

Riciclaggio a Freddo delle Pavimentazioni Stradali: Tecniche, Materiali, Specifiche e Sostenibilità

Prof. Andrea Graziani



DICEA

DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA CIVILE, EDILE
E ARCHITETTURA

Dipartimento di Eccellenza 2018-2022 e 2023-2027

Sommario

- **Introduzione**
Perché riciclare a freddo
- **Composizione delle miscele "fredde"**
Differenze con i "caldi" e i "tiepidi"
- **Tecniche di riciclaggio**
Campi di impiego
- **Caratteristiche meccaniche**
Comportamento evolutivo
- **Conclusioni**
Vantaggi e limiti

Sommario

- **Introduzione**

Perché riciclare a freddo

- **Composizione delle miscele "fredde"**

Differenze con i "caldi" e i "tiepidi"

- **Tecniche di riciclaggio**

Campi di impiego

- **Caratteristiche meccaniche**

Comportamento evolutivo

- **Conclusioni**

Vantaggi e limiti

Massimizzare il riuso delle miscele stradali

37'600'000

Total production

Total Production of Hot and Warm Mix Asphalt from 2011 to 2021 (in million tonnes)

Country	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Italy	28	23.2	22.3	22.3	23.1	23.1	23.7	26.0	30.1	30.1	37.6
EU-27	246.1	268.2	260.6	197.1	206.0	204.9	211.2	217.6	216.2	208.3	226.7
Europe	324.3	376.4	377.9	263.7	285.9	285.9	296.7	297.9	288.9	279.9	296.6
USA	332.0	326.0	319.1	319.0	331.0	340.0	344.0	353.0	362.0	370.0	360.0

11'000'000

Re-use and Recycling

Re-use and Recycling of Reclaimed Asphalt in 2021

Country	Total amount of site-won asphalt generated in 2021 in tonnes	% of available reclaimed asphalt used in					Put to Landfill Other Applications/ Unknown
		Hot and Warm Mix Asphalt Production	On-Site Cold Recycling*	Plant Cold Recycling*	Unbound Road Layers	Other Civil Engineering Applications	
Austria	1,850,000	85	5	0	10	0	0
Croatia	300,000	30	11	6	0	0	53
Czech Republic	2,700,000	20	20	5	25	10	15
Germany	14,000,000	85	0	0	15	0	0
Hungary	250,000	95	0	0	2	0	0
Italy	11,000,000	30	0	0	79	0	0
Norway	1,129,512	46	0	1	54	0	0
Slovakia	82,134	63	29	0	8	0	0
Slovenia	3,000,000	40	3	2	5	18	30
Spain	3,050,000	61	6	0	15	18	0.01
Turkey	1,927,000	0.5	0	0.5	99	0	0
USA	91,000,000	95	0.0	0.1	4	0.2	0.1

Eccedenza dovuta ad impieghi (quasi nella totalità) per **manutenzioni di strade esistenti**

Enorme esubero di materiale pregiatissimo



Riduzione attività estrattive + Valorizzazione Discariche



Razionalizzazione Siti di Recupero + Cessazione Rifiuto (DM 69/2018)

Tecnologie Mature per un uso Estensivo

Conglomerato bituminoso fresato

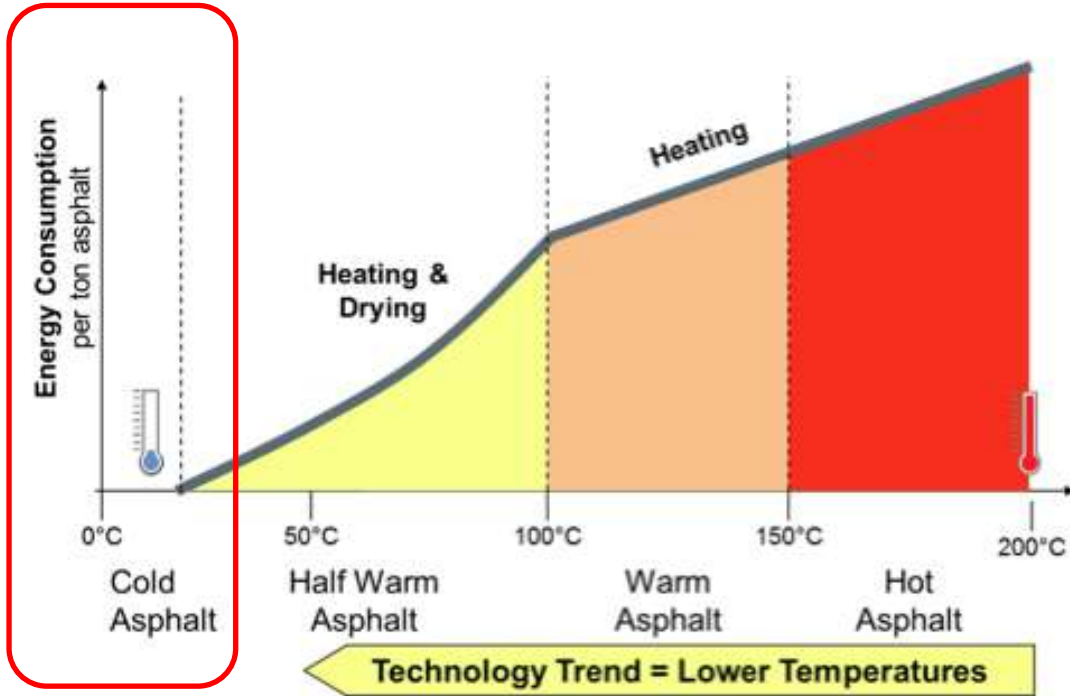


Riciclaggio a caldo e “warm”:
Passare dall’attuale max 30% a un percorribile **40-50%**

Riciclaggio a Freddo:
Riutilizzo **90-100%** di fresato
Miglioramento prestazioni globali della pavimentazione

Produrre a temperatura ambiente

Riciclare a freddo significa
miscelare, trasportare, stendere e compattare
a temperatura ambiente



Si consuma meno energia
Si riducono le emissioni in atmosfera
Si migliorano le condizioni di lavoro
Si migliorano le condizioni di vita

In sintesi

Riciclare a freddo



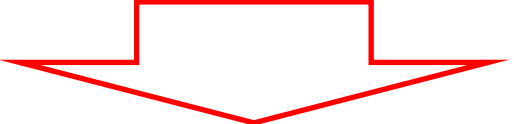
significa

Riusare a temperatura ambiente
i materiali provenienti dalla demolizione di
pavimentazioni giunte al termine della vita utile

Materiali e tecniche
ad-hoc



servono



È necessario rendere il bitume miscelabile
con materiali a temperatura ambiente e che le
miscele siano lavorabili e compattabili (per
consentirne la posa in opera) e acquistino
rigidezza e resistenza rapidamente

Sommario

- Introduzione
Perché riciclare a freddo
- Composizione delle miscele "fredde"
Differenze con i "caldi" e i "tiepidi"
- Tecniche di riciclaggio
Campi di impiego
- Caratteristiche meccaniche
Comportamento evolutivo
- Conclusioni
Vantaggi e limiti

Composizione delle miscele

■ Leganti

Bitume tradizionale (0-4%), sottoforma di *emulsione o bitume schiumato*

Cemento Portland o di miscela (0-4%)

Una combinazione di bitume e cemento

■ Aggregati

Conglomerato bituminoso di recupero (fino al 90-95%)

Aggregati di recupero (misto granulare/cementato) (0-70%)

Aggregati lapidei e filler di primo impiego (5-20%)

■ Acqua

per migliorare lavorabilità e compattabilità

■ Aggiunte minerali

Calce aerea (spenta o viva)

Aggiunte pozzolaniche, **cemento**

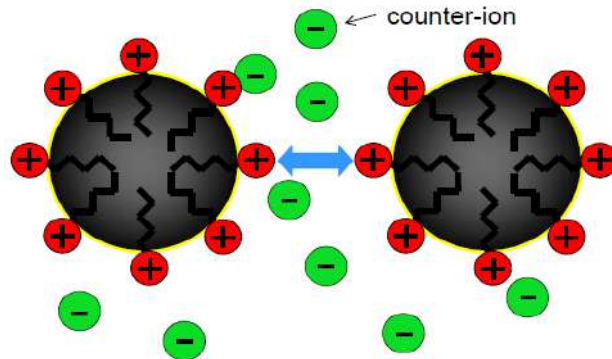


Emulsione bituminosa

- **E' una dispersione in acqua di particelle “solide” di bitume**
 - + Agenti emulsionanti (tensioattivi) che favoriscono la dispersione del bitume in acqua garantiscono la stabilità dell'emulsione (le gocce tenderebbero altrimenti a sedimentare e/o flocculare) e conferiscono **polarità all'emulsione**

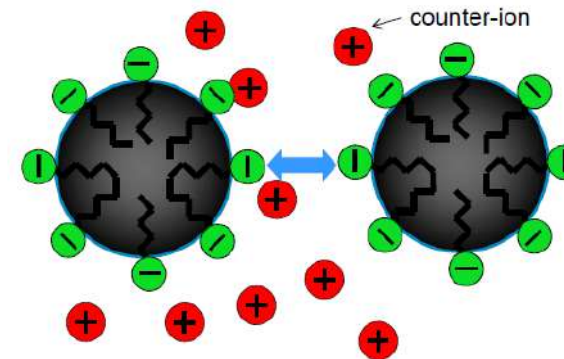
Emulsioni cationiche (+)

comportamento acido



Emulsioni anioniche (-)

comportamento basico

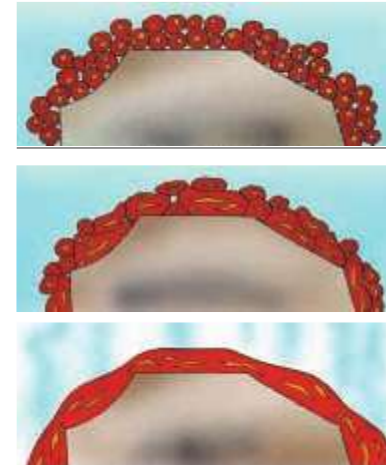


Rottura e Presa dell'Emulsione Bituminosa

Processo di **separazione del bitume dall'acqua**, che porta alla formazione di una **pellicola continua di legante** che aderisce alla superficie degli aggregati

Meccanismo fisico: **aumento di concentrazione delle particelle di bitume** dovuto alla compattazione, e alla progressiva eliminazione dell'acqua per evaporazione o per idratazione del cemento

- Le particelle di bitume coagulano e aderiscono alla superficie degli aggregati
- Si rompe lo strato di emulsionante che ricopre le particelle di bitume
- Progressiva eliminazione dell'acqua porta un aumento delle proprietà meccaniche (ore, giorni, mesi)



Classificazione Emulsioni Bituminose Cationiche

NORMA EUROPEA	Bitumi e leganti bituminosi Quadro di riferimento delle specifiche per le emulsioni cationiche bituminose	UNI EN 13808 LUGLIO 2013
------------------	---	---------------------------------

Designazione:

Polarità (C)

Contenuto di bitume

Contenuto di Polimeri/Flussanti

Velocità di rottura

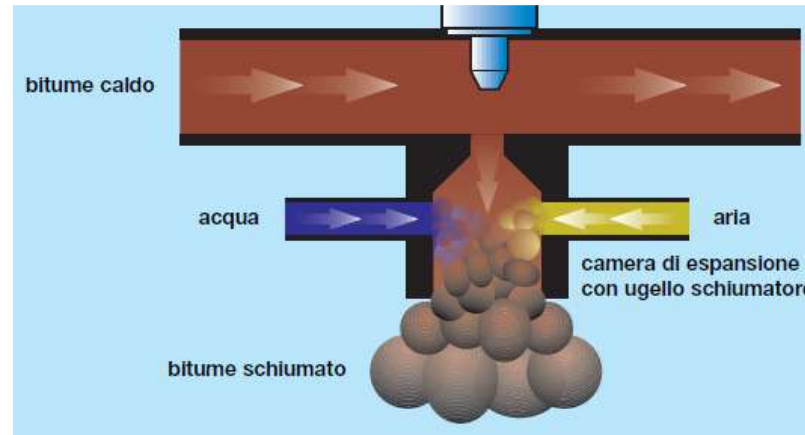
C 60 BP 10



Emulsione cationica, contenuto nominale di bitume del 60% prodotta da bitume stradale, contenete polimeri **in grado di miscelare elevate quantità di cemento** (sovra-stabilizzata)

Bitume schiumato

- Stato fisico del bitume caratterizzato da **elevata superficie specifica** e da **ridotta viscosità**
- Si ottiene spruzzando acqua a temperatura ambiente su un bitume caldo ($150 - 180^{\circ} \text{C}$), all'interno di una camera di espansione
- La schiuma ha una durata di pochi secondi (maggiore l'espansione, minore la durata) durante i quali bisogna effettuare la miscelazione



Conglomerato bituminoso di recupero

*AKA: **Fresato** bituminoso, **Reclaimed Asphalt (RA)**, **Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)***

■ **CB ottenuto in situ (site-won asphalt)**

AKA: un-processed RAP

Prodotto della demolizione (fresatura a freddo o demolizione)

Il prodotto della fresatura a freddo può essere direttamente re-impiegato (senza asportarlo) **con tecniche di riciclaggio in-sito**



■ **CB di recupero (RA)**

AKA: processed RAP, Granulato di conglomerato bituminoso

CB ottenuto in situ lavorato (**frantumato, setacciato, selezionato**) e pronto per essere utilizzato per produrre nuove miscele stradali **con tecniche di riciclaggio in impianto**



Il fresato come aggregato: "black rock"

- A temperatura ambiente il **bitume invecchiato** ("indurito") contenuto nel fresato è **solido** (come la pavimentazione...)
 - ⇒ Non è grado di conferire coesione alla miscela
 - ⇒ Non è grado di miscelarsi né con il bitume residuo dell'emulsione (che è solido) né con il bitume schiumato (che è prodotto a caldo, ma si raffredda immediatamente a contatto con le particelle di fresato)
 - ⇒ Per questo motivo il fresato viene classificato e marcato come "aggregato" (UNI EN 13242)

- Il bitume invecchiato nel fresato è ancora **termo-sensibile e viscoelastico** e perciò contribuisce alla termo-sensibilità e alla viscoelasticità delle miscele riciclate



Acqua

- L'acqua, invece del riscaldamento
 - Contribuisce all'omogenea distribuzione del bitume
 - Favorisce la compattazione
- Il volume occupato dall'acqua, si trasforma in vuoti d'aria quando l'acqua evapora
 - è impossibile ottenere gli stessi livelli di vuoti delle miscele a caldo
 - proprietà meccaniche inferiori
- **ACQUA TOTALE = ACQUA DELL'EMULSIONE + ACQUA AGGIUNTA**
- **ACQUA INTERGRANULARE = ACQUA TOTALE + ACQUA ASSORBITA**



Sommario

- **Introduzione**
Perché riciclare a freddo
- **Composizione delle miscele "fredde"**
Differenze con i "caldi" e i "tiepidi"
- **Tecniche di riciclaggio**
Campi di impiego
- **Caratteristiche meccaniche**
Comportamento evolutivo
- **Conclusioni**
Vantaggi e limiti

Tecniche di riciclaggio a freddo

Riciclaggio in sito

- Treno di riciclaggio che demolisce, miscela, stende, e compatta direttamente in-sito
 - Cold in-Place Recycling (CIR) \Rightarrow solo gli strati bituminosi
 - Full Depth Reclamation (FDR) \Rightarrow anche gli strati sottostanti
- Si elimina il trasporto di materiale da e per il cantiere
- Spessori generalmente compresi tra 10cm (CIR) e 35cm (FDR)

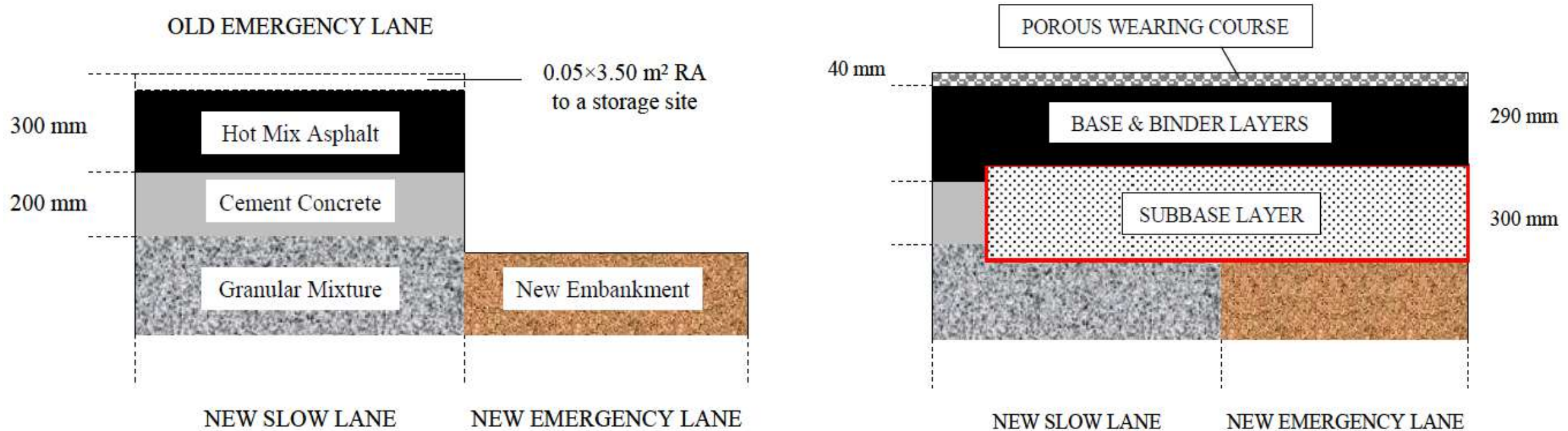


Riciclaggio in impianto

- Si miscela in impianto il fresato lavorato (granulato di CB)
- Stesa e compattazione con le stesse modalità dei caldi
- Maggior controllo \Rightarrow **migliore qualità**
- È necessario il trasporto \Rightarrow **maggiore costo** (rispetto a CIR e FDR)



Esempio FDR: ampliamento A14



Bocci, M., Canestrari, F., Grilli, A., Pasquini, E., & Lioi, D. (2010). Recycling Techniques and Environmental Issues Relating to the Widening of an High Traffic Volume Italian Motorway. *International Journal of Pavement Research & Technology*, 3(4).

Esempio FDR: ampliamento A14



Esempio FDR: strade provinciali

SP18 Jesi – Monterado

Extraurbana secondaria di tipo C1

TGM 5.000 veicoli (5% traffico pesanti)

2,5 milioni di ESAL 80 kN in 20 anni

Bocci M., Grilli A., Cardone F., Ferrotti G.,

*“Full Depth Reclamation for the Rehabilitation of Local Roads: a Case Study”,
International Journal of Pavement Engineering, 2012.*

Pavimentazione vecchia

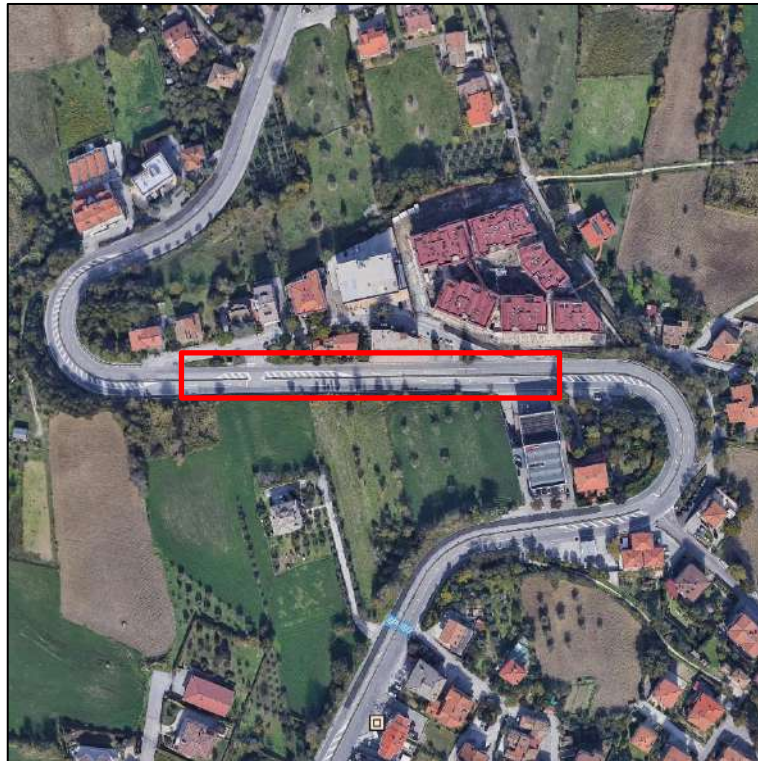
Conglomerato bit.: 8 cm
Fondazione: 30 cm

Pavimentazione nuova

Usura : 3 cm
Binder: 5 cm
Stabilizzazione emulsione/cemento: 15 cm
Fondazione: 18 cm



Esempio: riciclaggio in impianto



Wearing course:

asphalt concrete with SBS-modified bitumen

Tack coat: 0.45 kg/m² of residual bitumen

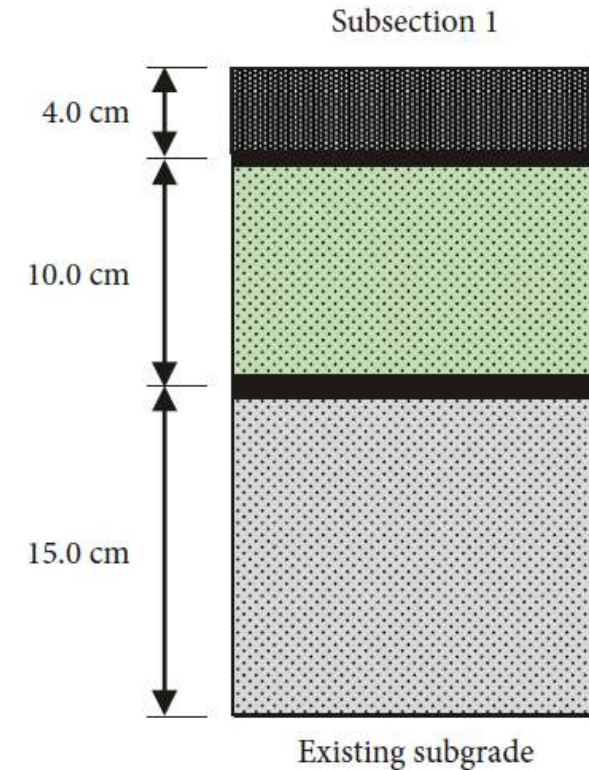
Binder course:

cold recycled mixture

Prime coat: 1.00 kg/m² of residual bitumen

Base course:

cement treated recycled material

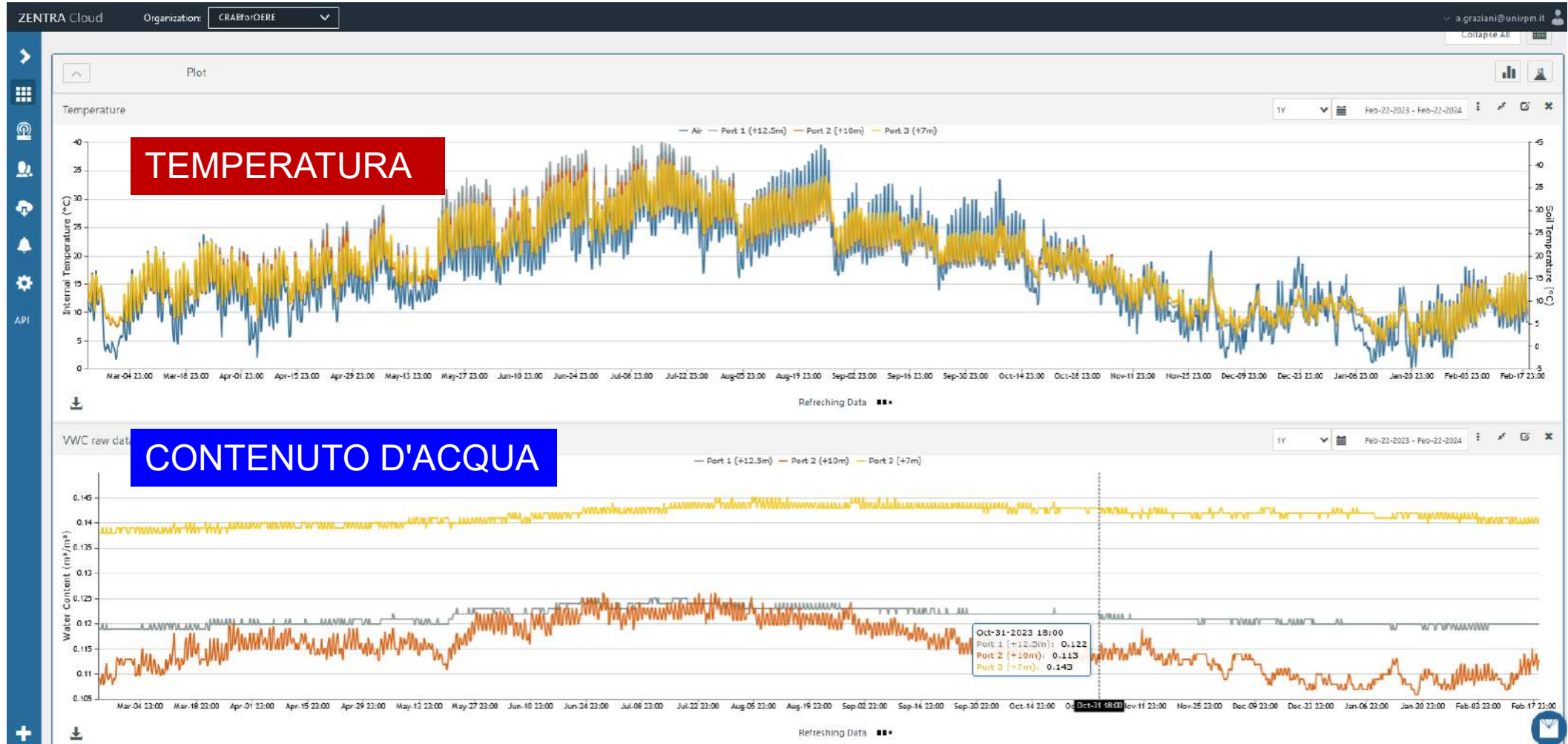


Graziani, A., Grilli, A., Mignini, C., & Balzi, A. (2022). Assessing the field curing behavior of cold recycled asphalt mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.

Riciclaggio a freddo in impianto: fasi costruttive



Monitoraggio real-time



Sommario

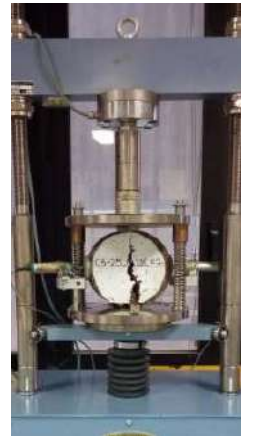
- **Introduzione**
Perché riciclare a freddo
- **Composizione delle miscele "fredde"**
Differenze con i "caldi" e i "tiepidi"
- **Tecniche di riciclaggio**
Campi di impiego
- **Caratteristiche meccaniche e prestazioni**
Comportamento evolutivo
- **Conclusioni**
Vantaggi e limiti

Caratteristiche meccaniche e prestazioni

Rigidezza / Resistenza

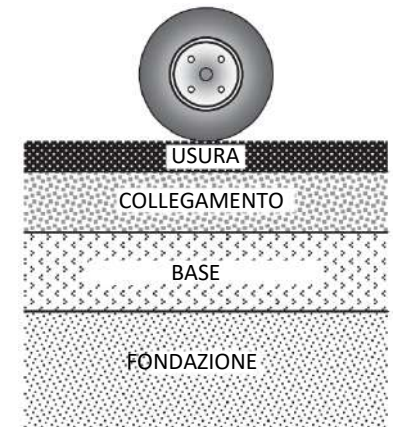
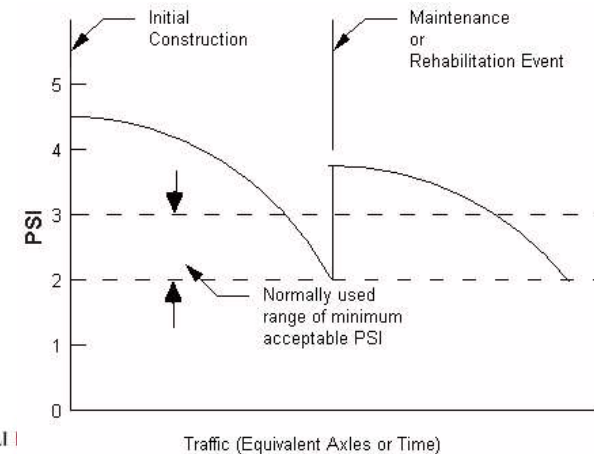
■ Caratteristiche meccaniche

- Composizione (qualità aggregato, dosaggio leganti)
- Posa in opera (vuoti)
- Condizioni di sollecitazione (temperatura, tempo)

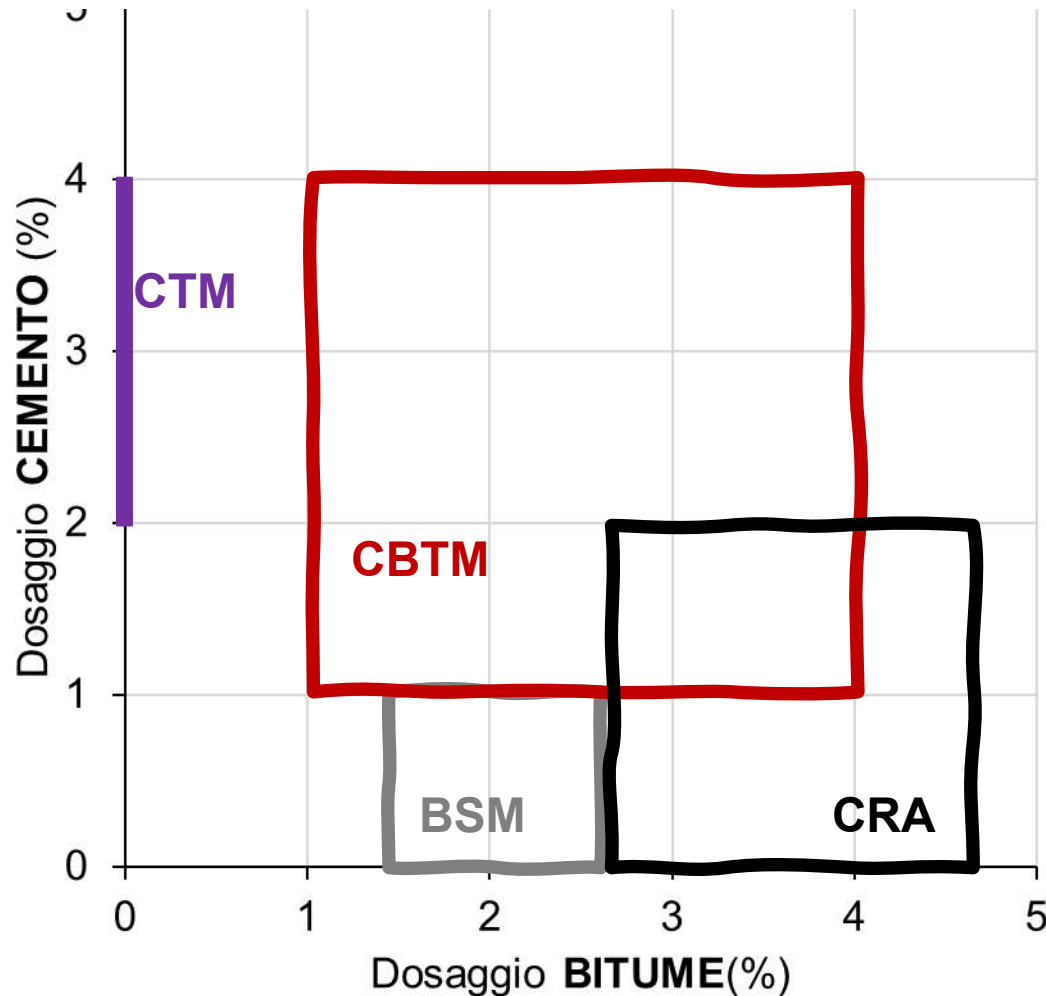


■ Prestazioni

- Caratteristiche meccaniche
- Organizzazione strutturale (stratigrafia della pavimentazione)
- Durabilità materiali

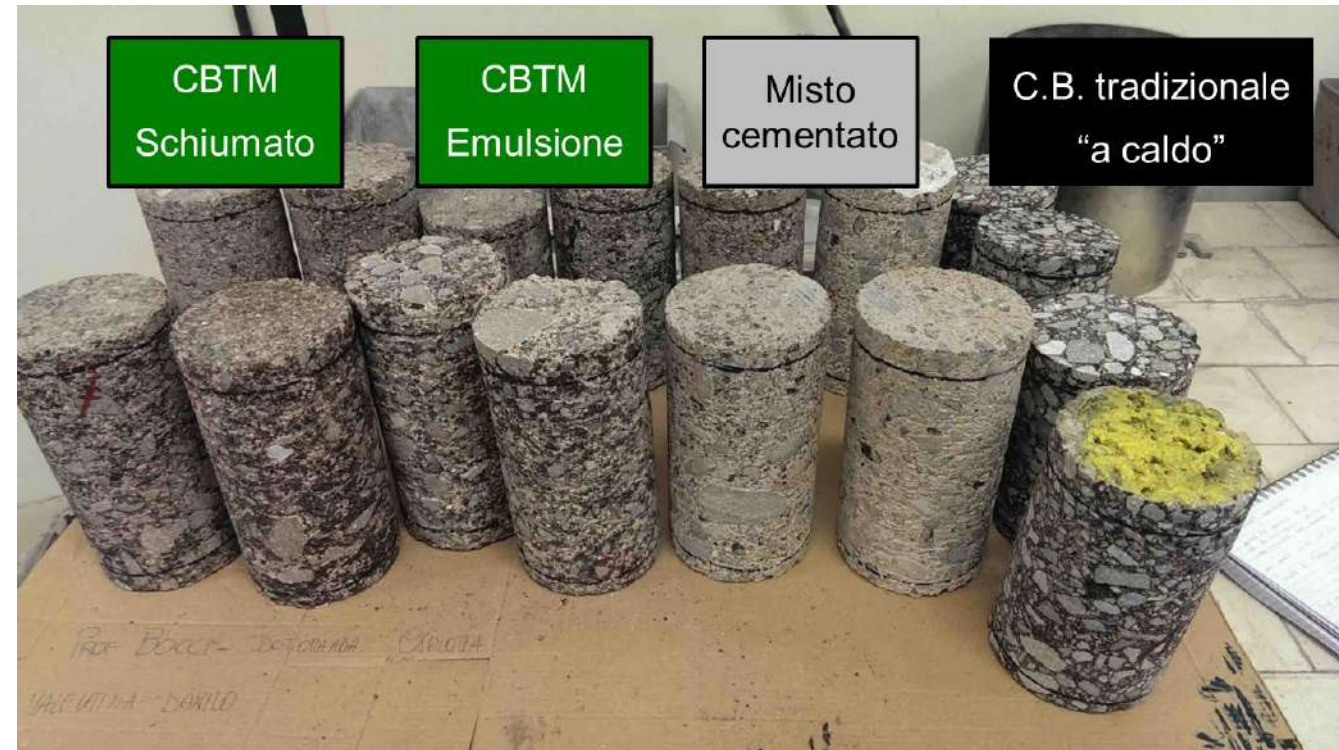
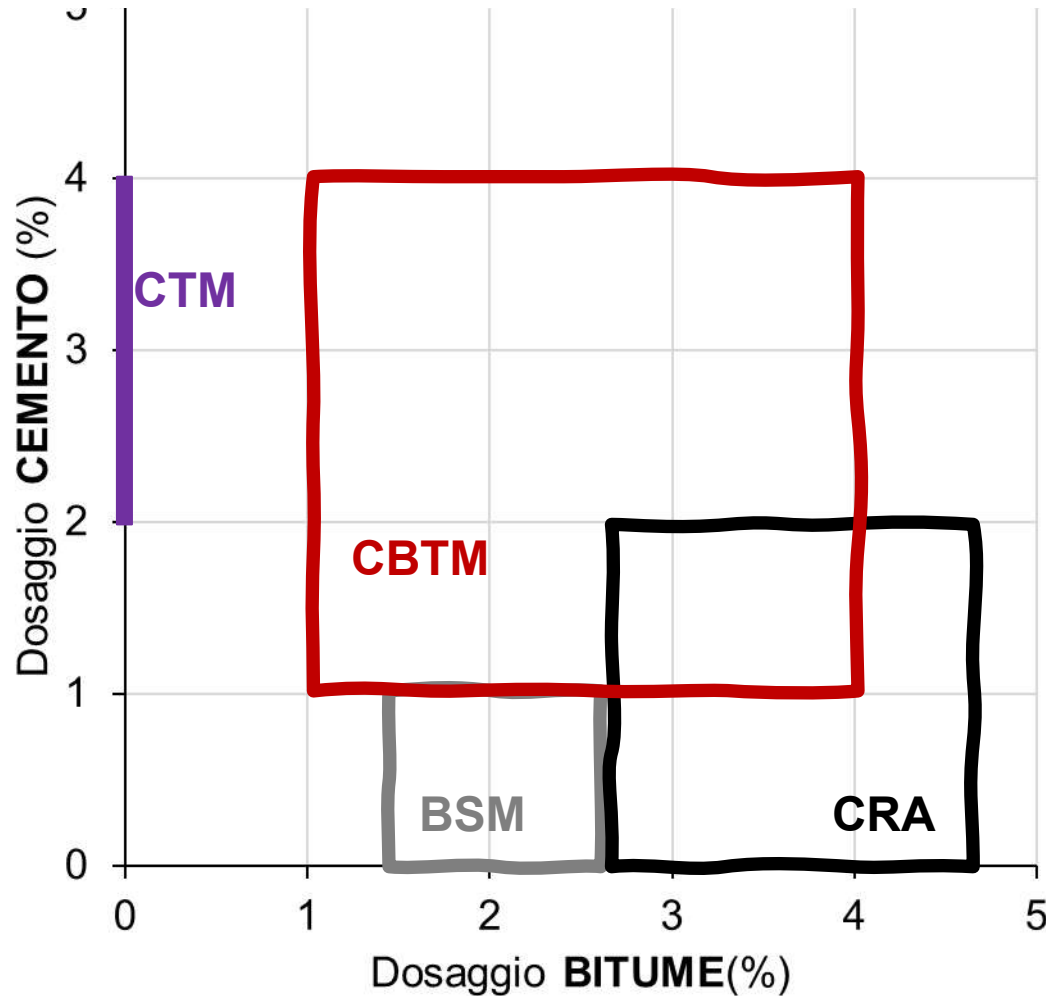


"Famiglie" di miscele riciclate

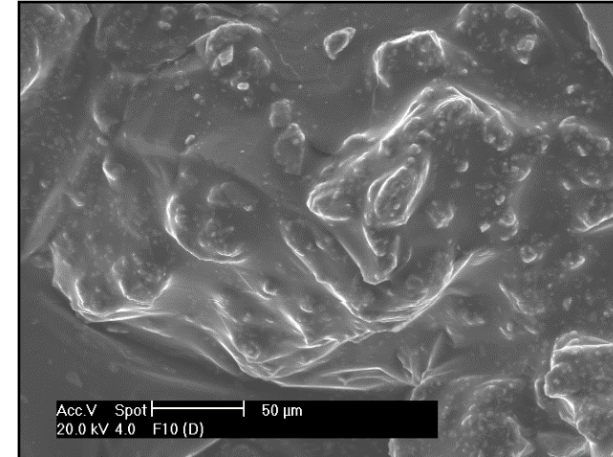
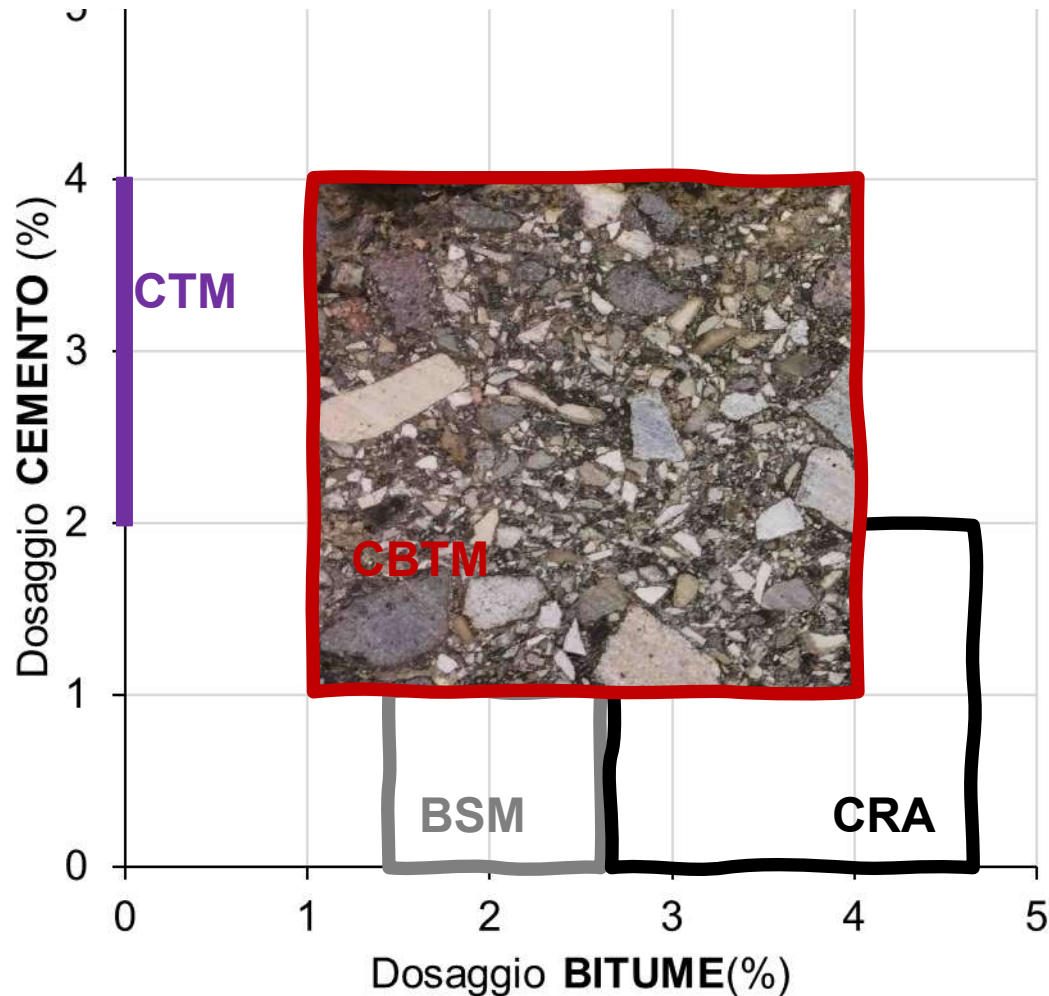


- **Misti cementati riciclati (CTM)**
 - *Cement treated materials*
 - fino al 100% di aggregati riciclati
- **Miscele stabilizzate a bitume (BSM)**
 - *Bitumen stabilised materials*
 - Legami bituminosi isolati, "spot-welding"
- **Miscele legate a bitume-cemento (CBTM)**
 - *Cement-bitumen treated materials*
 - legami bituminosi + legami cementizi
- **Conglomerati riciclati a freddo (CRA)**
 - *Cold Recycled Asphalt*
 - Il bitume vergine ricopre completamente gli aggregati

"Famiglie" di miscele riciclate

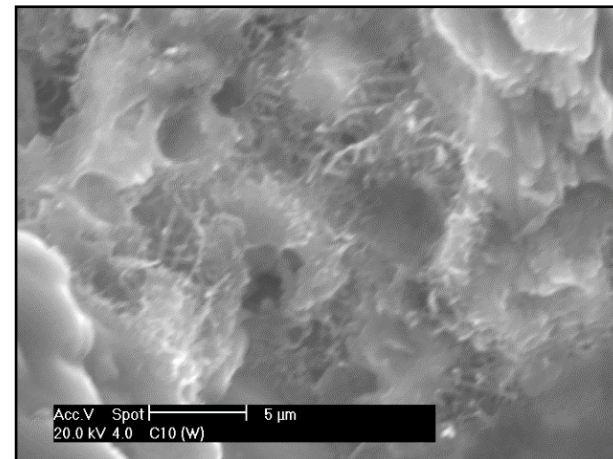


"Famiglie" di miscele riciclate



Legami bituminosi

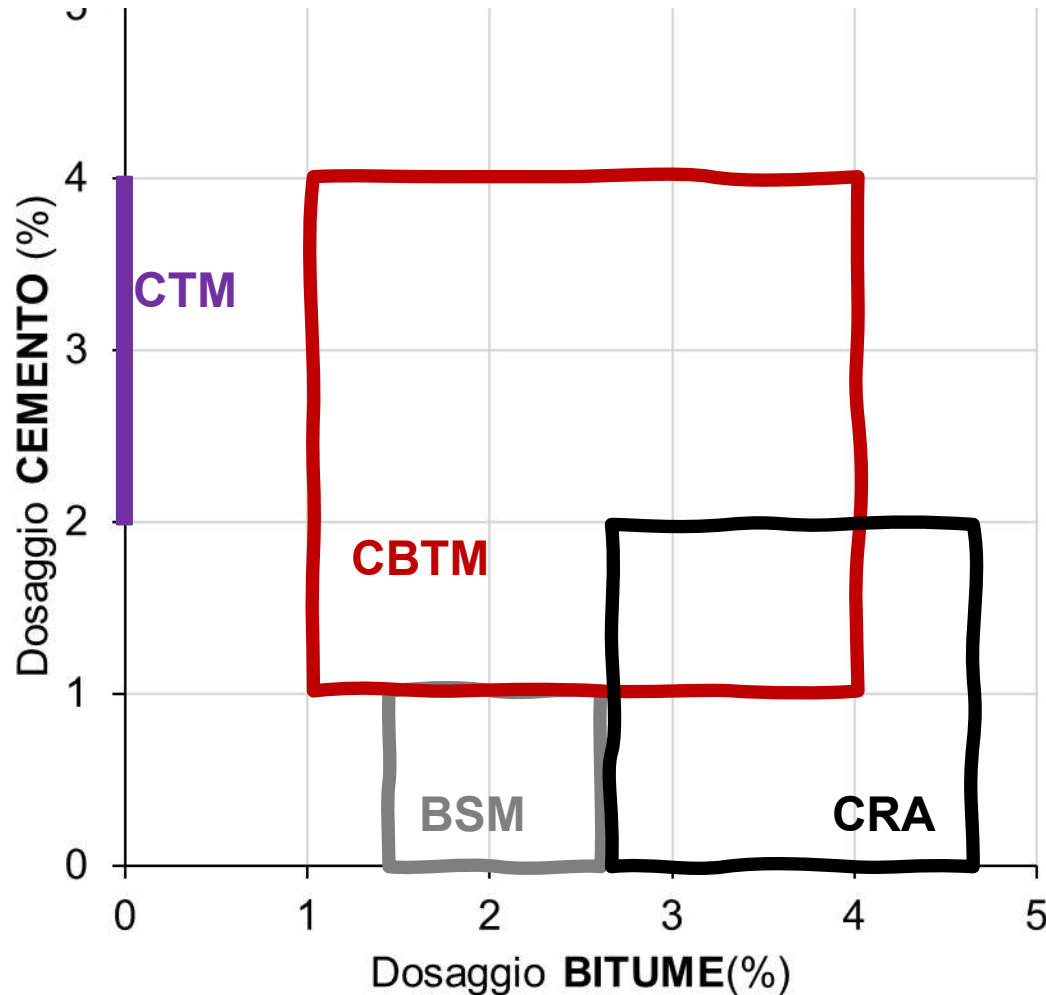
- *termosensibili*
- viscoelastici



Legami cementizi

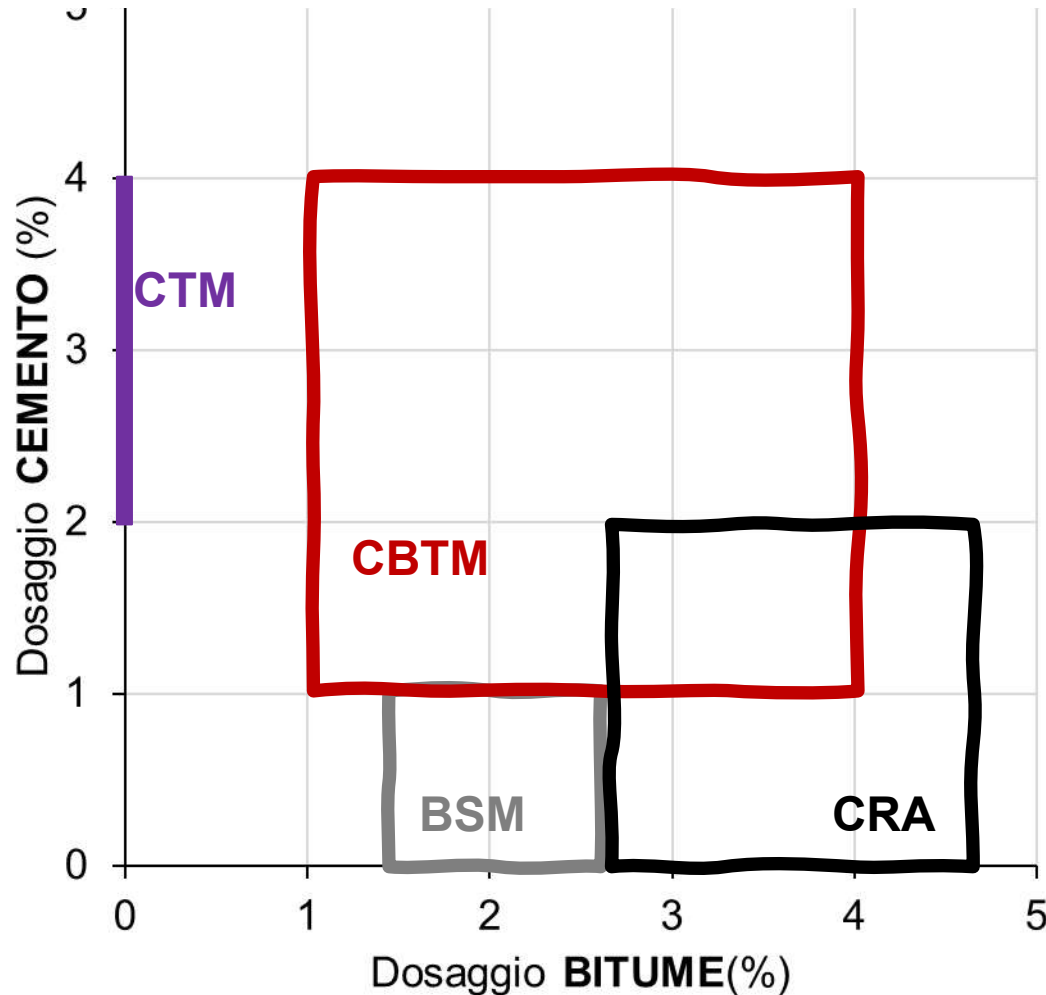
- *non-termosensibili*
- rigido-plastici

"Famiglie" di miscele riciclate: **rigidezza**



- **Misti cementati riciclati (CTM)**
 - Solo legami cementizi \Rightarrow elevata rigidezza, Termo-sensibilità trascurabile
- **Miscele stabilizzate a bitume (BSM)**
 - Termo-sensibilità trascurabile, rigidezza bassa, dipendente dal confinamento
- **Miscele legate a bitume-cemento (CBTM)**
 - Legami bituminosi "isolati" + legami cementizi \Rightarrow Rigidezza termo-dipendente (100 – 10.000 MPa)
- **Conglomerati riciclati a freddo (CRA)**
 - Legami bituminosi "continui" \Rightarrow Rigidezza fortemente termo-dipendente (10 – 10.000 MPa)

"Famiglie" di miscele riciclate: resistenza

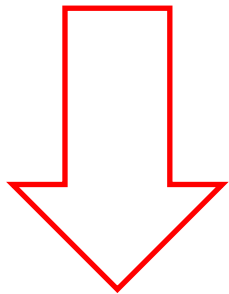


- **Misti cementati riciclati (CTM)**
 - Rottura per fatica (comportamento bi-fase)
 - Bassa tenacità, rischio fessurazione da ritiro
- **Miscele stabilizzate a bitume (BSM)**
 - Rottura per accumulo deformazione permanente
- **Miscele legate a bitume-cemento (CBTM)**
 - Rottura per fatica (comportamento bi-fase)
 - Bassa tenacità, coesione residua
- **Conglomerati riciclati a freddo (CRA)**
 - Rottura per fatica o accumulo di deformazione permanente (dipende dalla temperatura)

Comportamento bi-fase

■ Fase 1: non fessurata

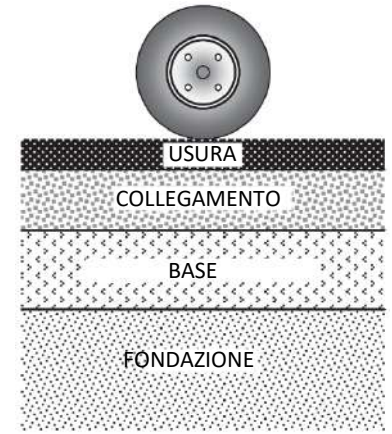
- Elevata rigidezza, comportamento "flessionale"
- Rottura per fatica



La transizione da un comportamento all'altro dipende dalla struttura:

- rigidità dello strato (rigidezza e spessore)
- posizione all'interno della pavimentazione

analisi
strutturale



criterio di
rottura

■ Fase 2: fessurata

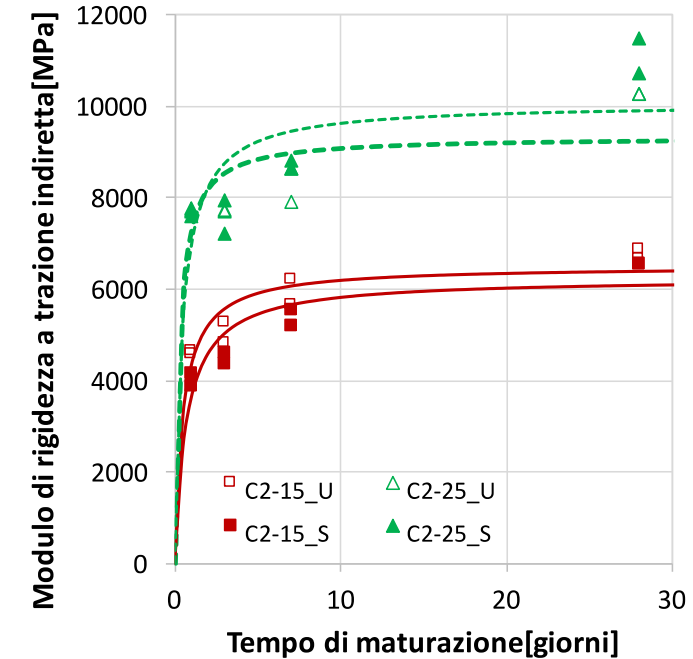
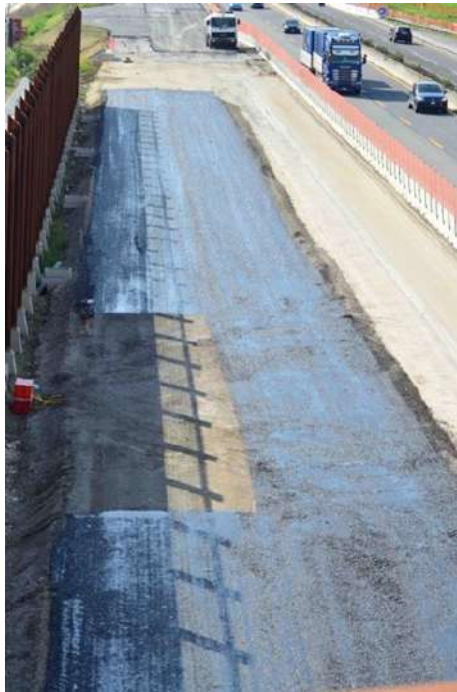
- Bassa rigidezza: "materiale granulare equivalente"
- Rottura per accumulo di deformazione permanente



Maturazione

Insieme di processi chimico-fisici che porta all'aumento di rigidità e resistenza

- Rottura dell'emulsione
- Evaporazione dell'acqua
- Presa e indurimento del cemento

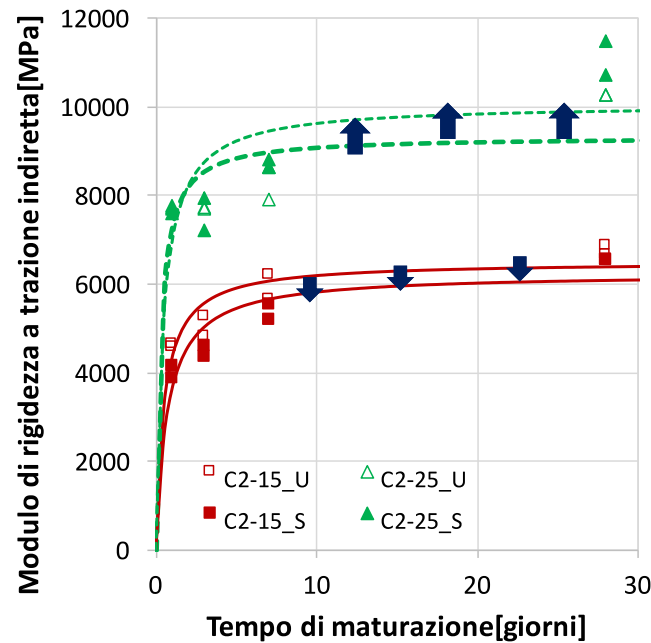


Principali fattori che influenzano la maturazione

- Composizione della miscela (dosaggio di bitume, cemento, acqua)
- Volumetria della miscela (vuoti)
- Posizione all'interno della pavimentazione
- Condizioni al contorno (temperatura, **umidità**)

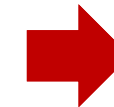
Maturazione e rigidità

Impedendo l'evaporazione
(es: coprendo con emulsione)
si favoriscono i legami cementizi
si penalizzano quelli bituminosi

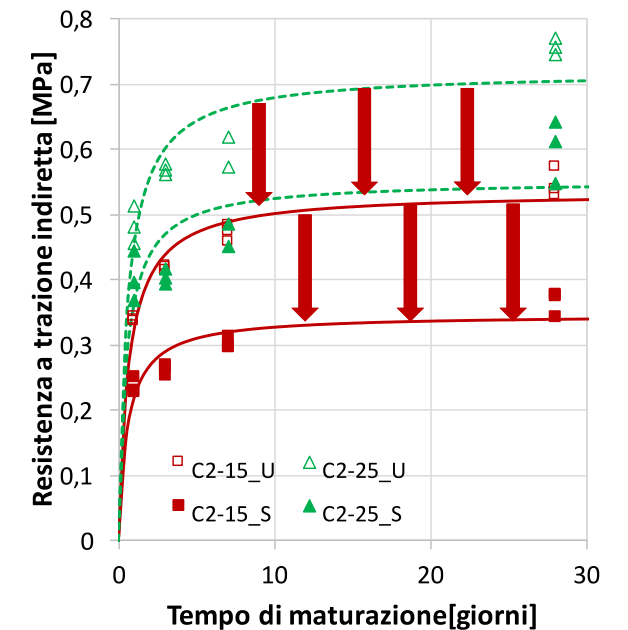


La rigidità cambia poco

La resistenza diminuisce



se le condizioni del cantiere lo consentono
è opportuno che nella prima parte della
maturazione l'evaporazione sia consentita
(si favoriscono i legami bituminosi)



Dimensionamento

- **Si può applicare il metodo razionale per dimensionare pavimentazioni contenenti strati riciclati a freddo, ma...**
 - le leggi di fatica ottenuto in laboratorio NON SONO CALIBRATE (non ancora...)
 - per i CBTM va previsto un comportamento bi-fase
- **Per le miscele stabilizzate a bitume (BSM)**
 - Esiste un metodo "Razionale" sviluppato in Sud Africa, e calibrato per pavimentazioni Sud Africane
- **Per miscele legate a bitume-cemento (CBTM)**
 - In Europa esistono "Cataloghi di dimensionamento"
- Per un predimensionamento (molto, molto, molto, approssimato) si può ipotizzare un coefficiente di equivalenza con le tradizionali miscele a caldo compreso tra 1,2 e 1,5

Catalogo Provincia Autonoma di Bolzano



PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO

CATALOGO DELLE PAVIMENTAZIONI

E

SOTTOFONDO - Modulo di deformazione E_{v2} [MPa] con rapporto $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.5$

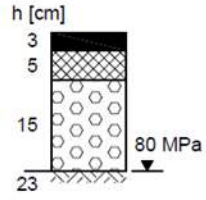
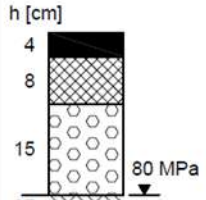
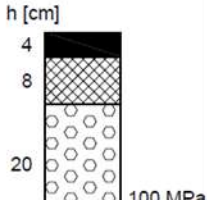
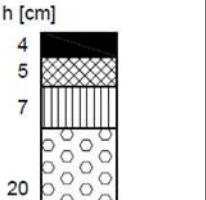





Quota: da 500 m a 1000 m		LIVELLO DI TRAFFICO [ESAL80kN]		LEGENDA:	
		12 – 18 MLN			

Schema 6: Quota 500-1000 m, livelli di traffico 7 e 8

Polish Catalogue

Załącznik
do zarządzenia Nr 31
Generalnego Dyrektora Dróg
Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.

KATALOG TYPOWYCH KONSTRUKCJI
NAWIERZCHNI PODATNYCH I PÓLSZTYWNYCH

Traffic Category	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Design traffic (mIn 100 kN axle)	0,03 - 0,09	0,09 - 0,5	0,5 - 2,5	2,5 - 7,3	7,3 - 22,0	22,0 - 52,0	> 52,0
TYPE E					Not used Individual design	Not used Individual design	Not used Individual design
LEGEND: <ul style="list-style-type: none">  Wearing course - asphalt mixture  Binder course - asphalt concrete  Base course - asphalt concrete  Base course - cold recycled material mixture (with cement and emulsion/foamed bitumen)  Required secondary deformation modulus E_2 							

Sommario

- **Introduzione**
Perché riciclare a freddo
- **Composizione delle miscele "fredde"**
Differenze con i "caldi" e i "tiepidi"
- **Tecniche di riciclaggio**
Campi di impiego
- **Caratteristiche meccaniche**
Comportamento evolutivo
- **Conclusioni**
Vantaggi e limiti

Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats



Grazie per l'attenzione

Prof. Andrea Graziani
Dipartimenti di ingegneria Civile Edile e Architettura(DICEA)
Università Politecnica delle Marche (UNIVPM)
via Brece Bianche, 60131 Ancona, Italy
Tel +39 071 2204507
a.graziani@univpm.it

