

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: Tecnologie, Opportunità e Sfide

Prof. Francesco Canestrari



**DICEA**

DIPARTIMENTO DI  
INGEGNERIA CIVILE, EDILE  
E ARCHITETTURA

Dipartimento di Eccellenza 2018-2022 e 2023-2027



# Sommario

- Imprescindibilità della Sicurezza Stradale
- Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale
- Conglomerati Bituminosi Tiepidi

# Sommario

- Imprescindibilità della Sicurezza Stradale
- Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale
- Conglomerati Bituminosi Tiepidi

# Imprescindibilità della Sicurezza Stradale

Entità del Fenomeno dell’Incidentalità a Livello Nazionale

31'807 Vittime 2013-2022  
2'323'840 Feriti 2013-2022

# Imprescindibilità della Sicurezza Stradale

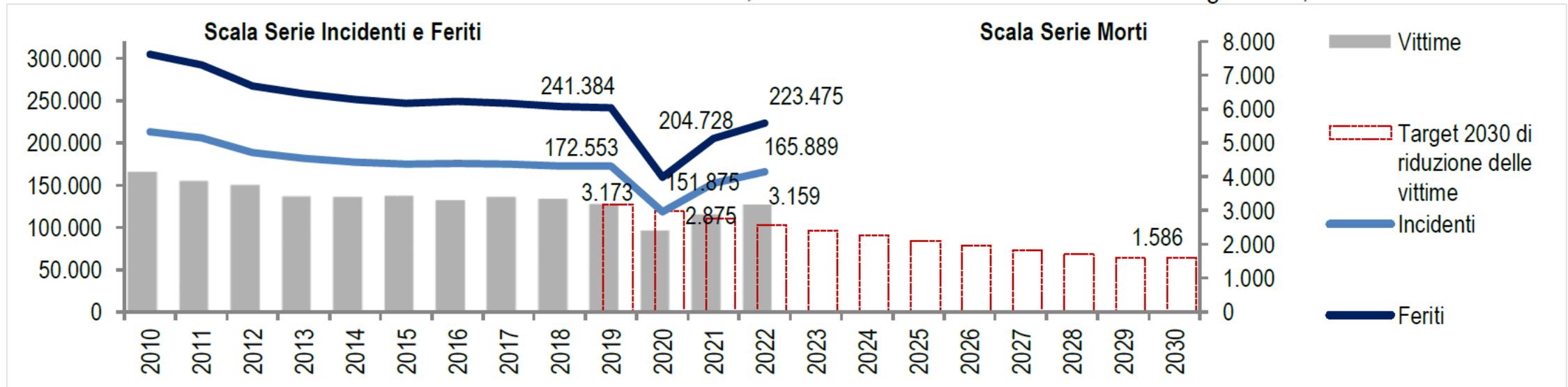
## Entità del Fenomeno dell’Incidentalità a Livello Nazionale

ANNI	Incidenti	Morti	Feriti	Tasso di mortalità stradale (a)	Var.% annua delle vittime (b)	Var.% delle vittime vs 2001 (b)	Var.% delle vittime vs 2010 (b)
2001	263.100	7.096	373.286	124,5	-	-	-
2010	212.997	4.114	304.720	68,8	-2,9	-42,0	-
2011	205.638	3.860	292.019	64,3	-6,2	-45,6	-6,2
2012	188.228	3.753	266.864	62,4	-2,8	-47,1	-8,8
2013	181.660	3.401	258.093	56,4	-9,4	-52,1	-17,3
2014	177.031	3.381	251.147	56,1	-0,6	-52,4	-17,8
2015	174.539	3.428	246.920	56,9	+1,4	-51,7	-16,7
2016	175.791	3.283	249.175	54,6	-4,2	-53,7	-20,2
2017	174.933	3.378	246.750	56,3	+2,9	-52,4	-17,9
2018	172.553	3.334	242.919	55,7	-1,3	-53,0	-19,0
2019	172.183	3.173	241.384	53,1	-4,8	-55,3	-22,9
2020	118.298	2.395	159.249	40,3	-24,5	-66,2	-41,8
2021	151.875	2.875	204.728	48,6	+20,0	-59,5	-30,1
<b>2022</b>	<b>165.889</b>	<b>3.159</b>	<b>223.475</b>	<b>53,6</b>	<b>+9,9</b>	<b>-55,5</b>	<b>-23,2</b>

# Imprescindibilità della Sicurezza Stradale

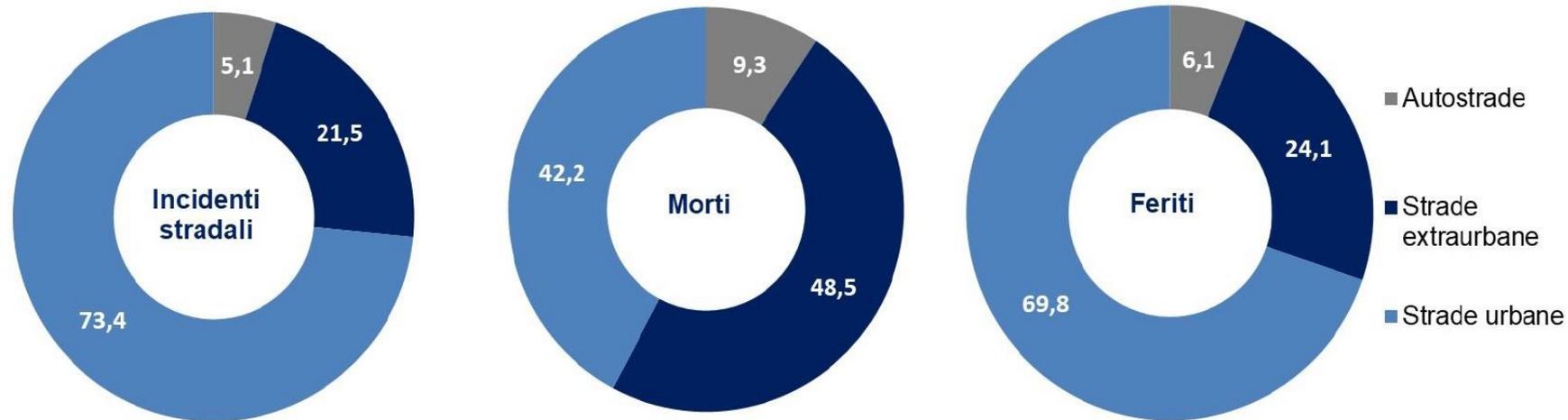
## Entità del Fenomeno dell’Incidentalità a Livello Nazionale

FIGURA 1. INCIDENTI STRADALI CON LESIONI A PERSONE, MORTI E FERITI. Anni 2010-2022 e target 2030, valori assoluti.



# Imprescindibilità della Sicurezza Stradale

## Entità del Fenomeno dell’Incidentalità a Livello Nazionale



**L’indice di mortalità resta più elevato sulle strade extraurbane:**

- ➡ **4,3 decessi ogni 100 incidenti strade extraurbane** ⬅
- 3,5 decessi ogni 100 incidenti sulle autostrade
- 1,1 decessi ogni 100 incidenti sulle strade urbane.

# Imprescindibilità della Sicurezza Stradale

## Ricadute: Eliminazione delle Concause spesso determinanti



# Sommario

- Imprescindibilità della Sicurezza Stradale
- **Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale**
- Conglomerati Bituminosi Tiepidi

# Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale



- Il riciclaggio nei conglomerati bituminosi persegue gli obiettivi della **circular economy**:
  - 1) Ridurre il conferimento in discarica di ingenti quantità di rifiuti;
  - 2) Risparmiare **risorse naturali**;
  - 3) Contenere i **costi energetici**;
  - 4) Ridurre le **emissioni in atmosfera**.



**Senza rinunciare alle prestazioni**

# Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale

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*	<b>37,6</b>
EU-27	246,1	208,2	200,5	197,1	206,0	204,9	211,2	217,6	216,2	208,3	220,7
Europe	324,3	276,4	277,3	263,7	280,9	282,5	296,7	297,9	288,9	276,9	290,6
USA	332,0	326,9	318,1	319,0	331,0	340,0	344,0	353,0	382,0	370,0	392,0

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					
		Hot and Warm Mix Asphalt Production	On-Site Cold Recycling**	Plant Cold Recycling**	Unbound Road Layers	Other Civil Engineering Applications	Put to Landfill /Other Applications/ Unknown
Austria	1.850.000	85	5	0	10	0	0
Croatia	390.000	30	11	6	0	0	53
Czech Republic	2.700.000	20	25	5	25	10	15
Germany	14.000.000	85	0	0	15	0	0
Hungary	250.000*	98	0	0	2	0	0
Italy	11.000.000	<b>30</b>			<b>70</b>		
Norway	1.129.512	46	0	1	54	0	0
Slovakia	82.134	63	29	0	8	0	0
Slovenia	200.000	40	3	2	5	18	32
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**

# Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale

Enorme esubero di materiale pregiatissimo



# Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale

## Riduzione attività estrattive + Valorizzazione Discariche



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

# Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale

## Tecnologie Mature per un uso Estensivo

Conglomerato bituminoso fresato



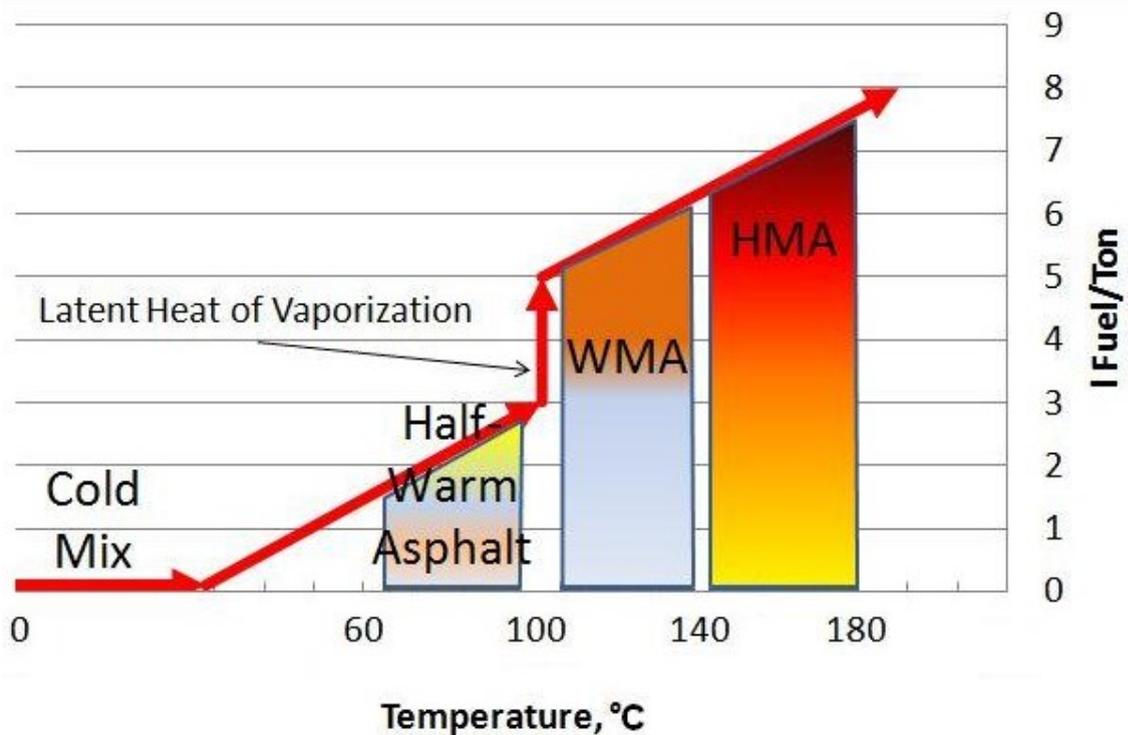
**Riciclaggio a caldo e “warm”:**  
Passare dall’attuale max 30% a  
un percorribile **40-50%**

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

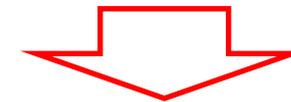
# Sommario

- Imprescindibilità della Sicurezza Stradale
- Sostenibilità Ambientale nel Settore Stradale
- **Conglomerati Bituminosi Tiepidi**

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi



*Warm Mix Asphalt (WMA)*: sono conglomerati bituminosi prodotti a temperature inferiori alle normali miscele a caldo (HMA)



Riduzioni delle temperature di compattazione e miscelazione di 20-60 °C

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Vantaggi delle miscele WMA

- Riduzione delle emissioni
- Miglioramento delle condizioni di lavoro (riduzione di gas nocivi)
- Riduzione del consumo energetico nel processo di miscelazione
- Riduzione dei tempi di riapertura al traffico
- Aumento delle distanze di trasporto raggiungibili
- Aumento delle finestre di lavoro (possibilità di stendere anche di notte e di inverno)
- Ridotto invecchiamento del legante
- Minime variazioni di impianti e attrezzature

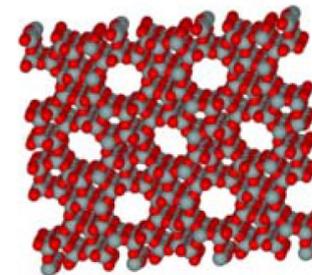
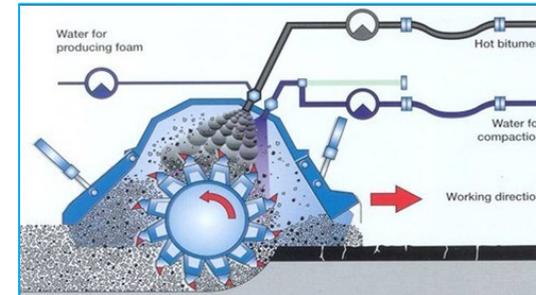
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Le tecnologie WMA

### Processi di schiumatura

L’acqua a contatto con il bitume ad alte temperature tende ad evaporare ed il vapore rimane intrappolato: si forma una schiuma, che aumenta temporaneamente il volume del bitume e ne riduce la viscosità.

- TECNOLOGIE «WATER-BASED»: il processo di schiumatura avviene con iniezione diretta dell’acqua all’interno del bitume caldo tramite appositi ugelli
- TECNOLOGIE «WATER-CONTAINING»: utilizzo di zeoliti sintetiche per produrre il processo di schiumatura



# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Le tecnologie WMA

### Additivi Organici

Cere aggiunte sia al conglomerato bituminoso che al bitume. Quando  $T >$  punto di fusione della cera ( $\approx 80-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), avviene un decremento della viscosità che rende la miscela molto lavorabile.



Quando la miscela raffredda, le cere solidificano sotto forma di particelle microscopiche uniformemente distribuite che provocano un aumento della rigidità del bitume:

- aumento **resistenza alle deformazioni permanenti**
- attenzione all'**infragilimento alle basse temperature**

**Esempi: Sasobit, Montan, ...**

Additivi costituiti da idrocarbonio puro catene di carbonio comprese tra  $C_{45}$  e  $C_{100}$  senza gruppi funzionali, con un punto di fusione superiore a  $T = 80-85\text{ }^{\circ}\text{C}$

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Le tecnologie WMA

### Additivi Chimici

Gli additivi vengono aggiunti al bitume prima della miscelazione. Sono costituiti da un mix di agenti emulsionanti, tensioattivi, polimeri e additivi per aumentare adesione e lavorabilità. La riduzione di temperatura varia a seconda del tipo di additivo.



Esempi: **Cecabase RT, Viachem, Iterlow, Stardope, HA, Mapei, ...**

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Obiettivi

- Verificare l’opportunità di estendere la produzione di miscele tiepide alle normali pratiche operative in campo stradale
- Ampliare lo studio delle miscele tiepide ad un numero maggiore di additivi chimici
- Confrontare le prestazioni di provini confezionati in laboratorio e carote estratte dalla pavimentazione in opera
- Confrontare prove su carote con i risultati di prove FWD e TSD

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

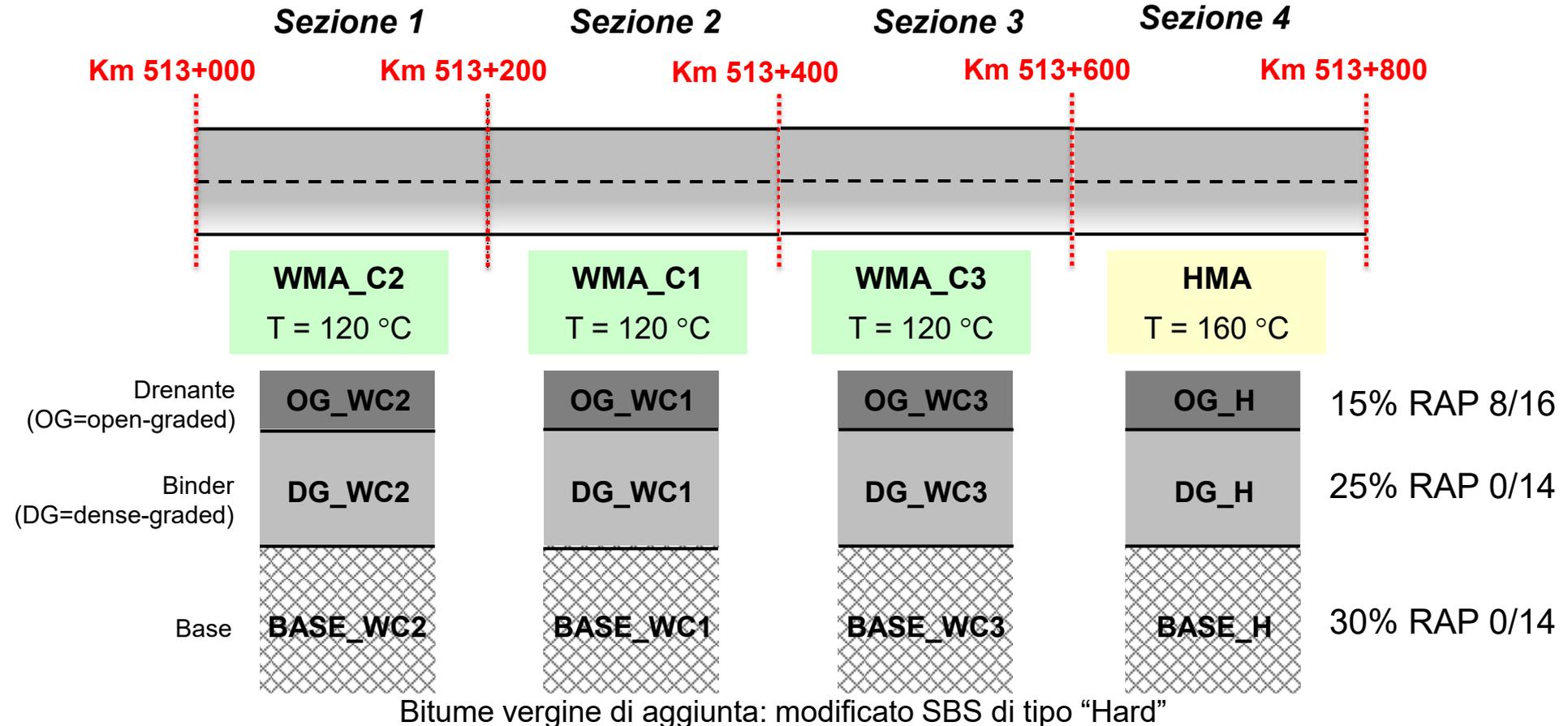
## Sperimentazione con PMB: Stesa sperimentale



- Autostrada A1 – Carreggiata Sud
- Produzione in impianto a caldo e con tecnologia tiepida mediante tre additivi chimici (C1, C2 e C3)
- Quattro sezioni sperimentali comprendenti strato di base, binder e usura drenante
- Esecuzione: aprile 2016

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Stesa sperimentale e Materiali



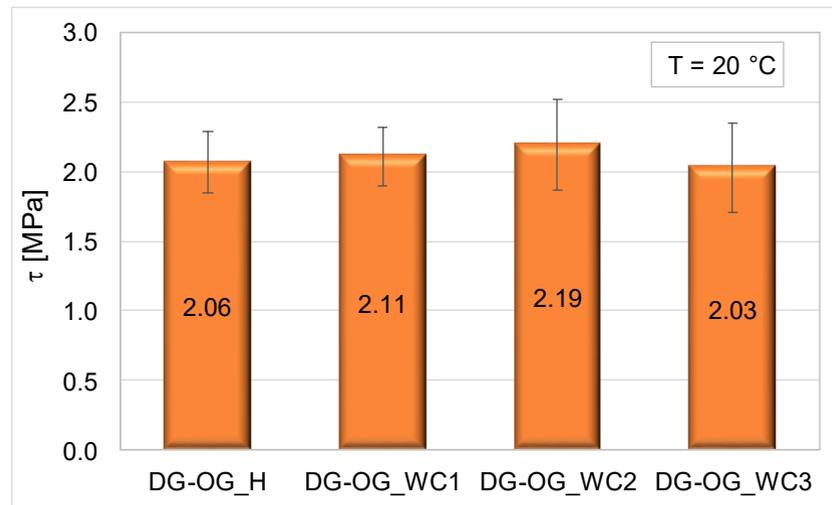
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Risultati di laboratorio

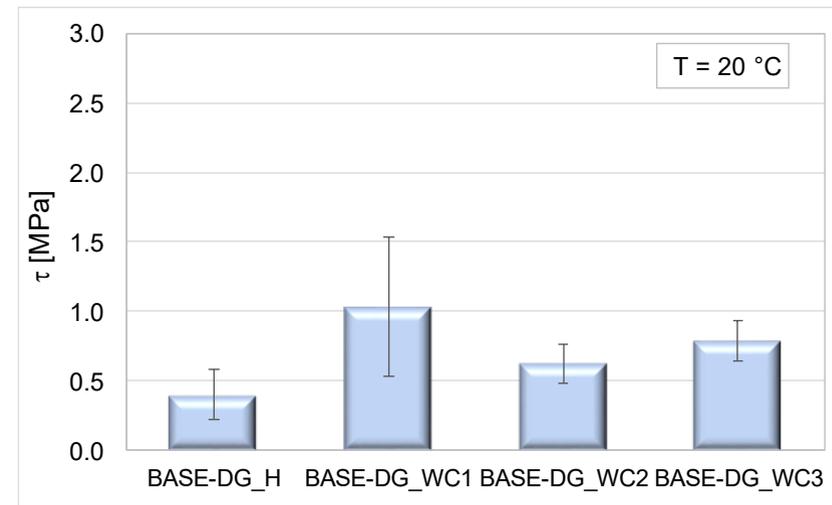
- Prequalifica e validazione miscele prodotte in laboratorio
- Miscele confezionate in impianto e compattate in laboratorio
- Carote prelevate in sito + FWD: dopo la stesa 2016
- Carote prelevate in sito + FWD: monitoraggio 2019
- Carote prelevate in sito: monitoraggio 2021
- Monitoraggio TSD 2022

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Risultati di laboratorio



OG-DG



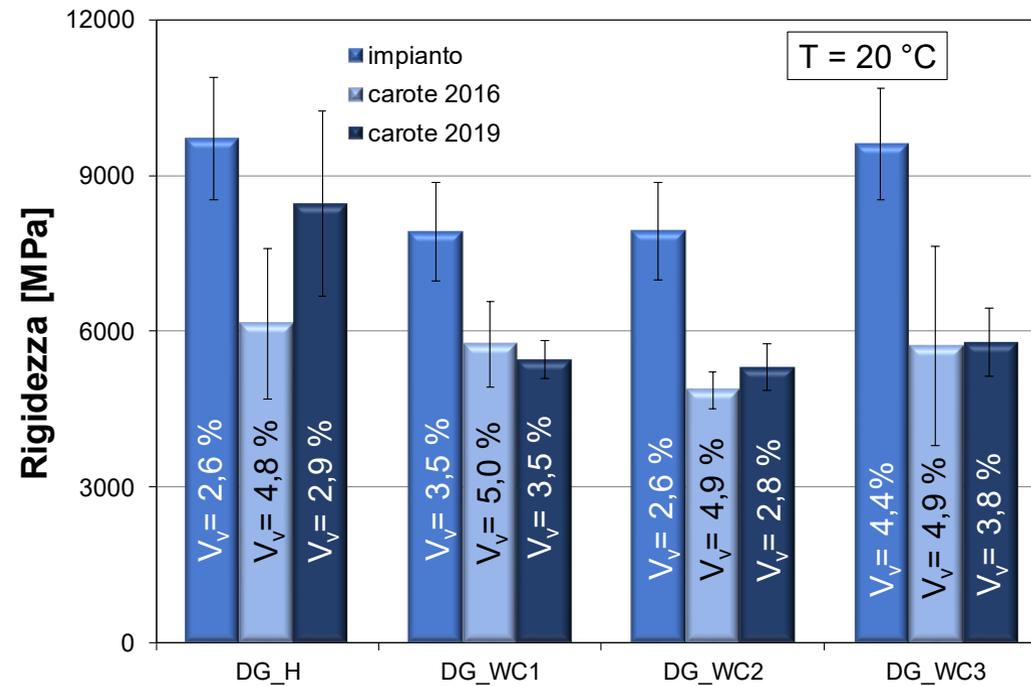
DG-Base

- Analoga resistenza a taglio (Leutner) tra miscele WMA e HMA
- Maggiore resistenza a taglio OG-DG dovuta a diversa tipologia e dosaggio di mano d'attacco

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

Carote impianto/2016/2019

## Sperimentazione con PMB: Risultati di laboratorio

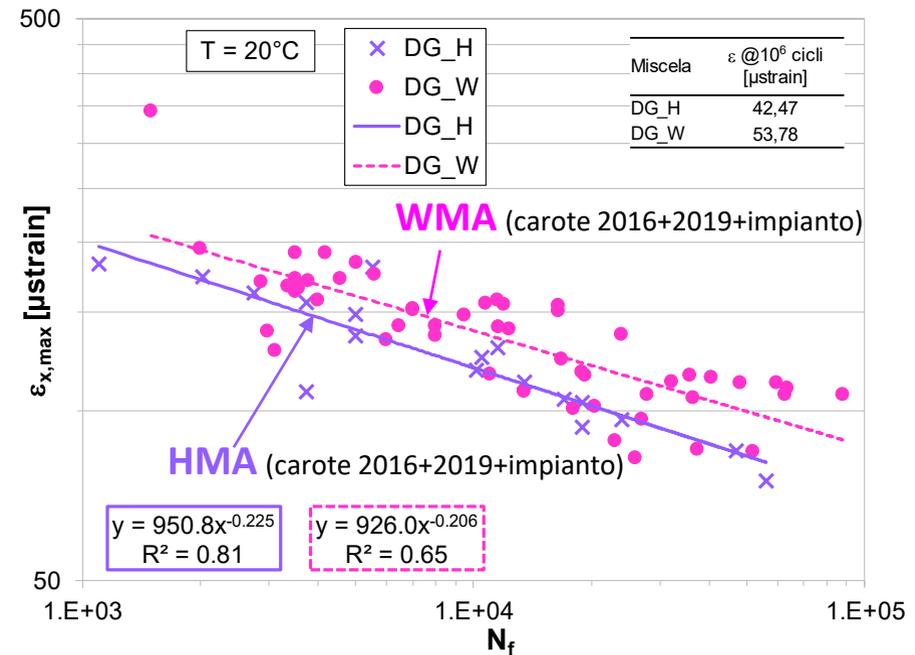
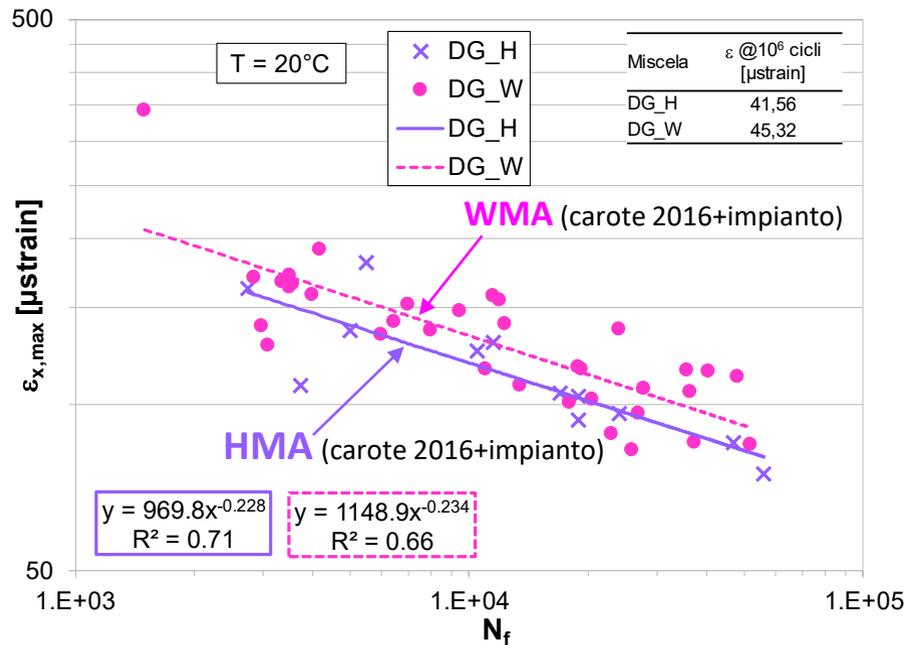


- Impianto e carote 2016: analoga rigidezza ITSM per miscele **WMA** e **HMA**
- Carote 2019: maggiore variabilità miscela HMA e incremento rigidezza per invecchiamento più severo

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

Carote impianto/2016/2019

## Sperimentazione con PMB: Risultati di laboratorio



- Risposta delle miscele sostanzialmente invariata dopo 3,5 anni in esercizio
- Resistenza ai carichi ciclici miscele **WMA** > miscele **HMA**

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

Sperimentazione con PMB: **S-VECD (HMA vs WMA\_C1)**

## Viscoelastic Continuum Damage (VECD) Model



Principio di  
corrispondenza  
Elastica-  
Viscoelastica

Effetti viscoelastici  
lineari



Meccanica del  
Danno applicata  
al continuo

Microfessurazione  
associata al degrado  
resistenza/rigidezza



Sovrapposizione  
Tempo-Temperatura  
con Danno crescente

Effetti combinati  
tempo-temperatura

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

Sperimentazione con PMB: S-VECD (HMA vs WMA\_C1)

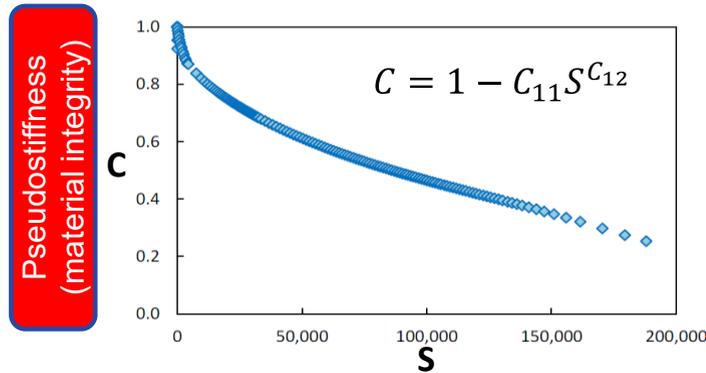
Curva caratteristica del Danno: Pseudo rigidezza C(S)

“È possibile individuare un’unica curva caratteristica in grado di descrivere la riduzione dell’integrità “C” del materiale all’aumentare del danno “S” nel provino, a prescindere dalle condizioni di carico (ciclico, monotono, ampiezza/velocità, frequenza) e dalla temperatura”

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: S-VECD (HMA vs WMA\_C1)

(1) Damage characteristic curve

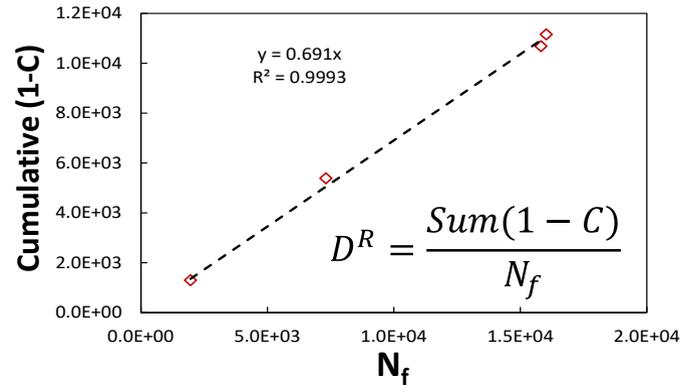


Amount of damage (microcracks)

- Decrease of pseudostiffness as the damage increases

EVOLUTION OF THE DAMAGE

(2) Pseudoenergy based failure criterion



- $D^R$ : Average loss of integrity of the material during cycling loading

TOUGHNESS

3) Synthetic index: apparent damage capacity

$$S_{app} = 1000^{\frac{\alpha-1}{2}} \frac{a_{T(S_{app})}^{\frac{1}{\alpha+1}} \left( \frac{D^R}{C_{11}} \right)^{\frac{1}{C_{12}}}}{\left| E^* \right|_{LVE, S_{app}}^{\frac{\alpha}{4}}}$$

$S_{app}$  takes into account **dynamic modulus**, **fatigue damage evolution**, and **failure criterion** results.

Traffic (million ESALs)	$S_{app}$ Limits	Tier	Designation
Less than 10	$S_{app} > 8$	Standard	S
Between 10 and 30	$S_{app} > 24$	Heavy	H
Greater than 30	$S_{app} > 30$	Very Heavy	V
Greater than 30 and slow traffic	$S_{app} > 36$	Extremely Heavy	E

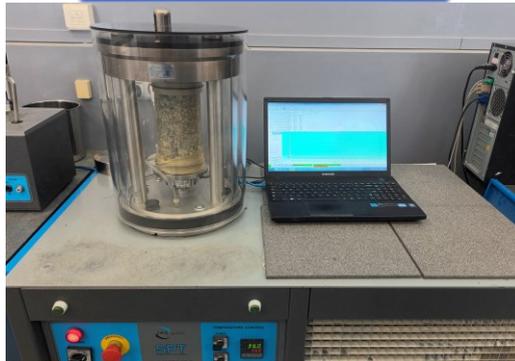
INTRINSIC PROPERTIES OF THE MATERIAL

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

Carote 2022

## Sperimentazione con PMB: S-VECD (HMA vs WMA\_C1)

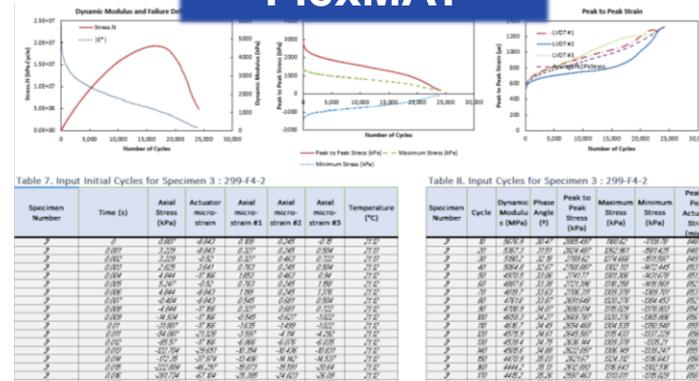
SPT/AMPT



### AD-HOC LABORATORY TESTS

- Dynamic Modulus
- Direct tension cyclic fatigue
- Stress Sweep Rutting

FlexMAT



# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: S-VECD (HMA vs WMA\_C1)



Carotaggio orizzontale di provini di diametro 38 ed altezza 110 mm



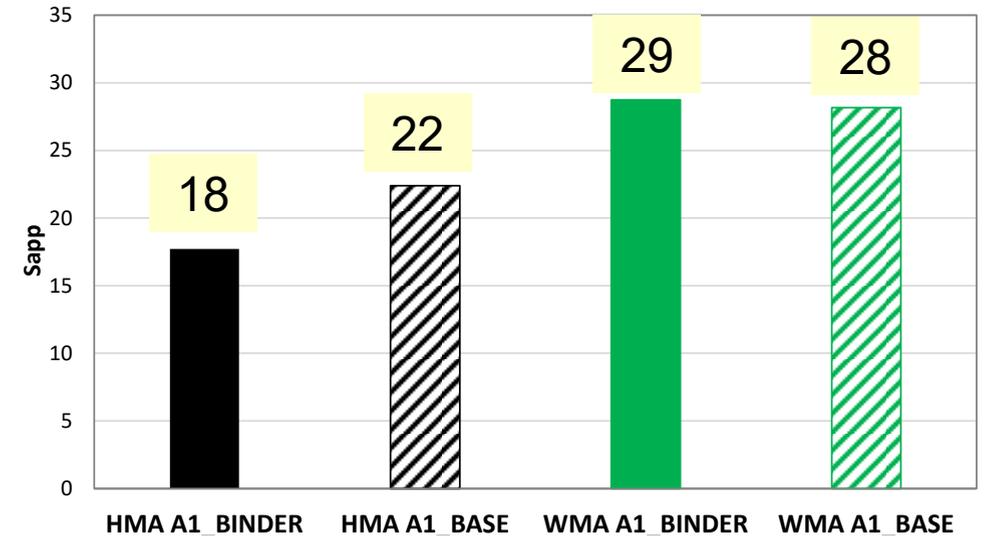
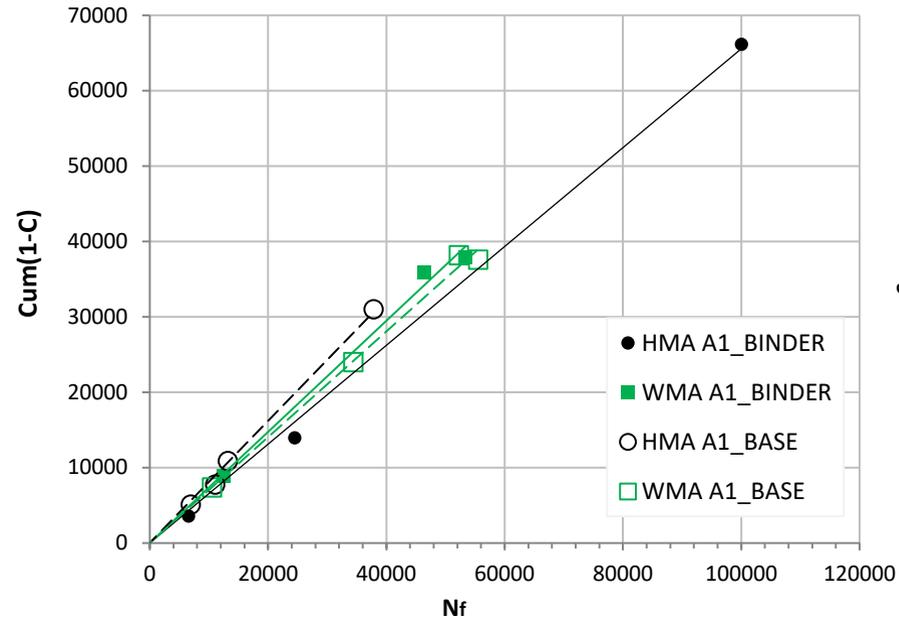
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

Carote 2022

## Sperimentazione con PMB: S-VECD (HMA vs WMA\_C1)

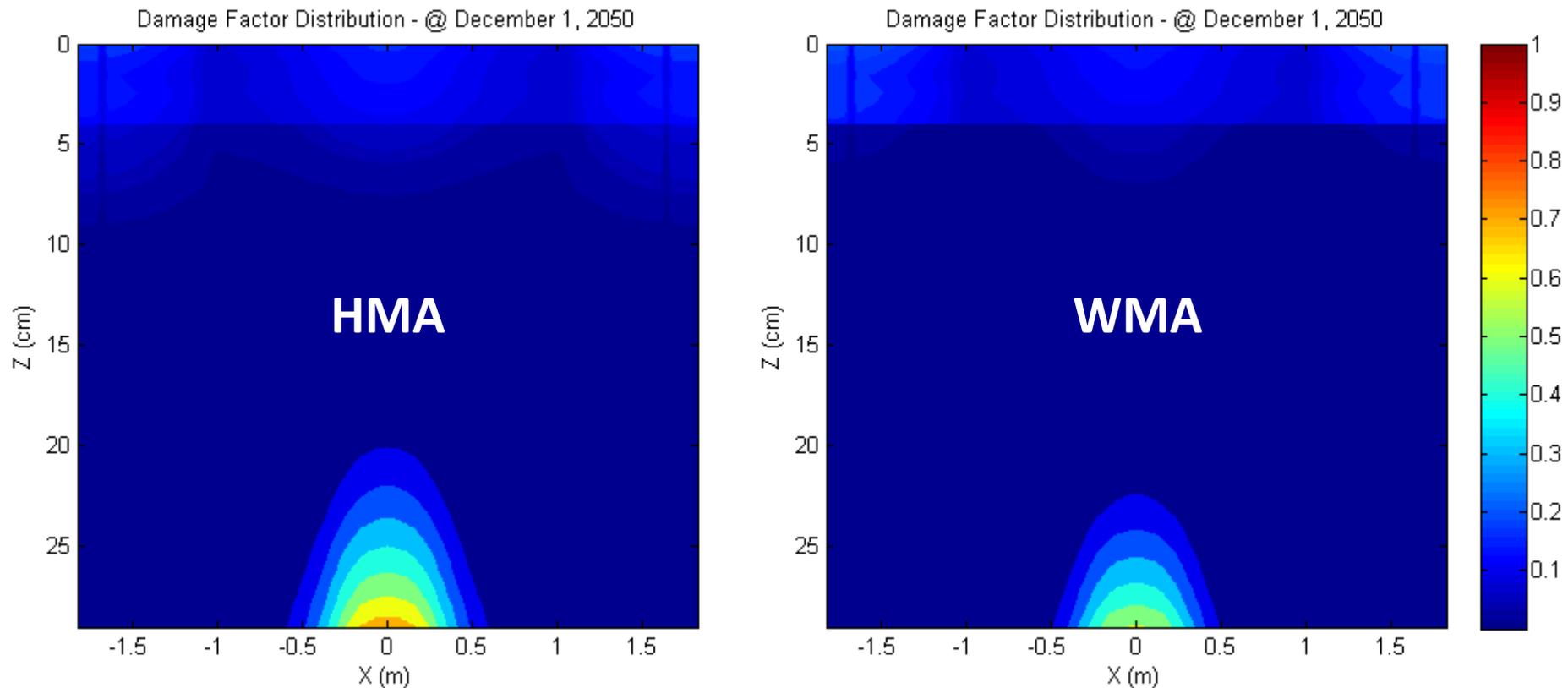
Valori di  $D_R$ :

- HMA binder 0.6558
- WMA binder 0.8094
- HMA base 0.7364
- WMA base 0.7015



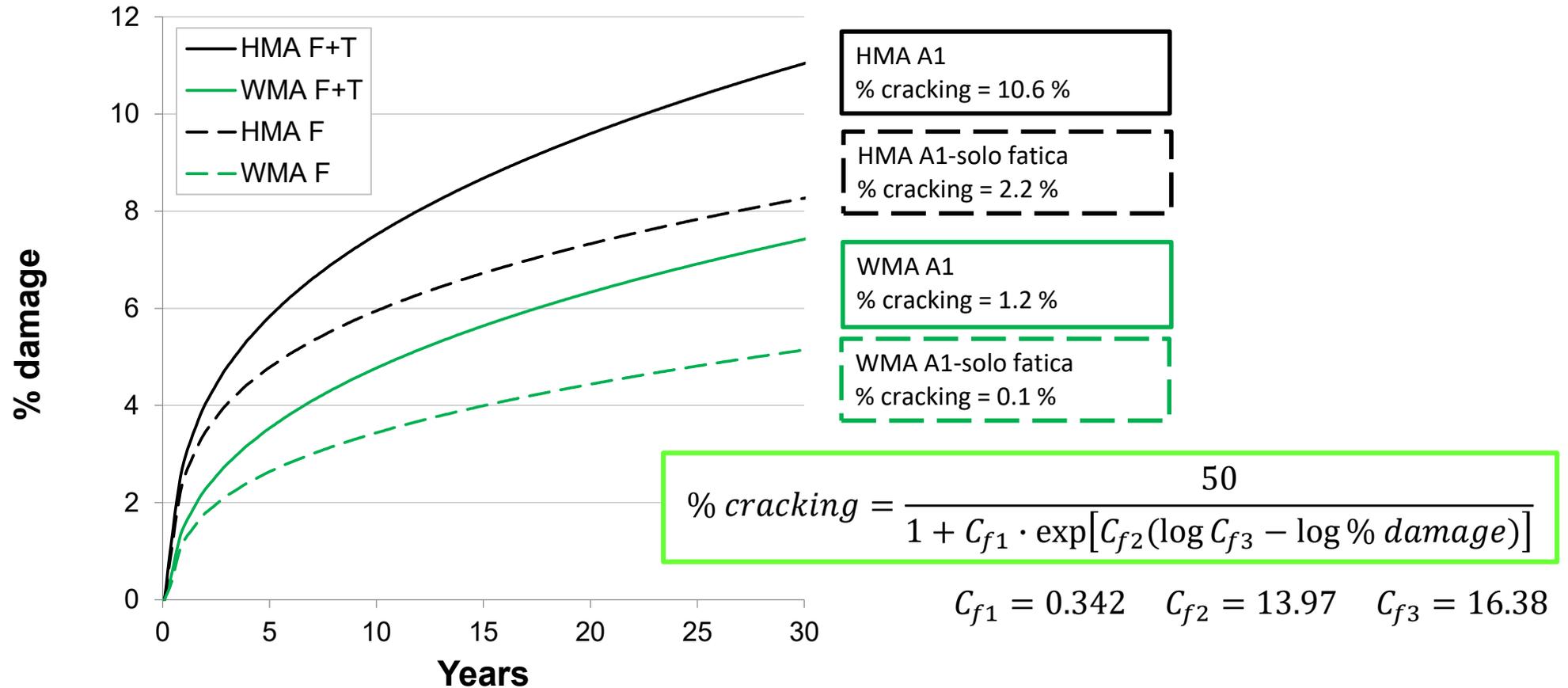
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: S-VECD (HMA vs WMA\_C1)



# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: S-VECD (HMA vs WMA\_C1)



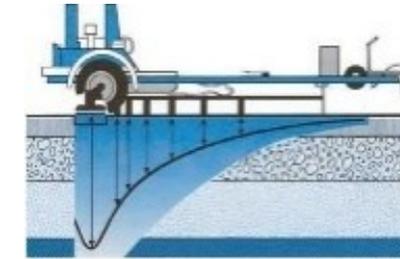
$$\% \text{ cracking} = \frac{50}{1 + C_{f1} \cdot \exp[C_{f2}(\log C_{f3} - \log \% \text{ damage})]}$$

$$C_{f1} = 0.342 \quad C_{f2} = 13.97 \quad C_{f3} = 16.38$$

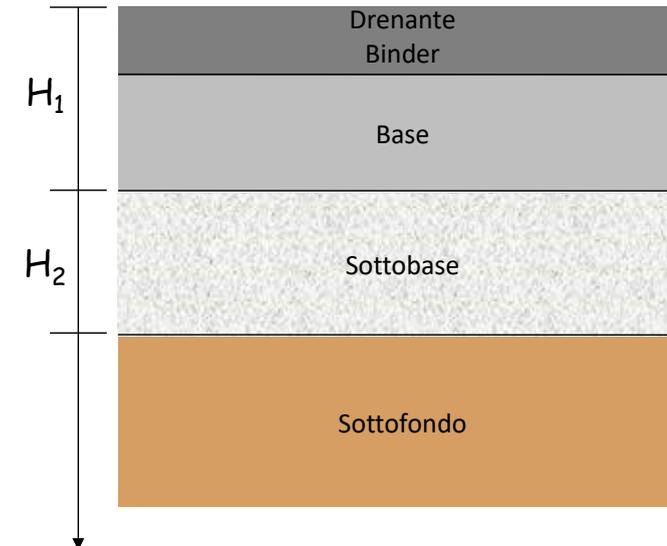
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Dati campagna prove

Campagna Prove FWD		
Sezione	N° battute 2016	N° battute 2019
km 513+000 – km 513+200	11	10
km 513+200 – km 513+400	11	11
km 513+400 – km 513+600	11	11
km 513+600 – km 513+800	8	8



- Stratigrafia rilevata tramite Georadar
- Spessori di progetto:
  - usura drenante = spessore 4 cm
  - collegamento = spessore 10 cm
  - base = spessore 15 cm
  - sottobase = spessore 25 cm
  - sottofondo

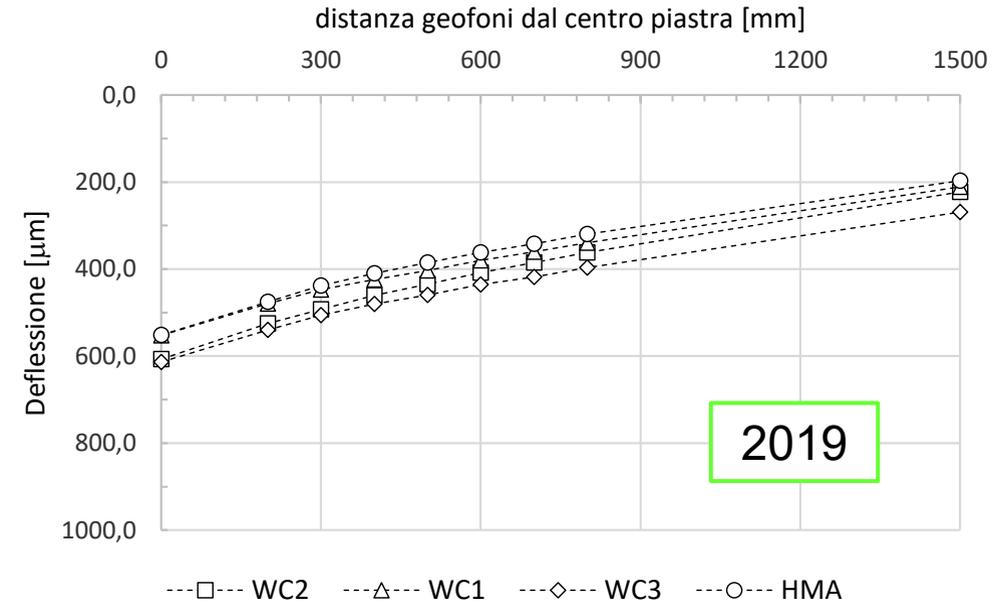
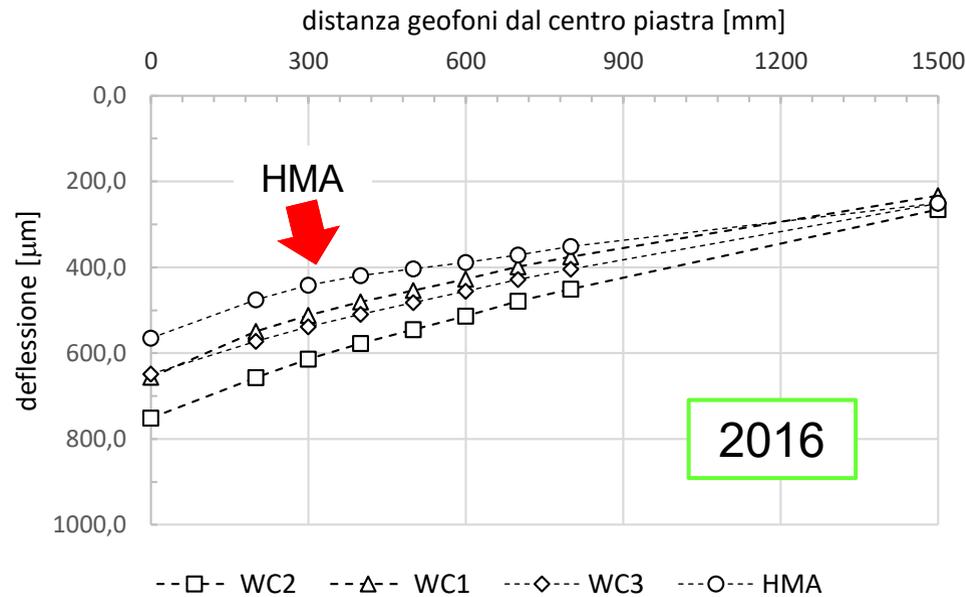


$H_1 = H_1$  da misure georadar  
 $H_2 = H_2$  da misure georadar

FWD/2016/2019

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Bacini rappresentativi

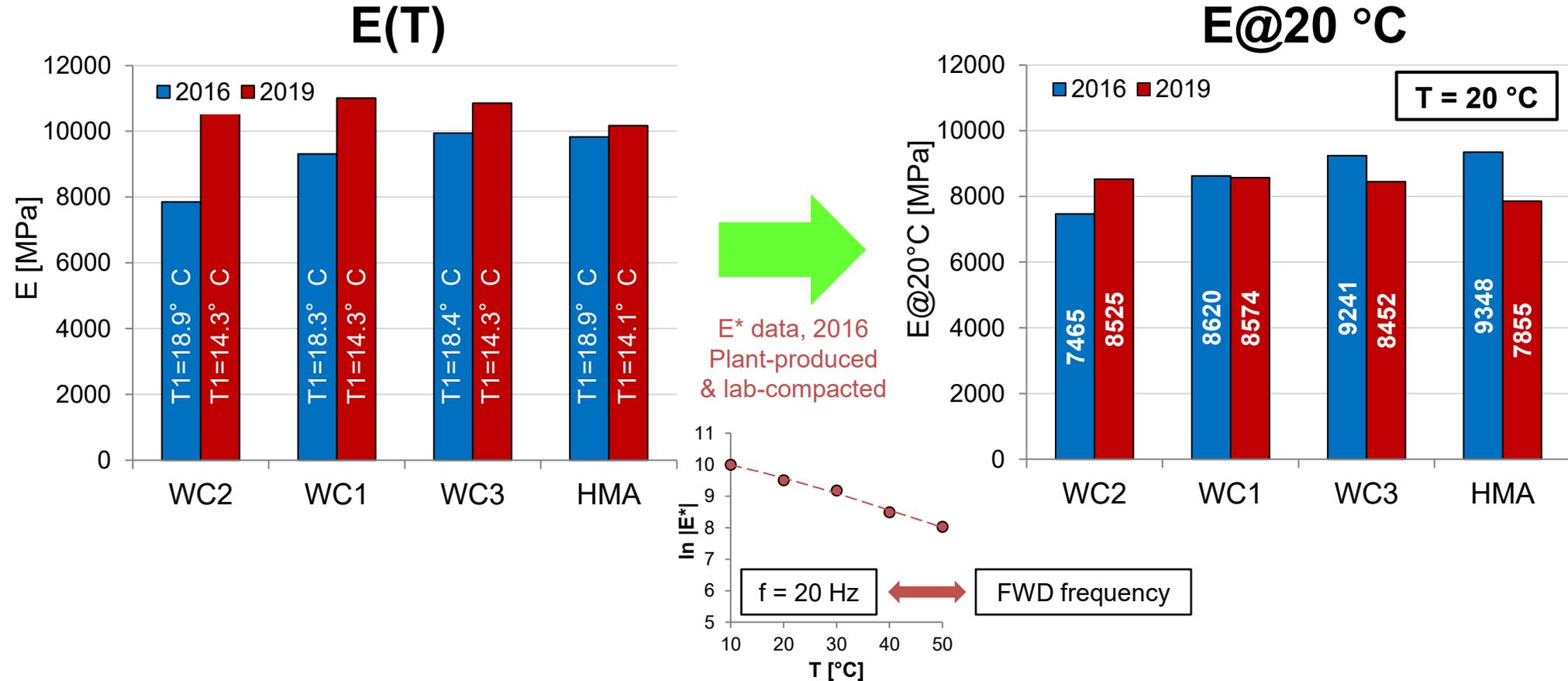


- Deflessioni minori sezione HMA (maggiore rigidità per aging più marcato).
- Valori  $d_{1500}$  confrontabili anche dopo 3,5 anni (analoghe proprietà sottofondo).
- Dopo 3,5 anni in esercizio bacini più confrontabili: maggiore danno HMA?

FWD/2016/2019

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Backcalculation

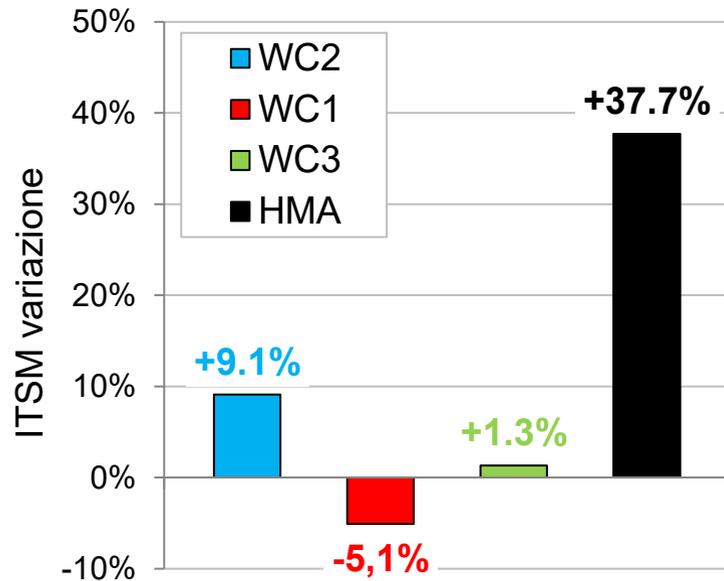


# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

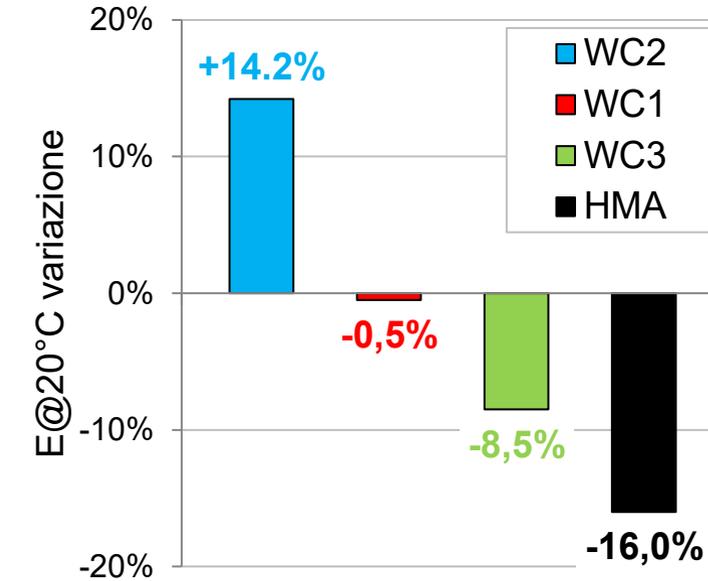
FWD/2016/2019

## Sperimentazione con PMB: Backcalculation

ITSM variazione (2019 vs. 2016)



E@20 °C variation (2019 vs. 2016)

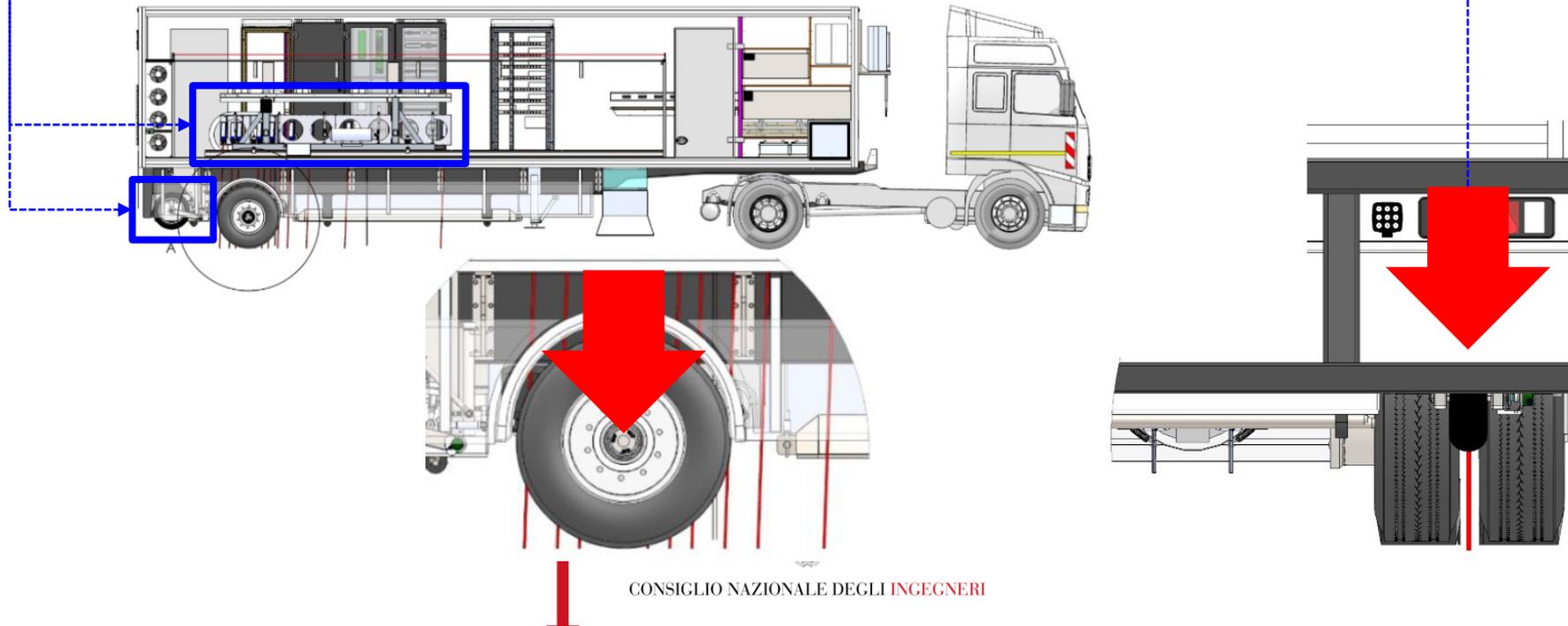


- WC2: ITSM & E@20 °C crescono – WC1 and WC3: circa costanti
- HMA: ITSM cresce (**prestazione mix**) & E@20 °C diminuisce (**prestazione strato**)
- HMA: maggiore invecchiamento → maggiore propensione a danno e fessurazione

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Monitoraggio TSD

- (50+50 kN) applicati all’asse del semirimorchio lato dx (zavorra)
- **Sensori laser doppler** montati su una trave di supporto
- Odometro, accelerometri, sistema di condizionamento (20 °C)



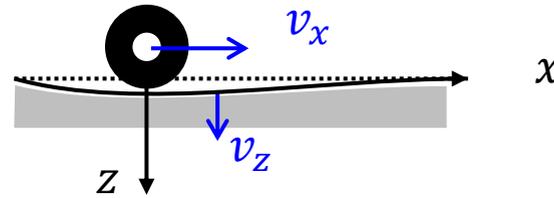
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Monitoraggio TSD

### Pendenza della superficie

$$z'(x) = \frac{dz}{dx} = \frac{dz/dt}{dx/dt} = \frac{v_z}{v_x}$$

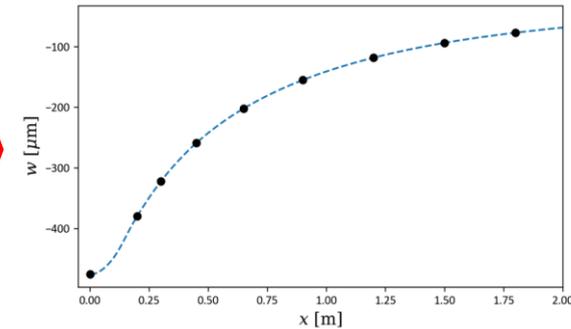
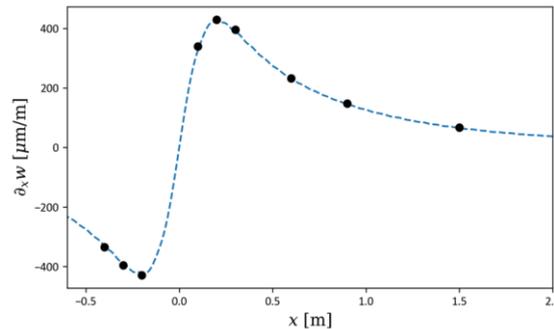
Velocità verticale (laser doppler)



Velocità orizzontale (veicolo)

### Deflessione della superficie

$$z(x) = \int_{x_i}^{x_f} z'(x) dx$$



TSD/2022

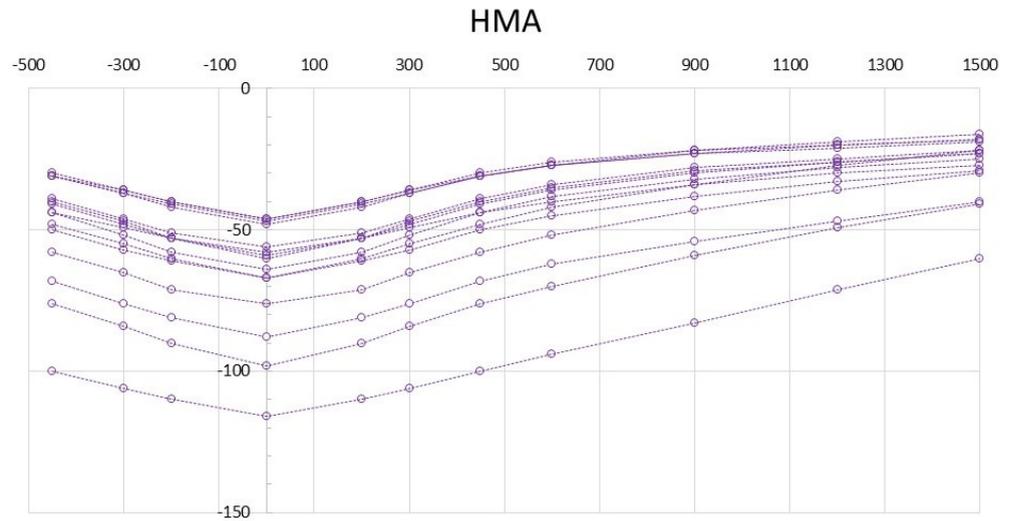
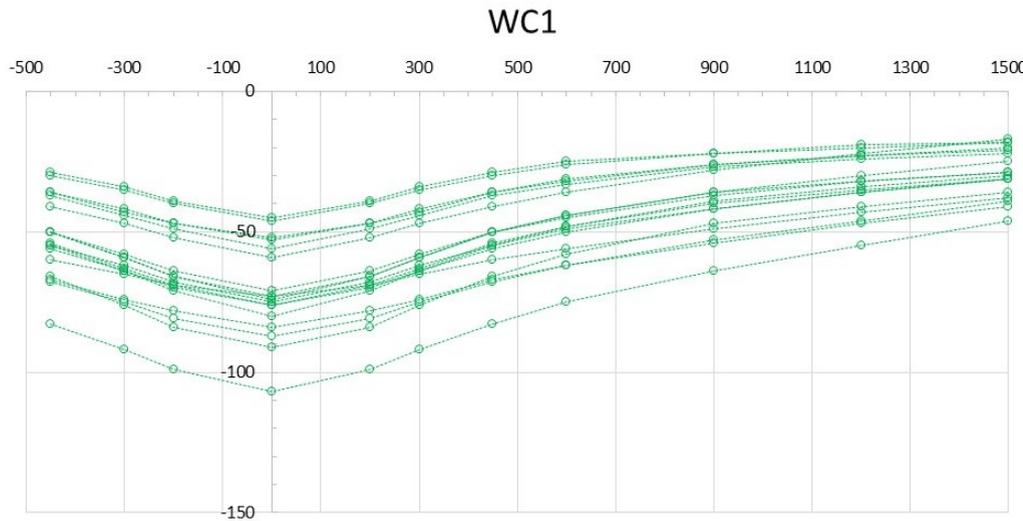
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi

## Sperimentazione con PMB: Monitoraggio TSD

$T_{air} = 19,4 \text{ °C}$



$T_{sup} = 24,8 \text{ °C}$



# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

## Tipologia di miscela (varie % RA)

- CB chiuso per strati di base (DGAC\_base)
- CB chiuso per strati di binder (DGAC\_binder)
- CB aperto per strati di usura drenante (OGAC\_wearing)

## Periodi di indagine

a. dicembre-febbraio ( $T_{media} = 6,6 \text{ °C}$ )

b. giugno-agosto ( $T_{media} = 24,3 \text{ °C}$ )

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

## Fasi produzione conglomerati bituminosi:

1. Riscaldamento **aggregati**
2. Riscaldamento **bitume** ( $T = 170\text{ °C}$ )
3. **Miscelazione** (WMA: 30 sec @ $130\text{ °C}$ ; HMA: 26 sec @ $170\text{ °C}$ )



# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

## Parametri calcolati

- i. Energia termica per riscaldamento **aggregati** e **bitume**
- ii. Consumo carburante per riscaldamento **aggregati** e **bitume**
- iii. Emissioni CO<sub>2</sub> per riscaldamento **aggregati** e **bitume**
- iv. Consumo di energia in fase di **miscelazione**
- v. Emissioni CO<sub>2</sub> in fase di **miscelazione**

## Parametri misurati

- Emissioni di inquinanti (NO<sub>x</sub>, COV, CO, PM, SO<sub>x</sub>) in fase di riscaldamento degli aggregati

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

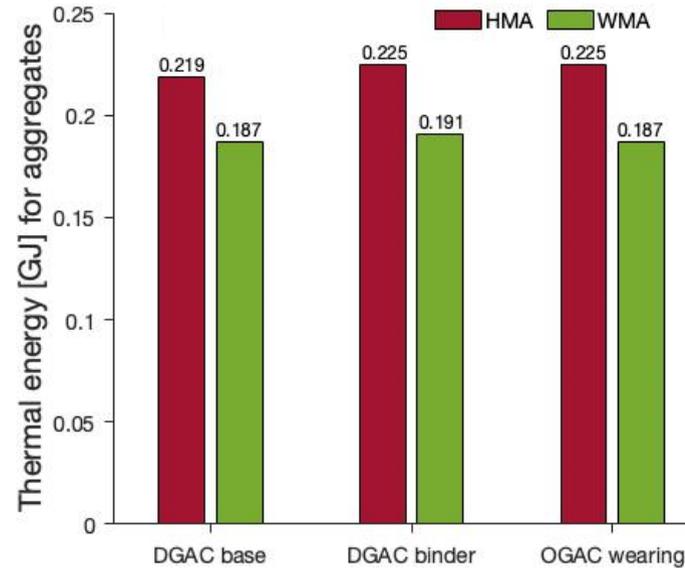
## Riscaldamento aggregati

Tipologia di miscela	Temperatura riscaldamento aggregati [°C]			
	dic-febb		giu-ago	
	HMA	WMA	HMA	WMA
<b>DGAC_base (30% RA)</b>	240	200	220	180
<b>DGAC_binder (25% RA)</b>	230	190	210	170
<b>OGAC_wearing (15% RA)</b>	200	160	190	150

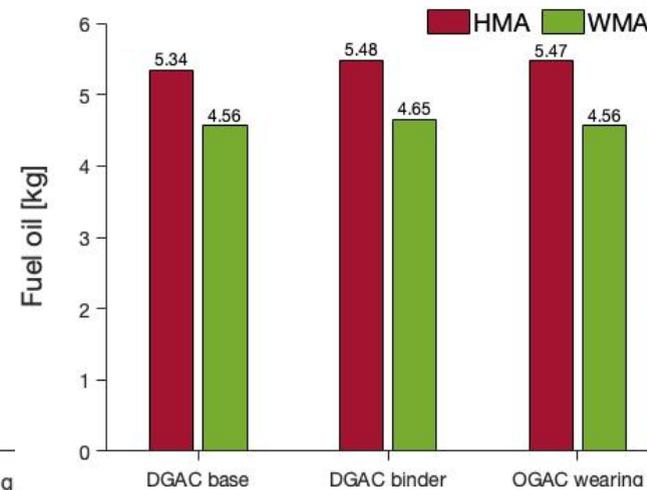
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

## Riscaldamento aggregati

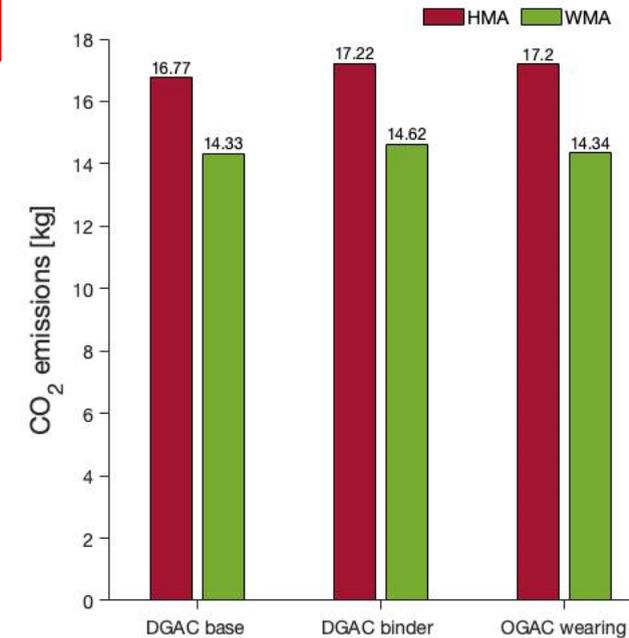
Riduzione di circa il 15%



Energia termica



Consumo di carburante

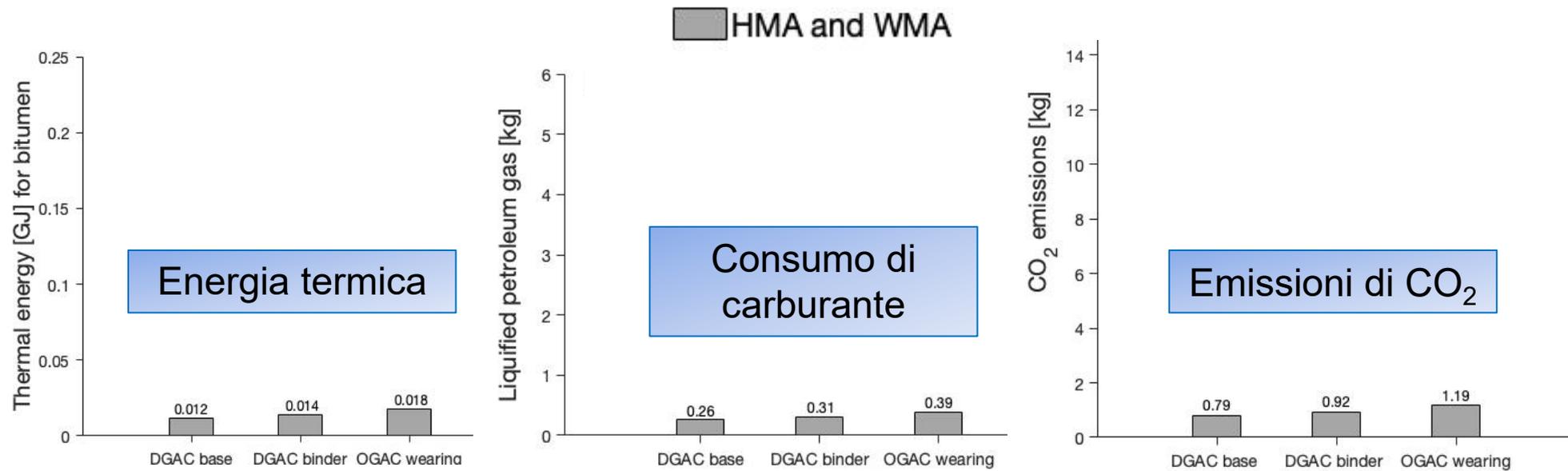


Emissioni di CO<sub>2</sub>

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

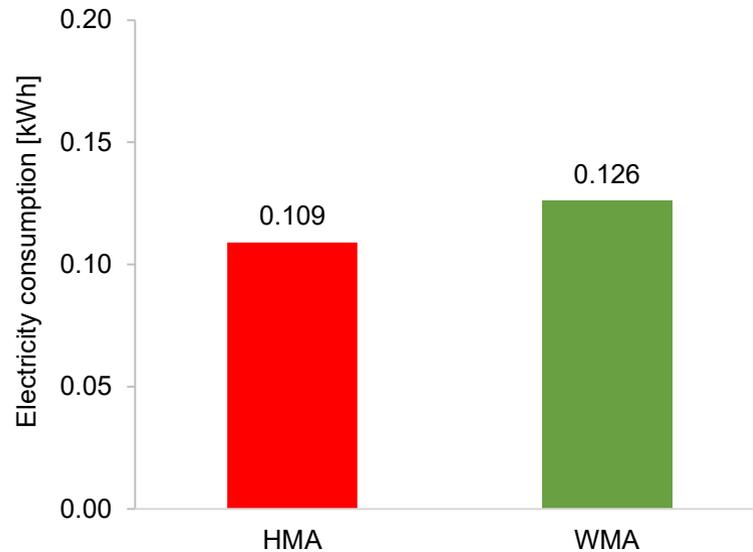
## Riscaldamento bitume (T = 170 °C)

Non influente sul confronto WMA e HMA

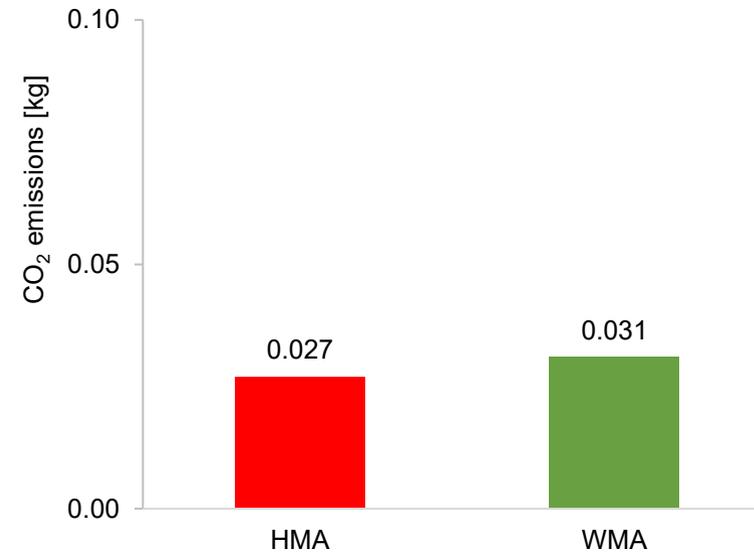


# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

## Miscelazione



Consumo di  
elettricità



Emissioni di CO<sub>2</sub>

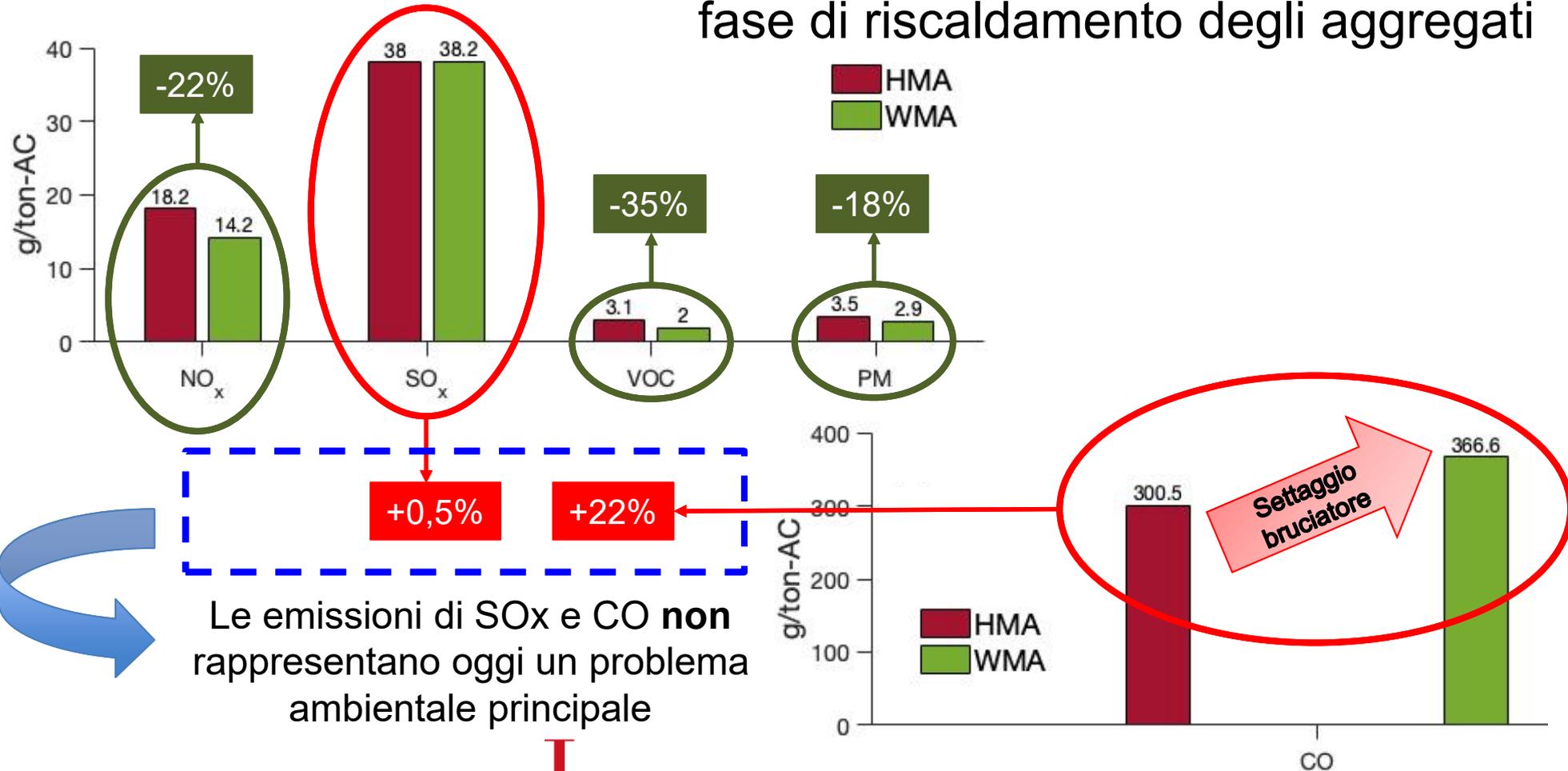
# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

## Emissioni totali di CO<sub>2</sub>

Fase di produzione	Emissioni di CO <sub>2</sub> [kg]								
	DGAC_base			DGAC_binder			OGAC_wearing		
	WMA	HMA	Δ	WMA	HMA	Δ	WMA	HMA	Δ
<b>Riscaldamento aggregati</b>	14.33	16.77	<b>-2.45</b>	14.62	17.22	<b>-2.61</b>	14.34	17.20	<b>-2.86</b>
<b>Riscaldamento bitume</b>	0.79	0.79	—	0.92	0.92	—	1.19	1.19	—
<b>Miscelazione</b>	0.031	0.027	<b>0.004</b>	0.031	0.027	<b>0.004</b>	0.031	0.027	<b>0.004</b>
<b>Total</b>	15.15	17.59	<b>-2.44</b>	15.57	18.17	<b>-2.60</b>	15.56	18.42	<b>-2.86</b>
			<b>-14%</b>			<b>-14%</b>			<b>-16%</b>

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: benefici ambientali

Parametri misurati → Emissioni inquinanti al camino nella fase di riscaldamento degli aggregati



# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: Conclusioni

- 8 anni di sperimentazione in autostrada
- Ottimo comportamento per miscele WMA drenanti con il 15% RAP
- Ottimo comportamento per miscele WMA DG con il 30% RAP
- Notevoli benefici ambientali
- **Dal 2023 estensiva applicazione sulla rete ASPI**
- Sperimentazioni in corso miscele drenanti con il 25% di RAP
- Sperimentazioni in corso miscele DG con il 45% di RAP
- Monitoraggio emissioni presso impianti alimentati a metano
- **Inserimento criteri di accettazione per additivi WMA nelle NTA**

# Conglomerati Bituminosi Tiepidi: Conclusioni

