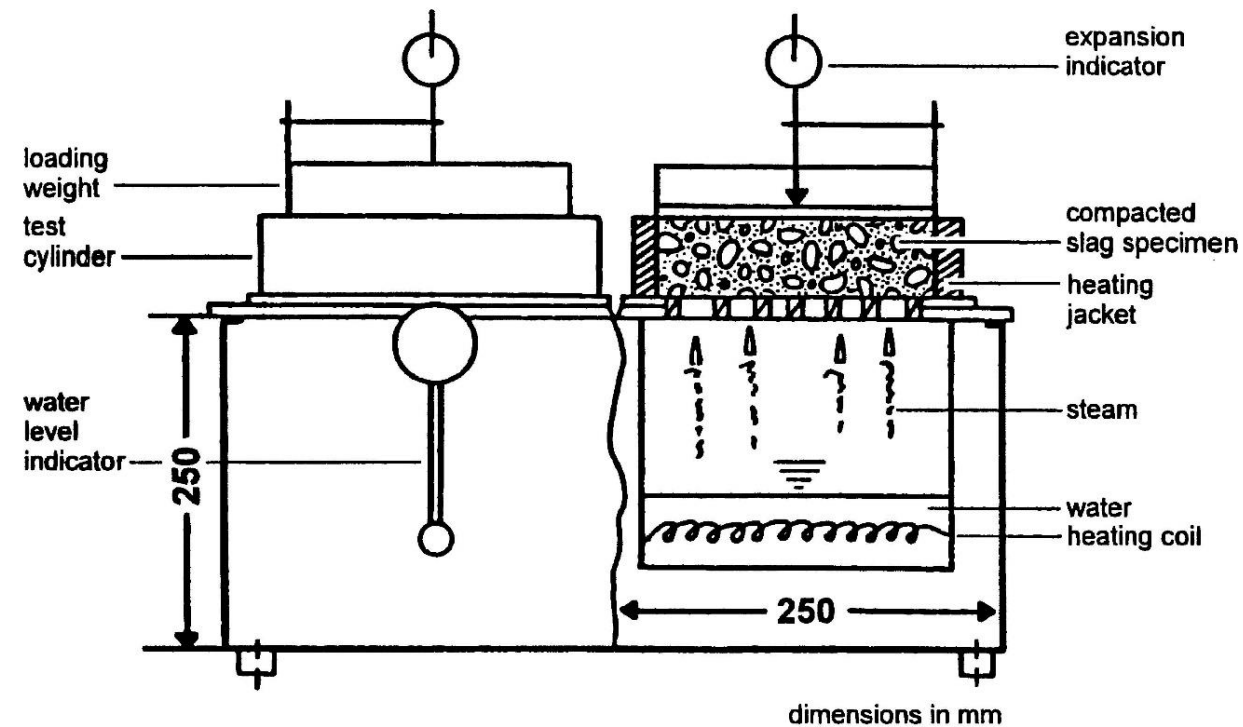


Fig. 3. Principle of the steam test.

Motz e Geiseler (2001)

Programma della sperimentazione:

- Esecuzione di n. 5 prove condotte (n. 2 provini per prova) con differenti tempi di maturazione: 15gg – 30gg – 2 – 4 – 6mesi (maturazione in ambiente non protetto);
- Esecuzione di prove per la determinazione del contenuto di ossidi di calcio e magnesio

ANALISI COMPORTAMENTO ESPANSIONE VOLUMETRICA PER IDRATAZIONE OSSIDI DI CALCIO E MAGNESIO (2008)

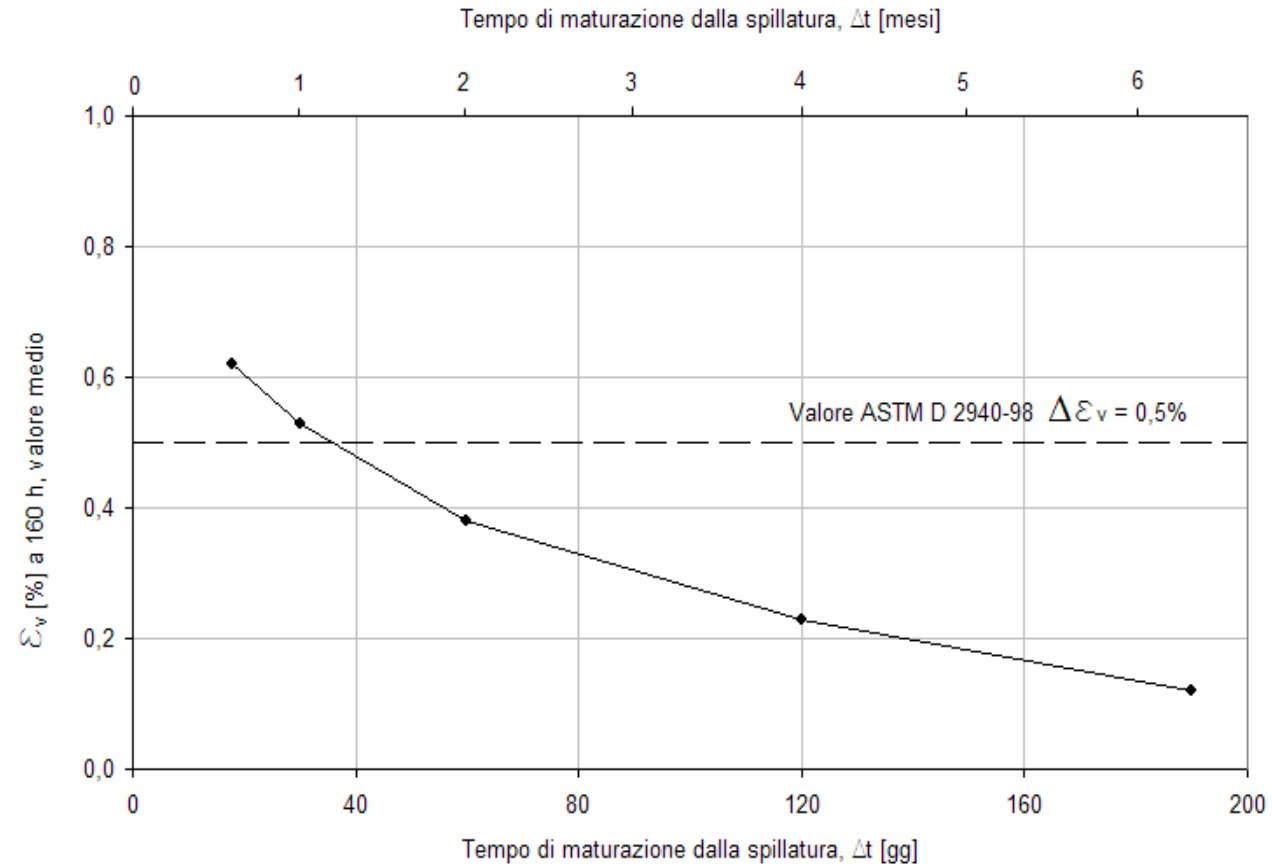
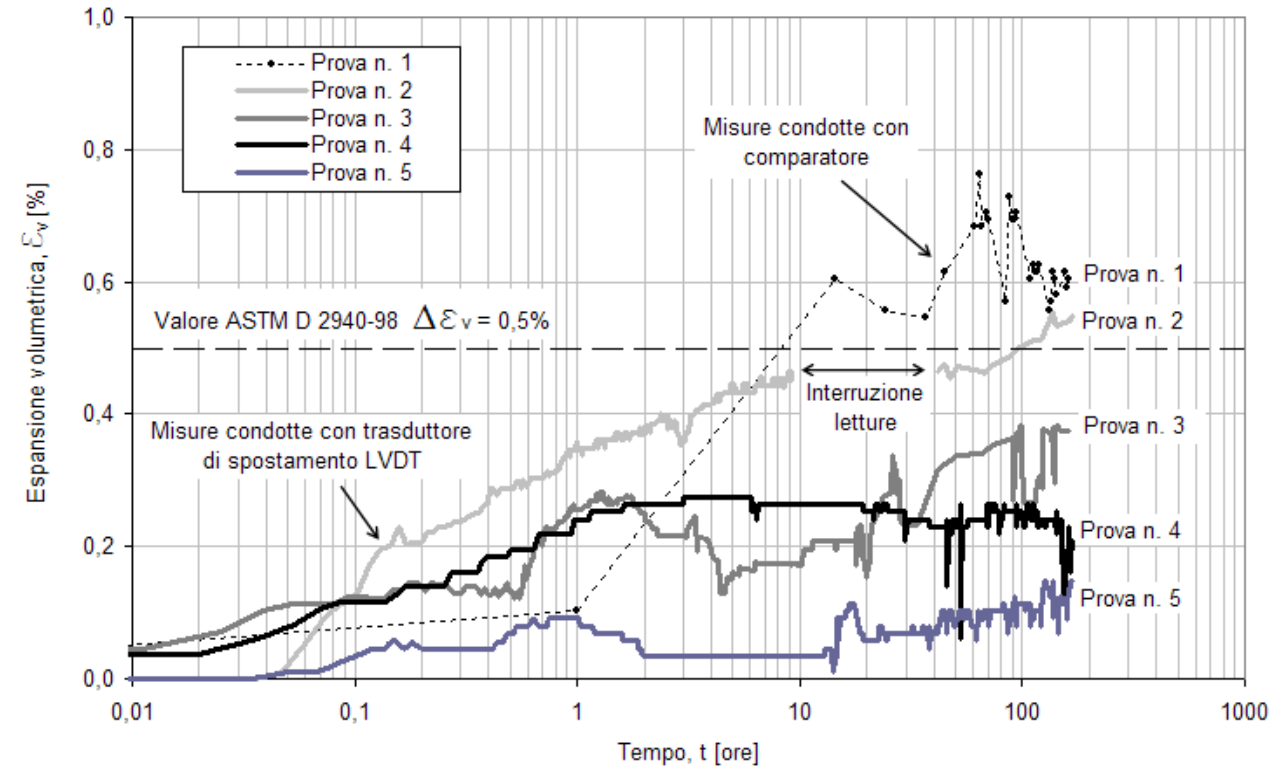
Prelievo del luglio 2008
Feralpi Siderurgica, Lonato (BS)



PREPARAZIONE PROVINI, MATURAZIONE ED ESECUZIONE PROVE



RISULTATI PROVE UNI EN 1744-1



Bertoglio (2008)
Sorlini et al. (2013)

CONCLUSIONI

- *Possibile recupero delle scorie di acciaieria in Italia nel campo delle pavimentazioni stradali flessibili come alternativa allo smaltimento in discarica;*
- *Proprietà meccaniche della scoria tal quale garantiscono l'impiego come aggregato;*
- *I conglomerati bituminosi sperimentali hanno mostrato proprietà meccaniche soddisfacenti e confrontabili con quelle di miscele tradizionali (di aggregati naturali);*
- *Il rilascio di inquinanti dalle miscele bituminose è risultato contenuto;*
- *La sperimentazione ha evidenziato una forte correlazione tra espansione di volume e tempo di maturazione della scoria, utile per definire future metodologie d'uso.*