



**SIIV Summer School
Brescia 6 settembre 2011**

**IL RICICLAGGIO A FREDDO
DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI
Emulsione bituminosa
e bitume schiumato**

**Prof. Ing. Maurizio Bocci
Università Politecnica delle Marche (Ancona)**

Il fresato di conglomerato bituminoso





**In ITALIA la disponibilità
di fresato bituminoso è
di 14.000.000 ton/anno**

IMPIEGHI DEL FRESATO BITUMINOSO

CORPO STRADALE (RILEVATI)



SOTTOFONDI (BONIFICHE)



STRATI DI FONDAZIONE



SOTTOBASI IN MISTO CEMENTATO



CONGLOMERATI BITUMINOSI



IL RICICLAGGIO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO

Tecnica a caldo

in situ

impianto

Tecnica a freddo

in situ

impianto

il riciclaggio del conglomerato bituminoso

TECNICA A CALDO IN SITU



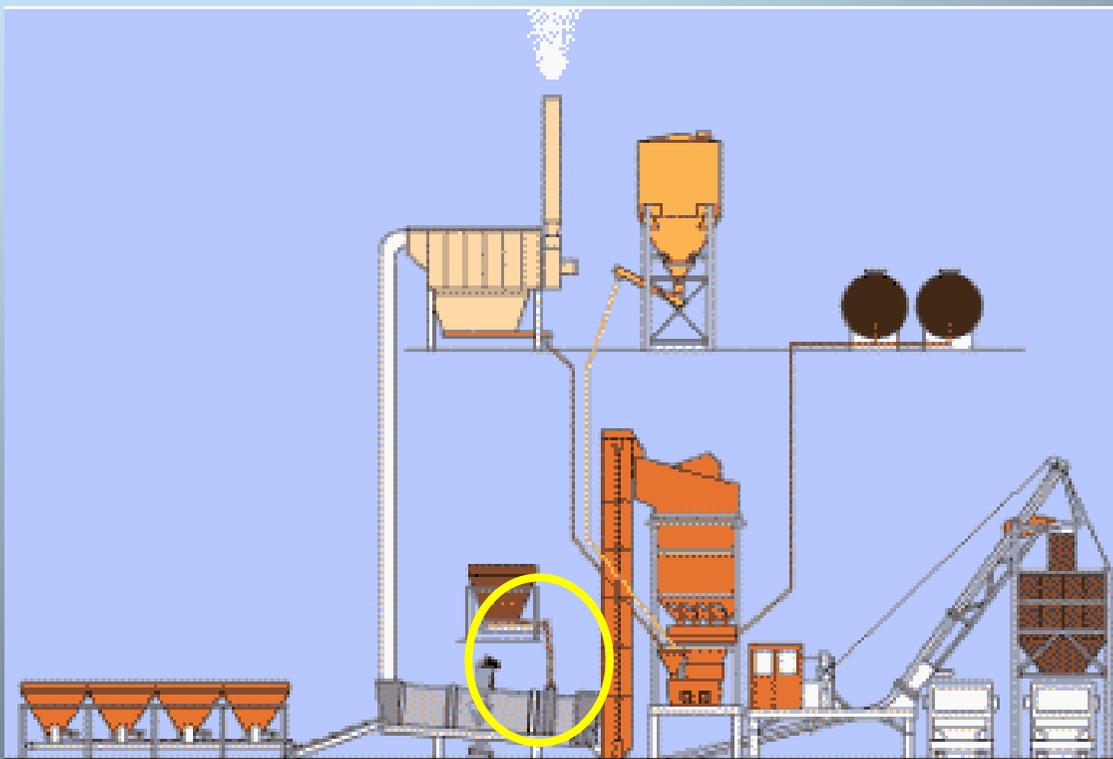
riscaldamento pavimentazione
produzione di fumi e vapori

quantità
80% - 100%



il riciclaggio del conglomerato bituminoso

TECNICA A CALDO IN IMPIANTO

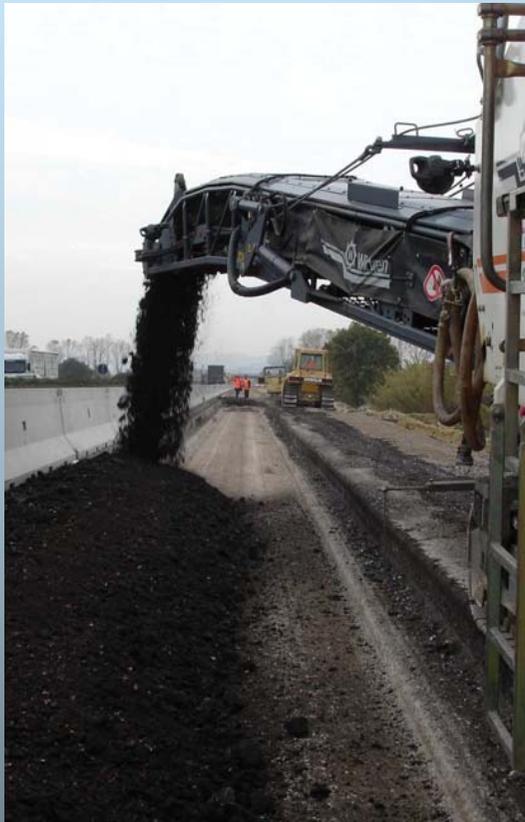


Riscaldamento degli aggregati
Controllo della miscela

quantità
10% - 40%

il riciclaggio del conglomerato bituminoso

TECNICA A FREDDO IN SITU



Aggregati freddi e umidi
Con o senza cemento

quantità
80% - 100%

il riciclaggio del conglomerato bituminoso

TECNICA A FREDDO IN IMPIANTO



quantità
80% - 100%

il riciclaggio del conglomerato bituminoso

TECNICA A FREDDO

Elementi componenti

fresato di conglomerato bituminoso

aggregati “bianchi” di riciclo o naturali

cemento

acqua di aggiunta

legante bituminoso

emulsione di bitume tal quale

emulsione di bitume modificato

bitume schiumato

La prima esperienza



**Campo prove
Pavimental**

Anno: 1990

Le prime applicazioni “rigenerazione dei conglomerati bituminosi”



Emulsioni a lenta rottura
senza uso di cemento

Anno: 1995

Una delle prime applicazioni SS 76 Val d'Esino (AN)



Emulsione bituminosa 3,5 – 3,8%
Senza cemento
Aggregati di integrazione 15 – 20%

Il treno di riciclaggio



EVOLUZIONE TECNICA

Emulsioni con lattice di gomma (sovrastabilizzate)

Emulsioni di bitume modificato (sovrastabilizzate)

Bitume schiumato

Emulsioni di bitume tal quale (sovrastabilizzate)

Nuove macchine per la produzione delle miscele

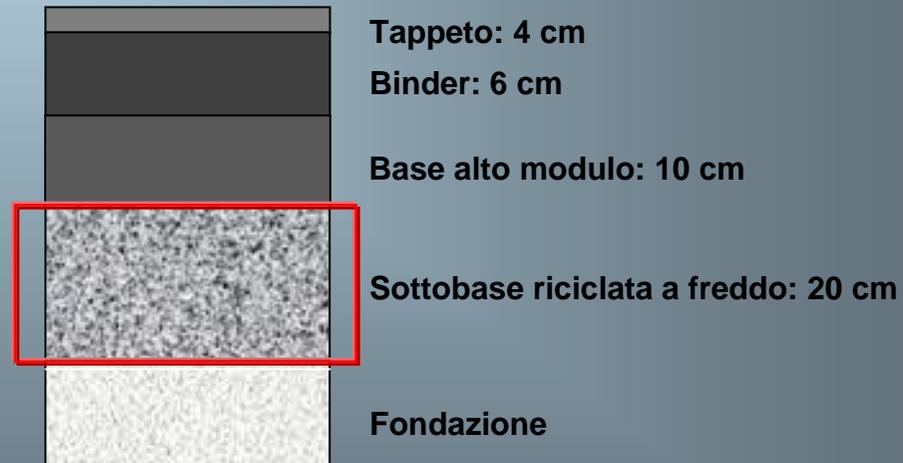
Le riciclatrici



Anno 1998 - Autostrada Torino-Milano



Riciclaggio in impianto fisso
Quantità di fresato 100%
Emulsione con lattice 3.5%
Cemento 1.5%



Anno 2004 - ANAS Perugia - SS 75 Centrale Umbra



Riciclaggio in sito
Quantità di fresato 100%
Emulsione di bitume modificato 3.5%
Cemento 2.0%



Tappeto (SMA): 3 cm
Binder alto modulo: 6 cm

Base riciclata a freddo: 15 cm

Fondazione

2004 - 2009 ANAS Firenze

SGC E 45
SGC Grosseto Fano
Raccordo Siena FI



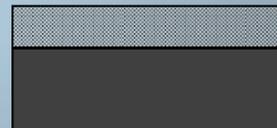
Firenze – Pisa – Livorno



Riciclaggio in sito
Quantità di fresato 80 - 100%
Emulsione di bitume modificato 3.5%
Cemento 2.0%

Anno 2002 (?) Base e sottobase riciclate a freddo

autostrade // per l'italia



Tappeto drenante: 4 cm
Binder alto modulo: 7 cm



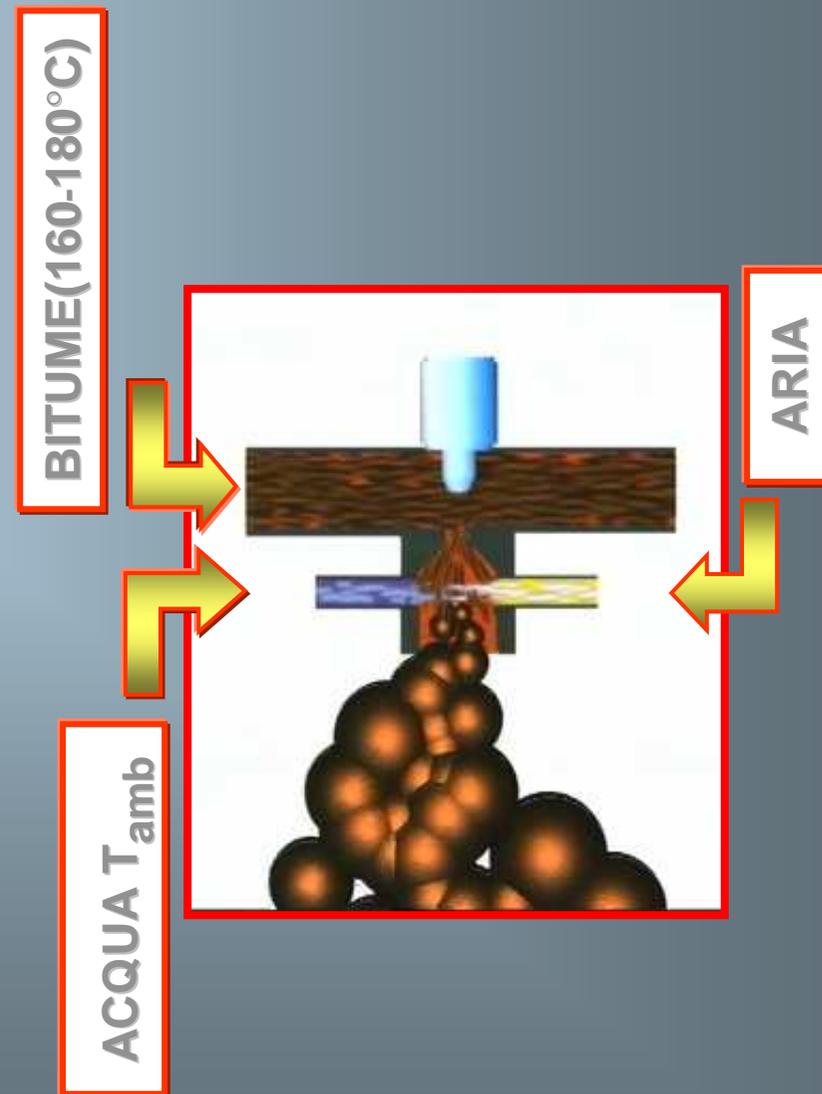
Base riciclata a freddo: 15 cm
con **emulsione** di bitume modificato



Sottobase riciclata a freddo: 25 cm
Con cemento e **bitume schiumato**

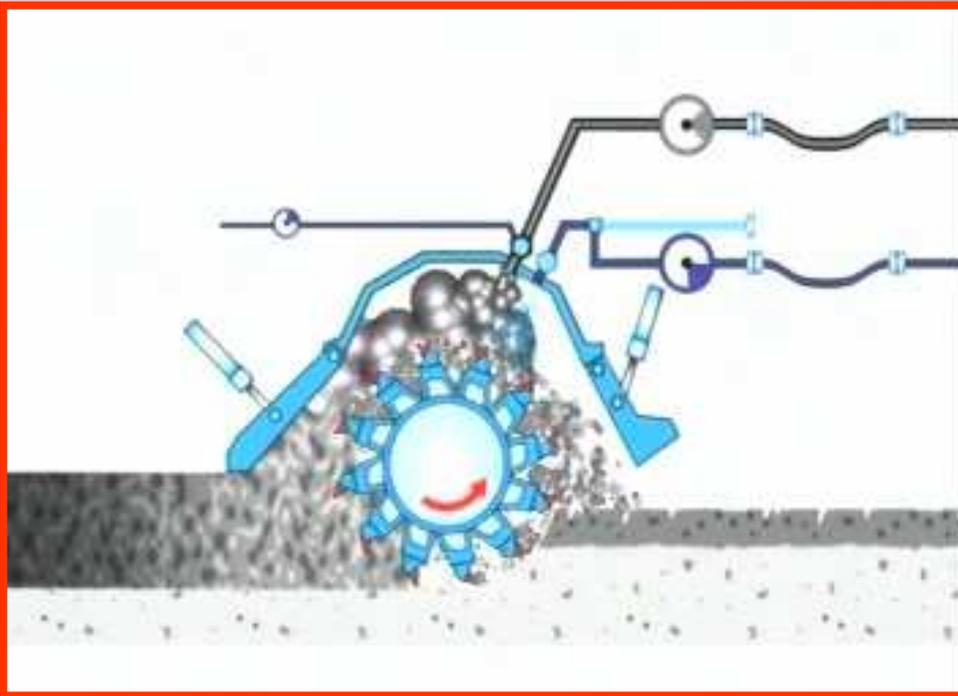
Il bitume schiumato (espanso)

- Trasferimento di calore dal bitume all'acqua ($T_{H_2O} \uparrow$ $T_B \downarrow$)
- $T=100^\circ\text{C}$ – il vapore generato causa un'immediata ed esplosiva espansione
- La bolla, ostacolata dalla tensione superficiale esercitata dal bitume, si espande con pressione sempre minore
- La schiuma si dissolve in meno di un minuto e il legante riacquista le sue proprietà originali





Mediante appositi ugelli, il bitume espanso viene iniettato all'interno della "camera di espansione" per essere successivamente **mescolato con gli aggregati**.



BITUME ESPANSO

ACQUA

rotore di fresatura - miscelazione

In fase di fresatura l'acqua viene spruzzata all'interno della camera di miscelazione e miscelata con il fresato al fine di ottenere il contenuto di umidità "ottimo" per la **compattazione** e per **l'idratazione del cemento**



stabilizzatrice



impianto mobile

Il processo di schiumatura

Rapporto di espansione (ER_m): misura l'espansione

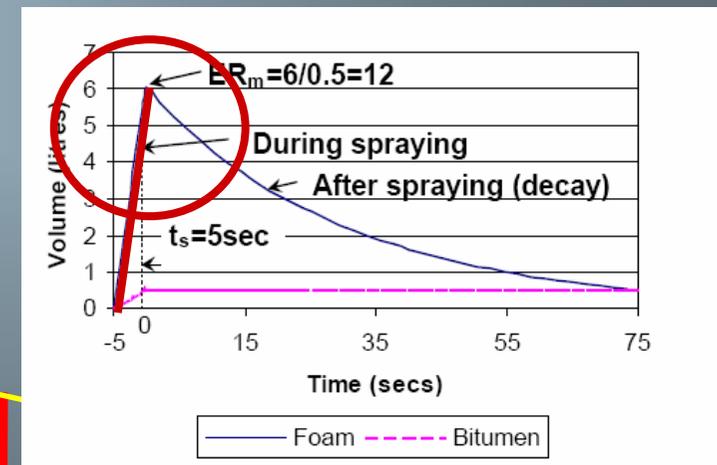
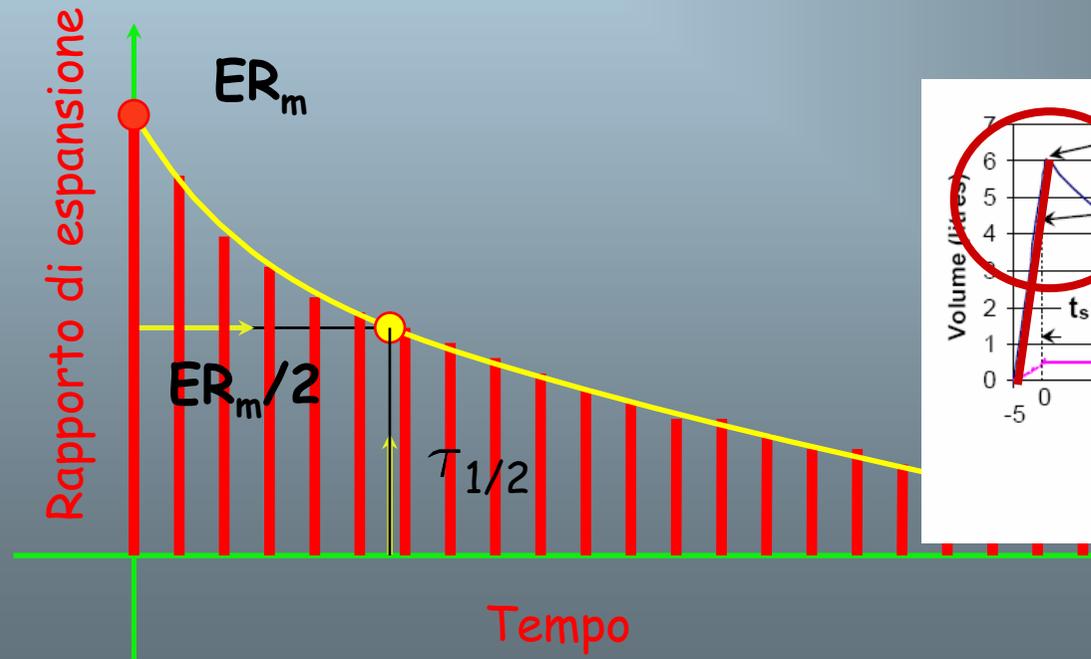
rapporto tra il massimo volume raggiunto allo stato schiumoso e il volume finale del legante, esaurito il processo di schiumatura.

Tempo di semitrasformazione ($\tau_{1/2}$): misura la stabilità

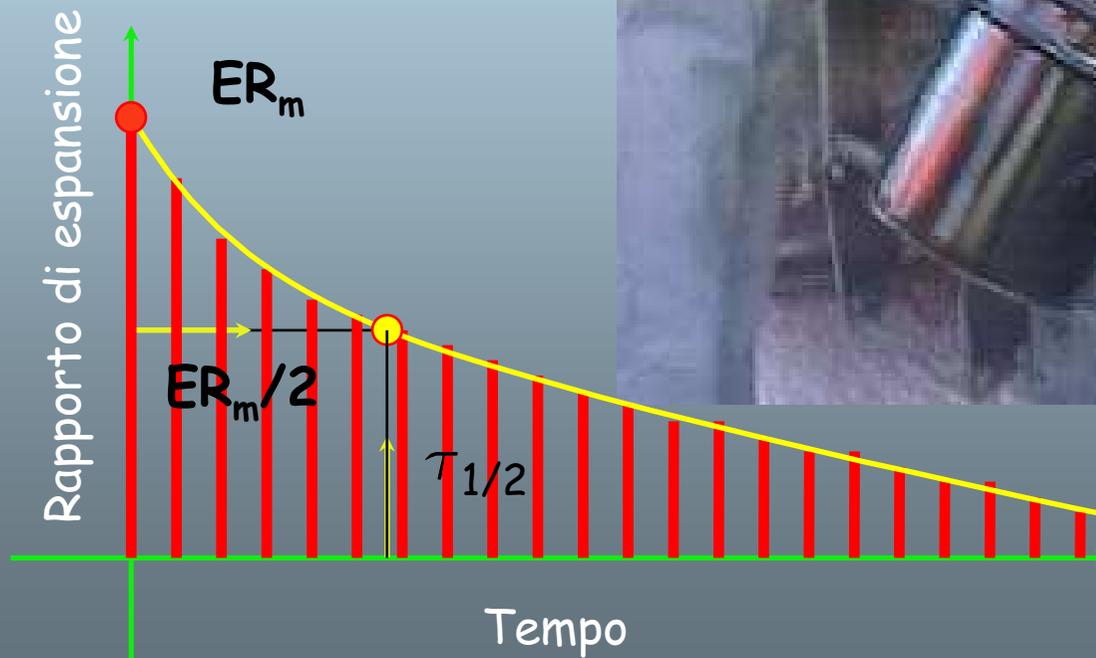
cioè il tempo, espresso in secondi, intercorso tra V_{max} e $V_{max}/2$.

Indice di schiuma (FI): descrive il collasso della schiuma

nel tempo mediante curva di decadimento



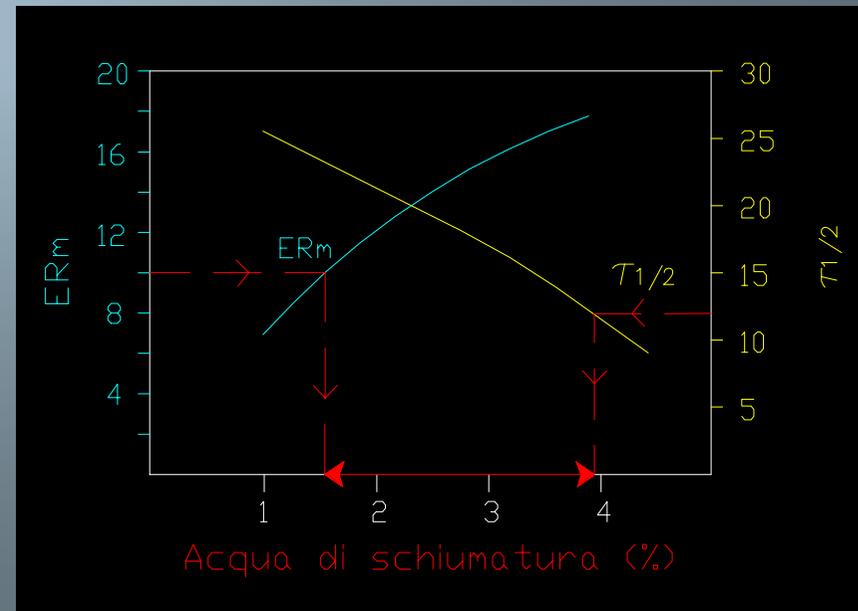
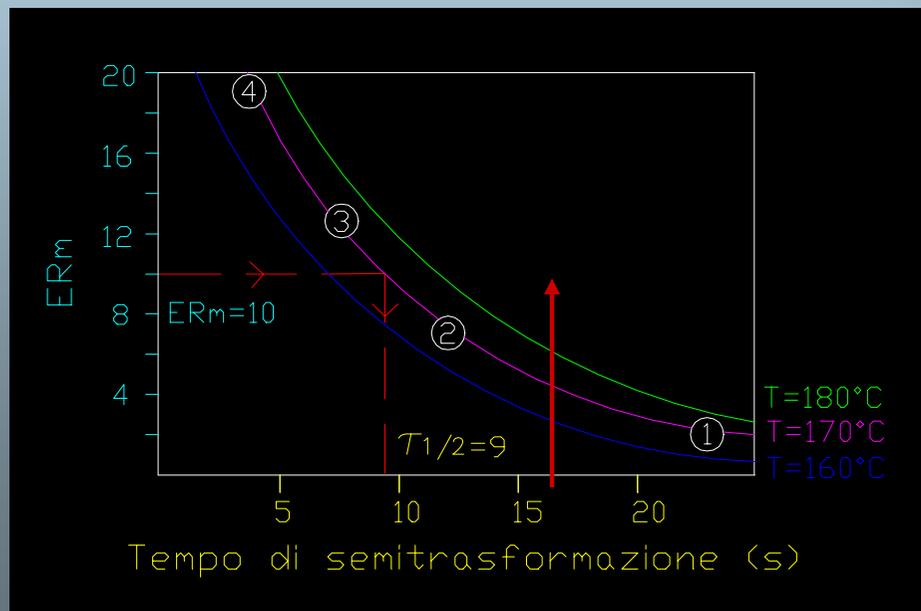
Il processo di schiumatura



Il processo di schiumatura

La schiuma “migliore” è quella che riesce ad ottimizzare sia l’espansione (ER_m) che il tempo di semitrasformazione ($\tau_{1/2}$)

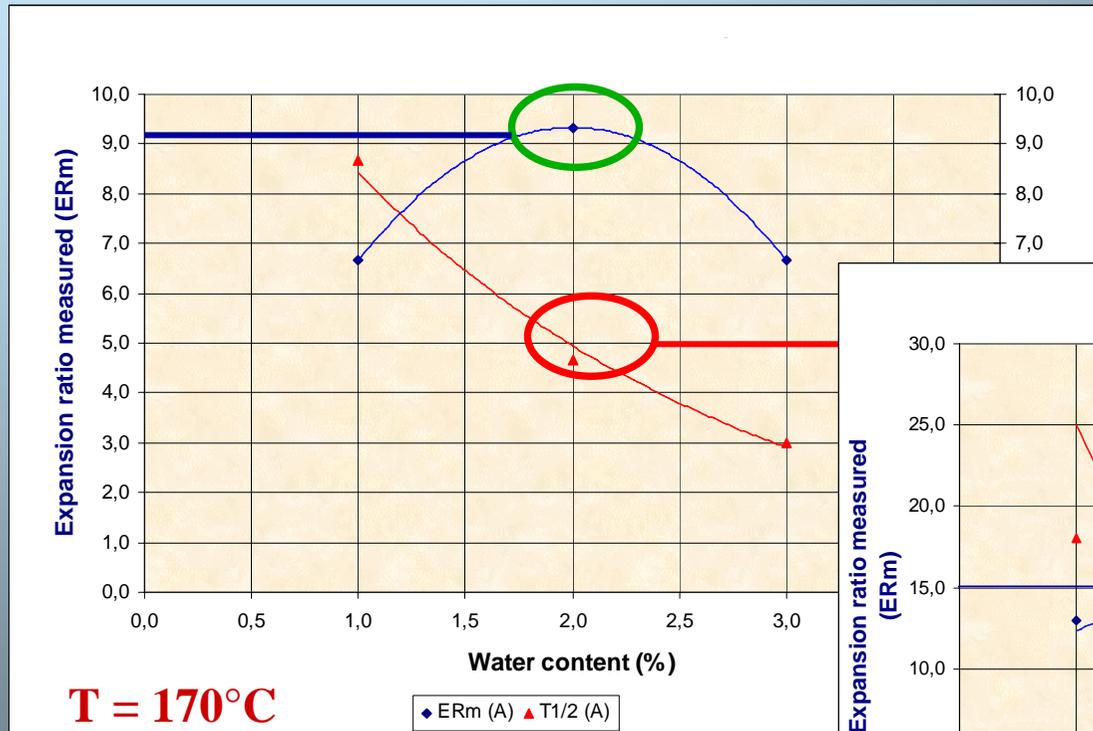
$$ER_m, \tau_{1/2} = f(\text{viscosità}, T_B, \% W)$$



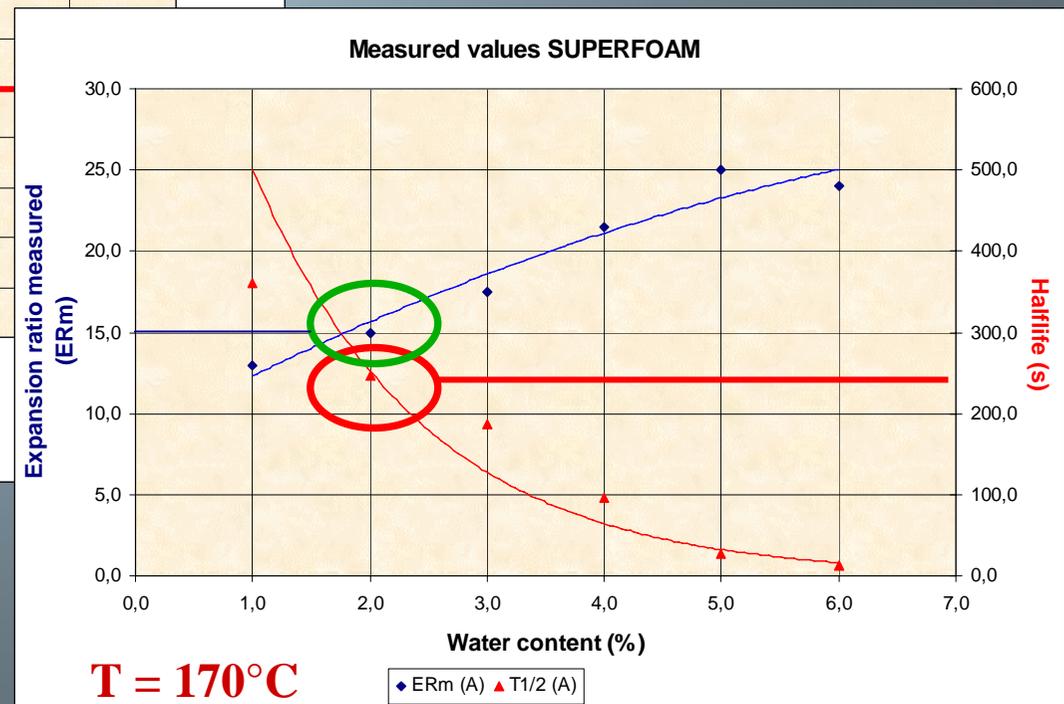
bitumi ad alta schiumosità

Stesse caratteristiche fisiche e meccaniche

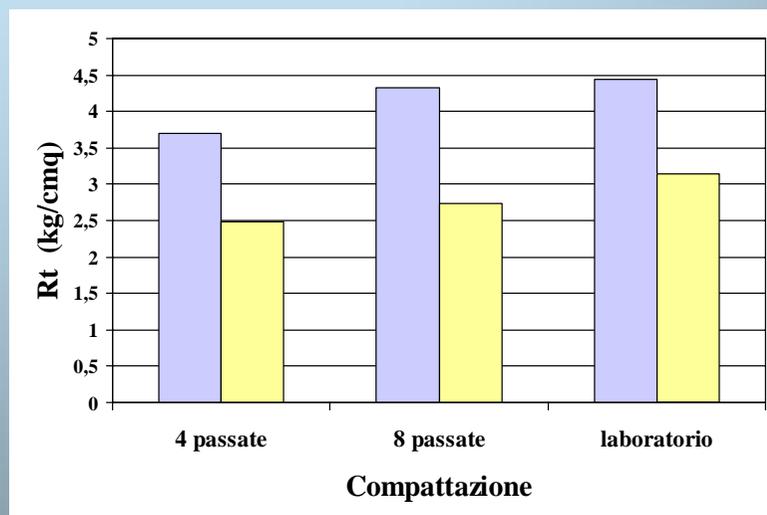
Modifica caratteristiche schiumogene



↑ ERm ↑ $\tau_{1/2}$
T°C e %W



bitumi ad alta schiumosità: effetti sulle miscele



Compattazione \uparrow \rightarrow R_t \uparrow

R_t Superfoam $>$ R_t Tradizionale

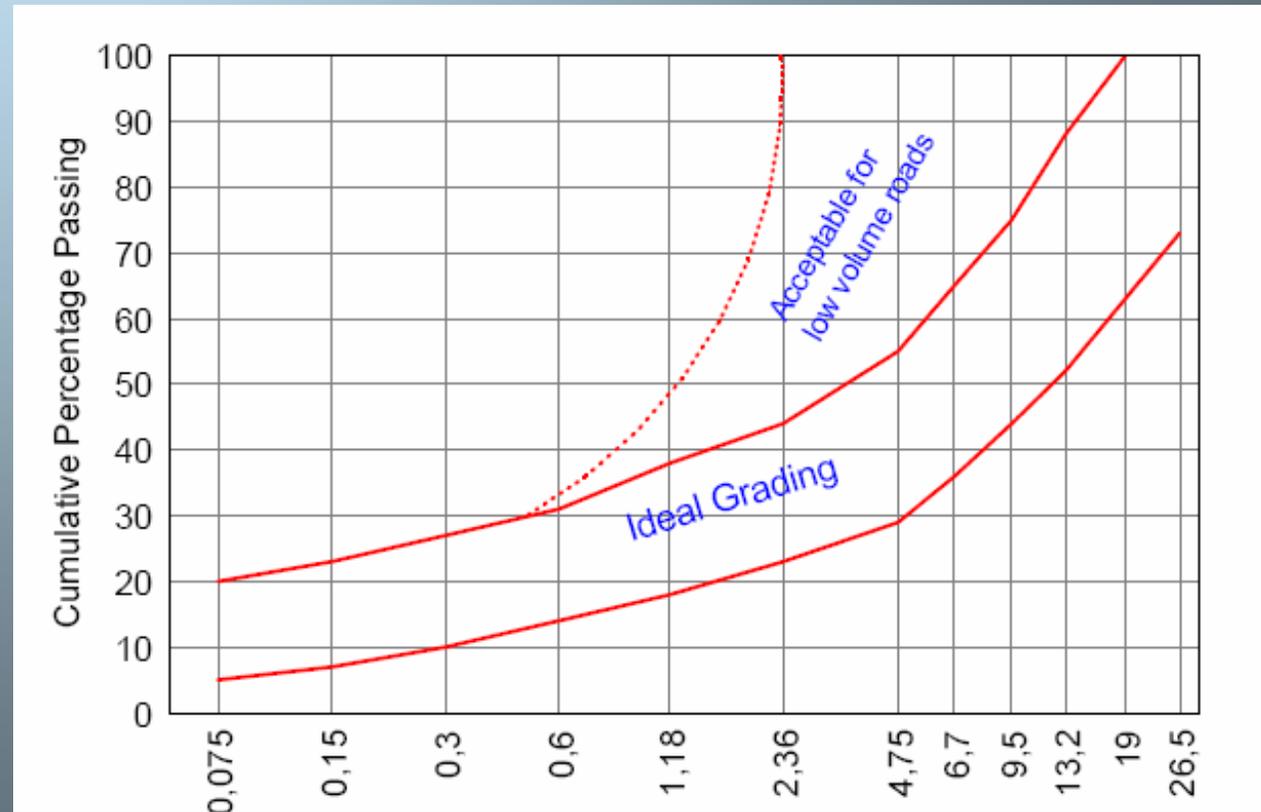
Superfoam

Tradizionale 80/100

Le miscele con bitume espanso

AGGREGATI

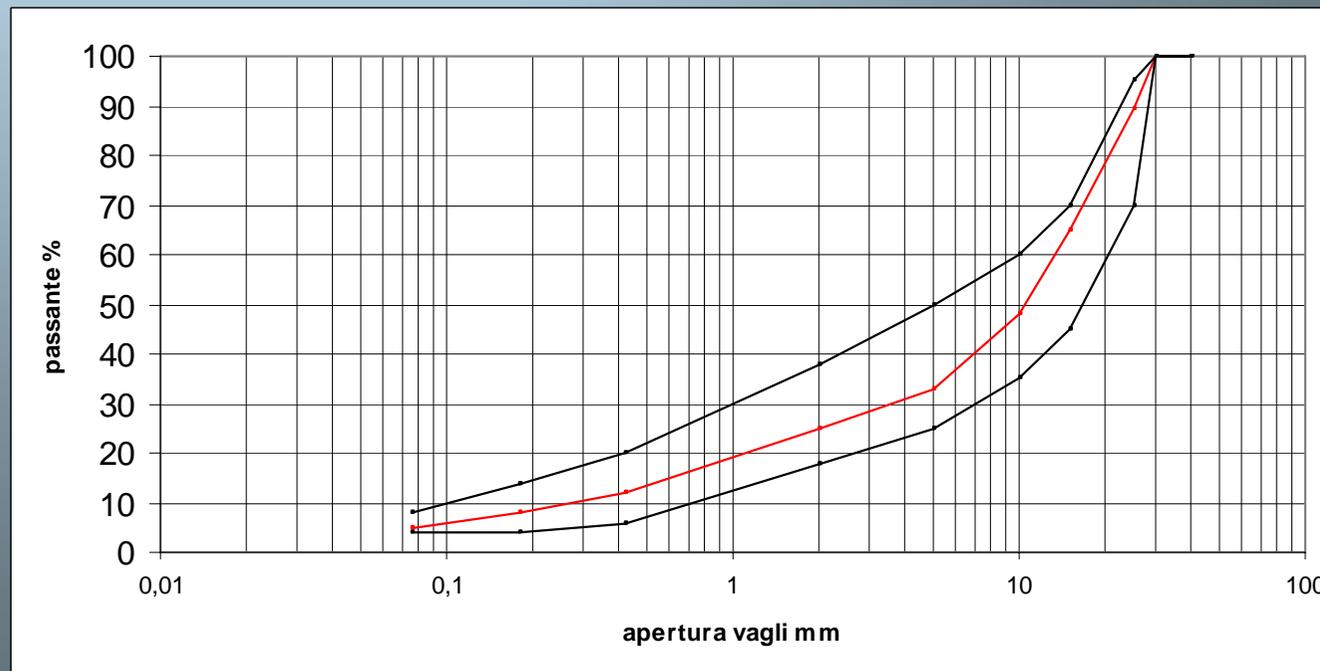
- ✓ grande varietà, **vergini** o **riciclati**, di buona o mediocre qualità ($A_5 - A_7$)
- ✓ freddi e umidi



mix design di bitume espanso

➤ Valutazione accettabilità del materiale candidato al riciclaggio:

- controllo curva granulometrica fuso di capitolato
- aggiunta di eventuali correzioni granulometriche
- assenza di materiale limo - argilloso
- controllo della %W



mix design di bitume espanso

- Valutazione accettabilità del materiale candidato al riciclaggio
- Studio della capacità schiumogena del bitume: **Erm, t 1/2**

mix design di bitume espanso

➤ Valutazione accettabilità del materiale candidato al riciclaggio

➤ Studio della capacità schiumogena del bitume: **Erm, t 1/2**

➤ Dosaggio dei leganti:

% cemento	1,5			2,0			2,5		
% di bitume schiumato	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5
Umidità %	4	5	6	4,5	5,5	6,5	5	6	7
Provini N°	6	6	6	6	6	6	6	6	6

mix design di bitume espanso

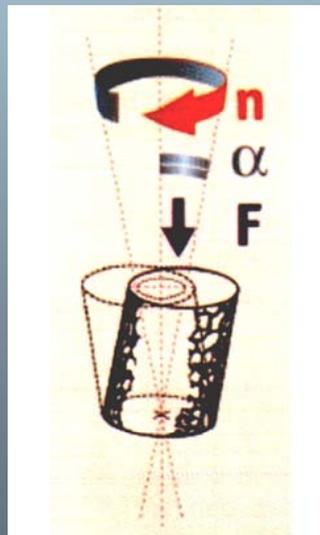
➤ Valutazione accettabilità del materiale candidato al riciclaggio

➤ Studio della capacità schiumogena del bitume: **Erm, t 1/2**

➤ Dosaggio dei leganti:

% cemento	1,5			2,0			2,5		
% di bitume schiumato	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5
Umidità %	4	5	6	4,5	5,5	6,5	5	6	7
Provini N°	6	6	6	6	6	6	6	6	6

➤ Confezionamento di provini con Pressa Giratoria con varie % di W, cem, bit



mix design di bitume espanso

➤ Valutazione accettabilità del materiale candidato al riciclaggio

➤ Studio della capacità schiumogena del bitume: **Erm, t 1/2**

➤ Dosaggio dei leganti:

% cemento	1,5			2,0			2,5		
% di bitume schiumato	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5
Umidità %	4	5	6	4,5	5,5	6,5	5	6	7
Provini N°	6	6	6	6	6	6	6	6	6

➤ Confezionamento di provini con Pressa Giratoria con varie % di W, cem, bit

➤ Valutazione dei parametri meccanici

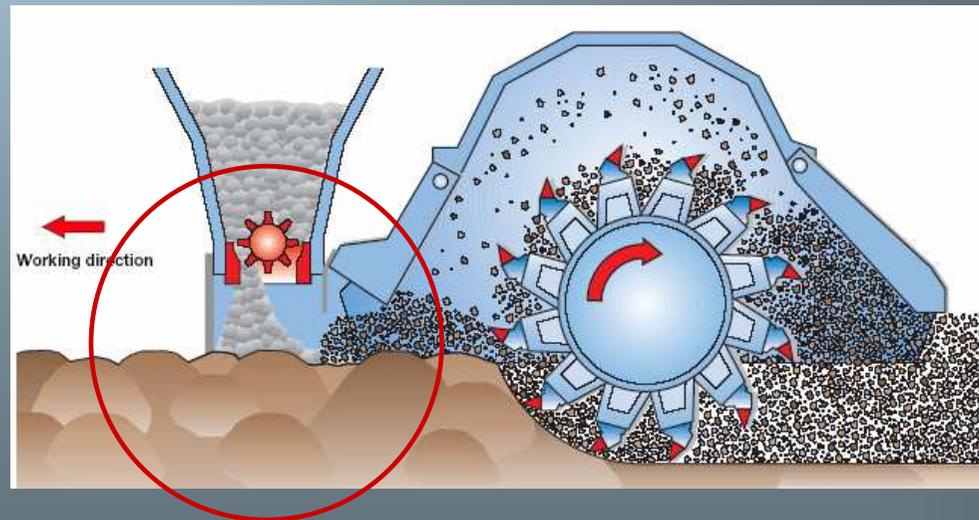
Resistenza a trazione indiretta

Modulo per trazione indiretta (NAT)

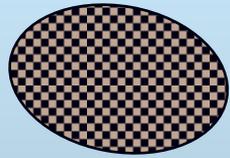
Le miscele con bitume espanso

LEGANTE IDRAULICO

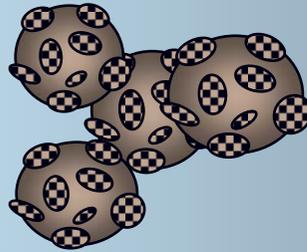
- ✓ cemento, e altri materiali fini, favoriscono la dispersione del bitume
- ✓ quantità di cemento minori del 2% per evitare effetti negativi da fatica
- ✓ il cemento viene introdotto nella miscela:
 - sotto forma di slurry (acqua + cemento)
 - a secco



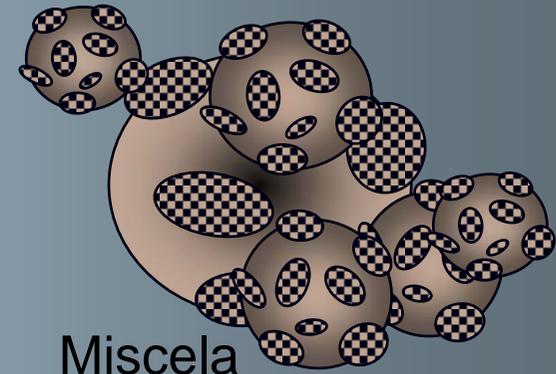
Le miscele con bitume espanso



Mastice



Malta

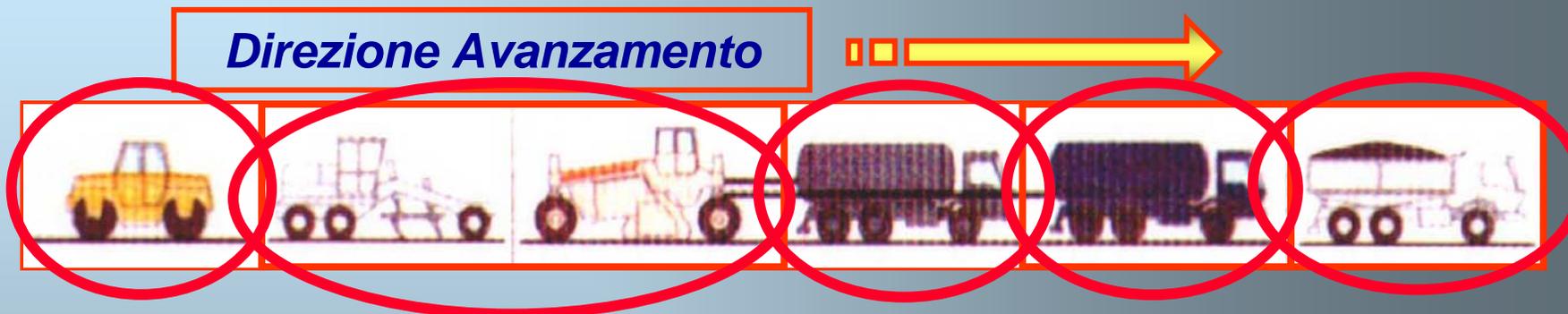


Miscela

Le particelle più grosse dell'aggregato non vengono completamente rivestite



La posa in opera delle miscele con bitume espanso



- ✓ Spandicalce
- ✓ Autocisterna contenente acqua
- ✓ Autocisterna contenente bitume caldo
- ✓ Fresatrice - Riciclatrice
- ✓ Rullo vibrante



Una delle prime ricerche sperimentali

Obiettivo:

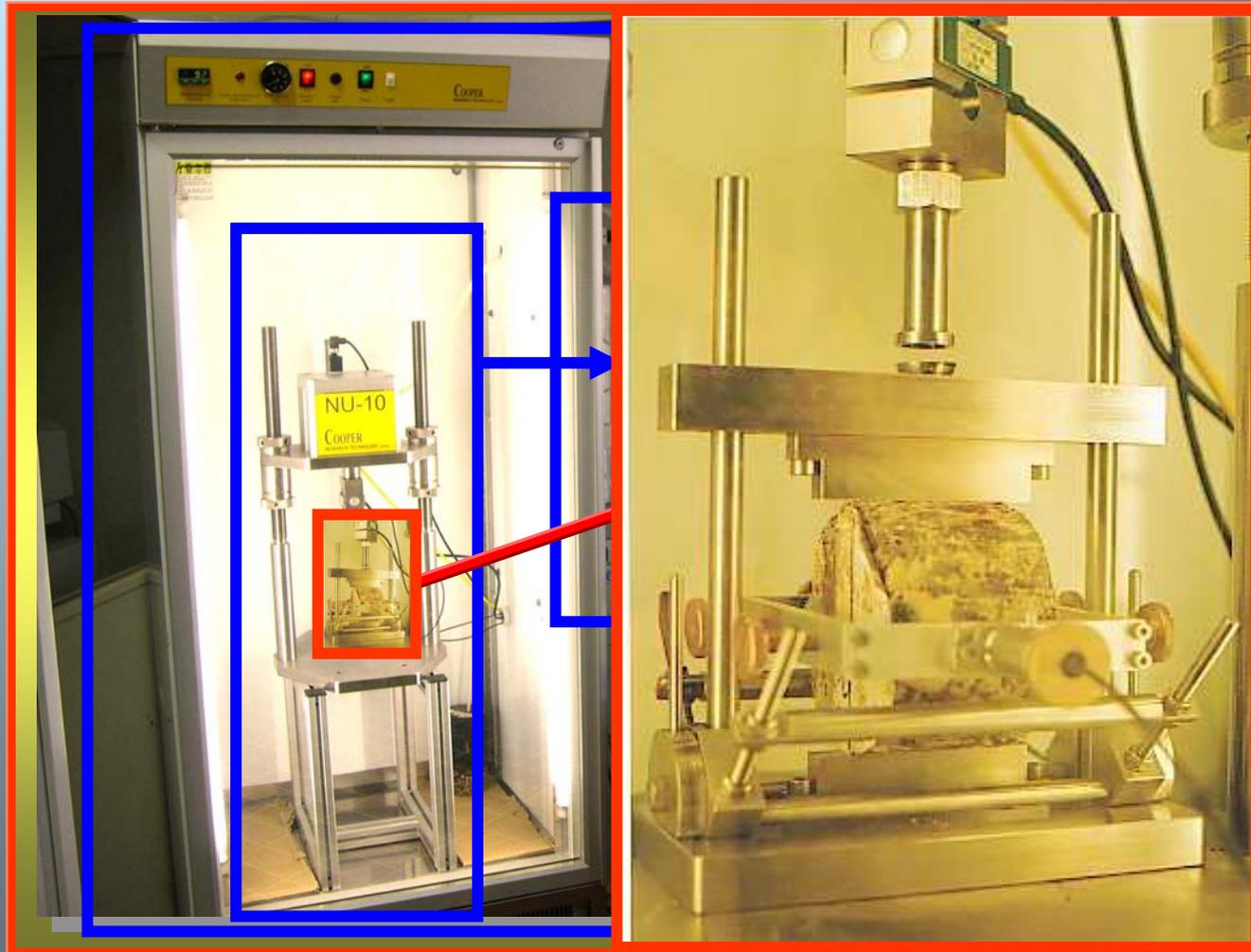
Indagare sulle prestazioni a fatica di miscele di conglomerato riciclato a freddo con ***bitume espanso***

Variabili del sistema:

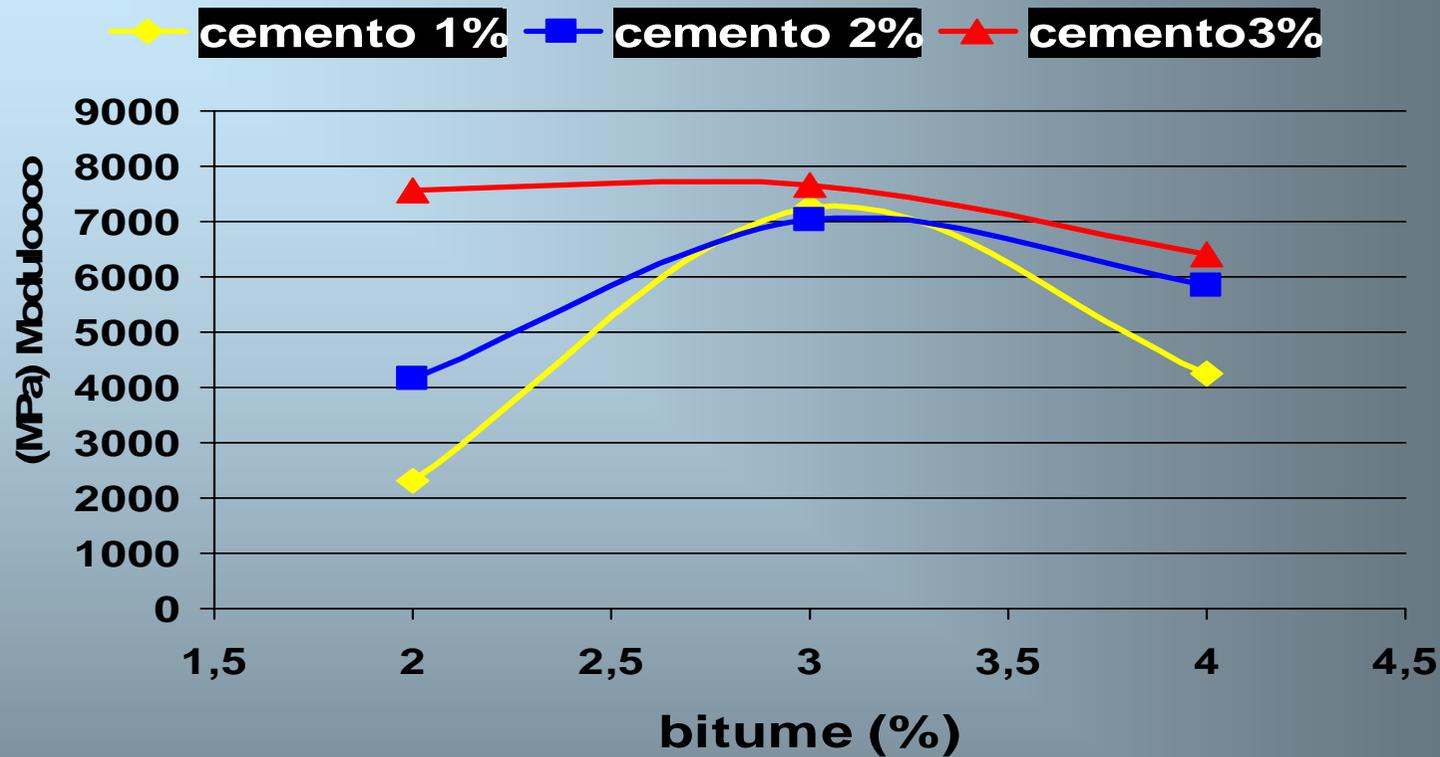
- Contenuto % di **bitume espanso**  2% 3% 4%
- Contenuto % di **cemento**  1% 2% 3%

Programma Sperimentale

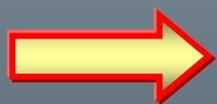
NAT (Nottingham Asphalt Tester)



Analisi dei risultati: i leganti

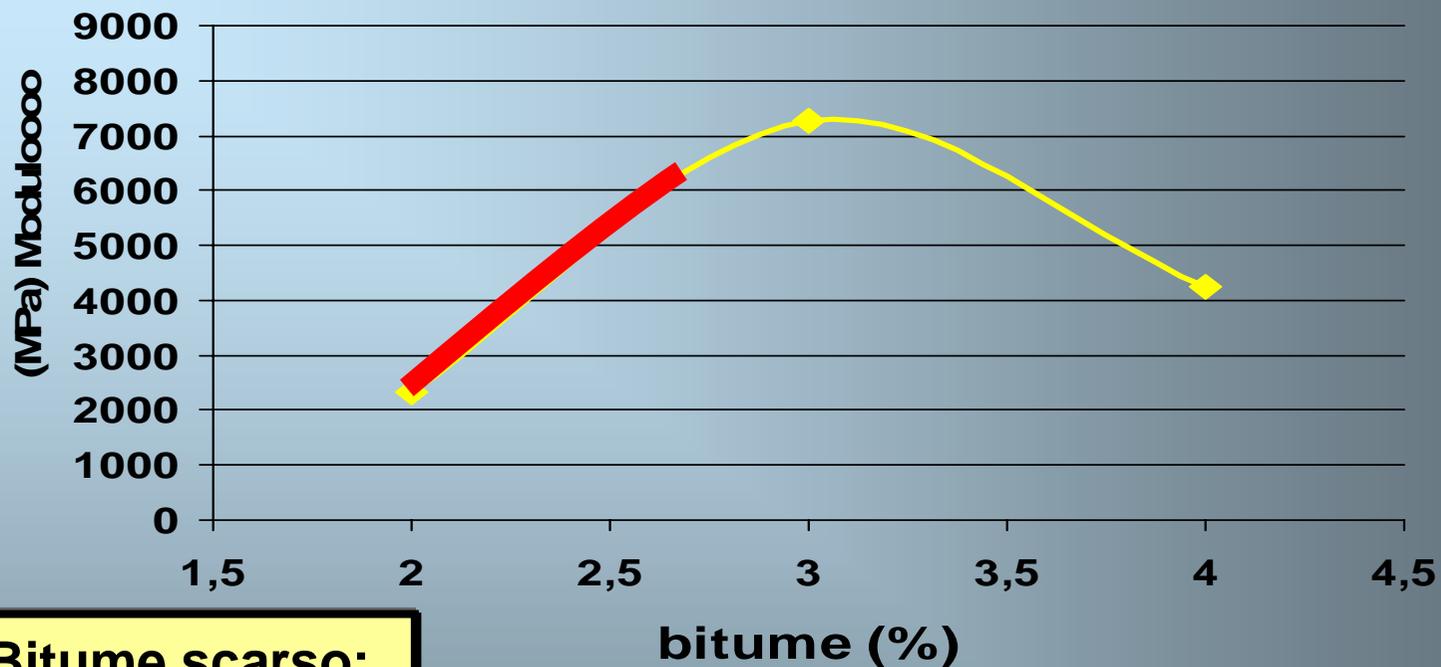


I legami instaurati dal cemento irrigidiscono la miscela.



cemento occorre meno bitume per raggiungere il max

Analisi dei risultati: il bitume

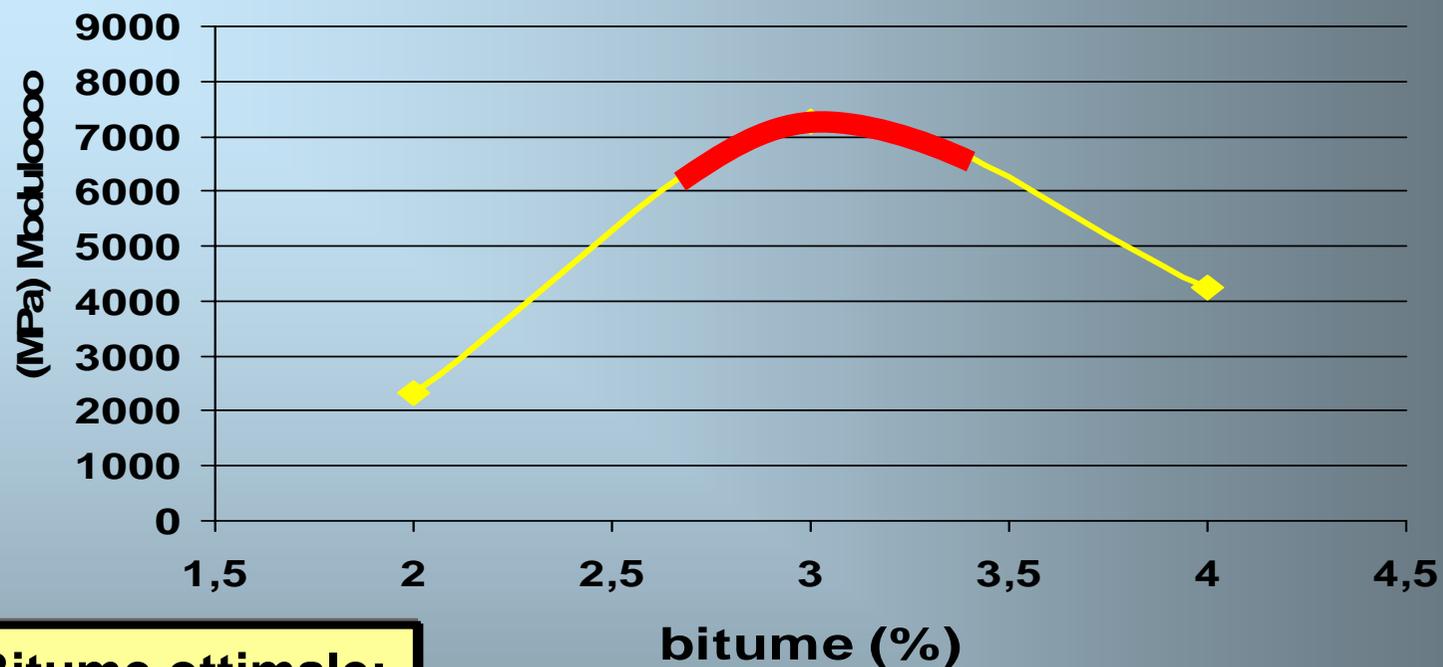


Bitume scarso:

- Ricoprimento aggregati insufficiente
- Pellicola di bitume sottile \Rightarrow La risposta è $f(\text{adesione})$

\uparrow bitume \uparrow ricoprimento \Rightarrow \uparrow modulo

Analisi dei risultati: il bitume

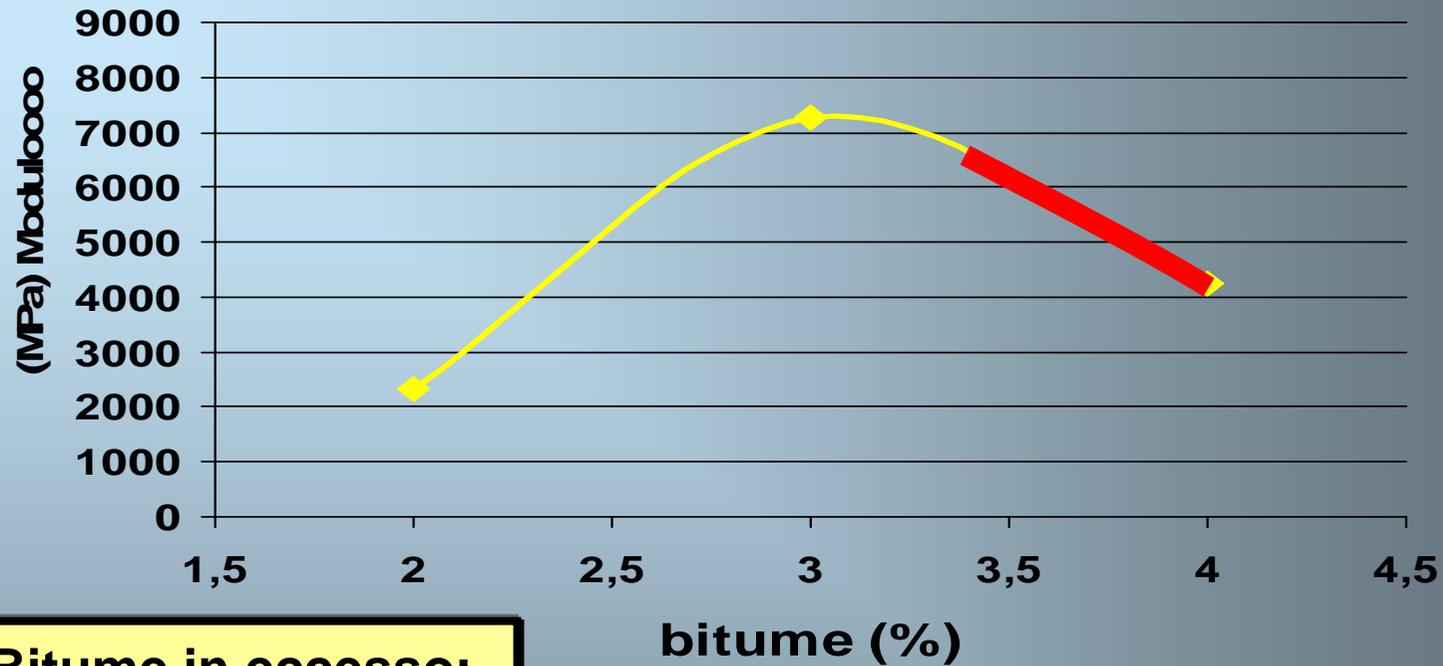


Bitume ottimale:

- Ricoprimento aggregati ottimale
- Pellicola di bitume sottile \Rightarrow La risposta è f (adesione)

\Rightarrow Prestazioni di modulo ottimali

Analisi dei risultati: il bitume

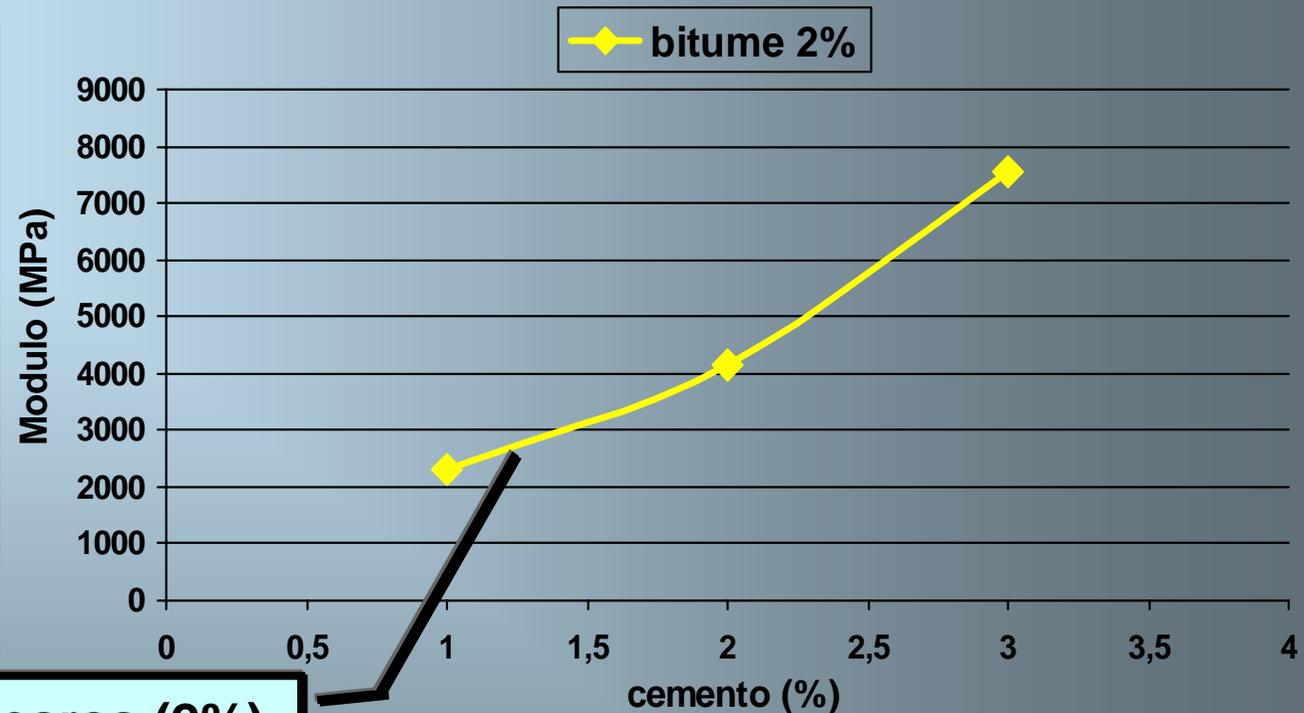


Bitume in eccesso:

- Ricoprimento aggregati totale
- Ispessimento pellicola di bitume \Rightarrow La risposta è f (coesione)
- forze adesive \gg forze coesive

↑ bitume \Rightarrow ↓ modulo

Analisi dei risultati: il cemento

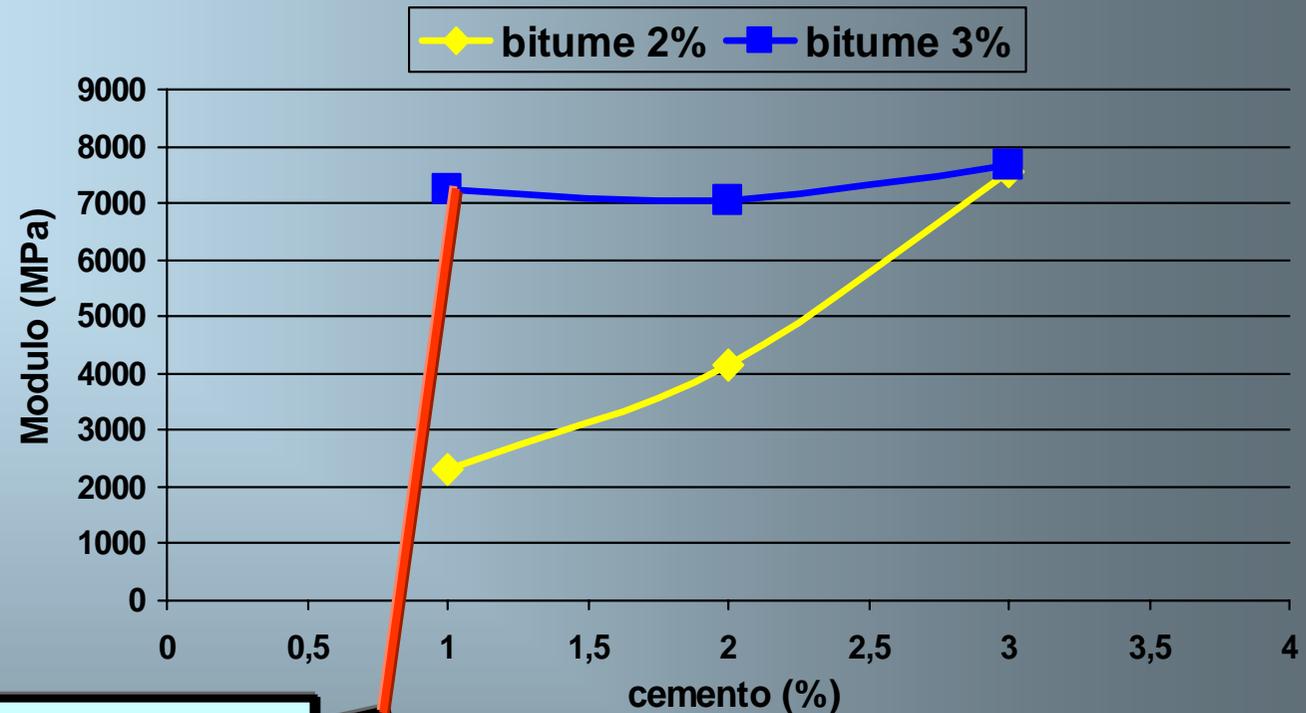


Con bitume in % scarsa (2%)

- Il bitume è insufficiente a ricoprire i granuli (macchie)
⇒ Il cemento può far presa con gli aggregati
- Il cemento instaura legami rigidi

↑ cemento ⇒ ↑ modulo

Analisi dei risultati: il cemento



Con bitume in %ottimale (3%)

Il bitume ricopre i granuli in maniera ottimale

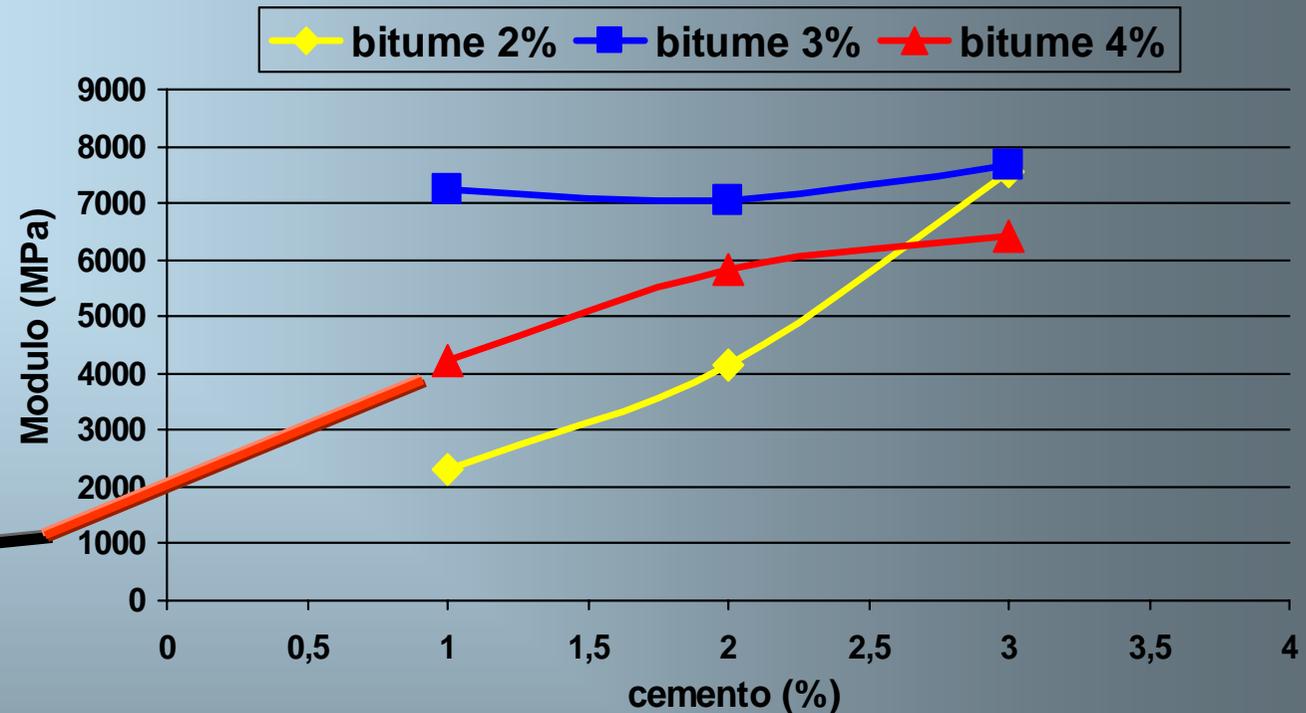
⇒ Il cemento può non agire

La quantità di cemento non influenza il modulo

Analisi dei risultati: il cemento



Con bitume in eccesso (4%)



- Ricoprimento con spessori consistenti di bitume
- La rigidezza è influenzata dalla coesione del mastice (Moduli minori)
- Il cemento non instaura legami propri con gli aggregati
- Il cemento ha funzione di filler

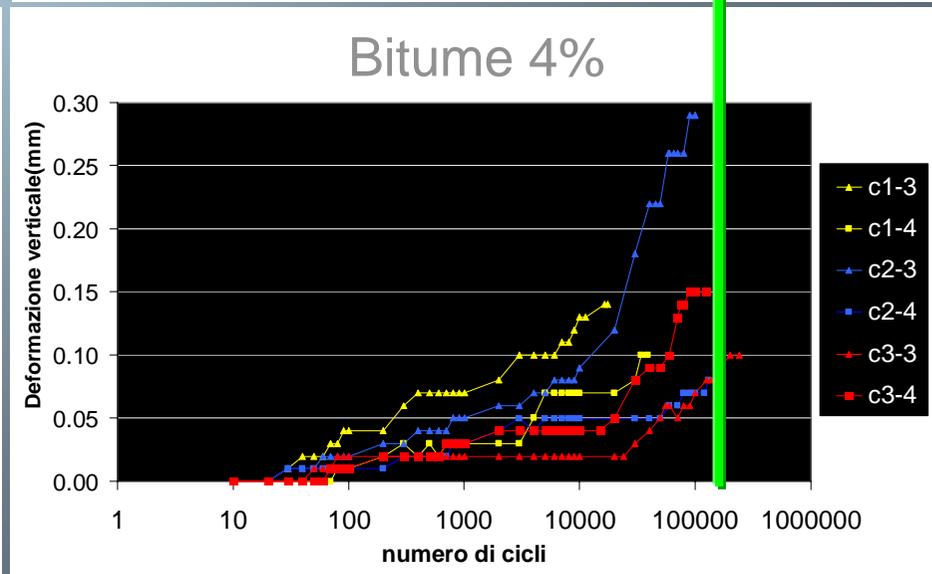
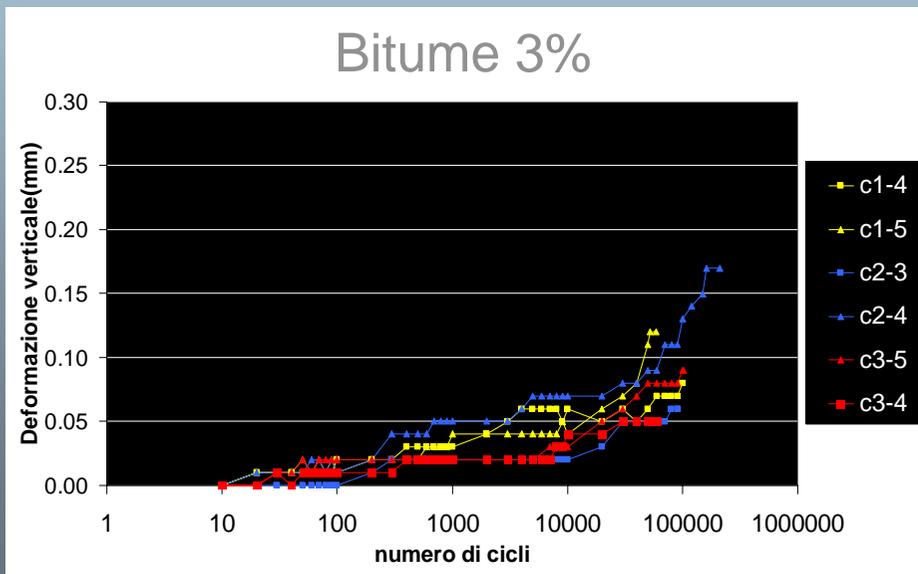
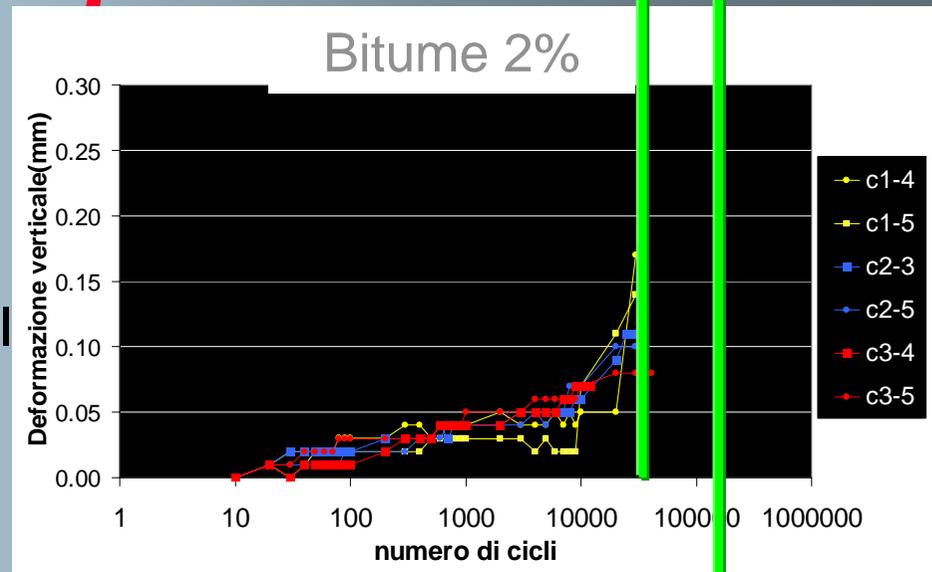
↑ cemento ⇒ ↑ rigidezza mastice ⇒ ↑ rigidezza miscela

Analisi dei risultati prove a fatica

Influenza del bitume schiumato:

In prima analisi si può ipotizzare che:

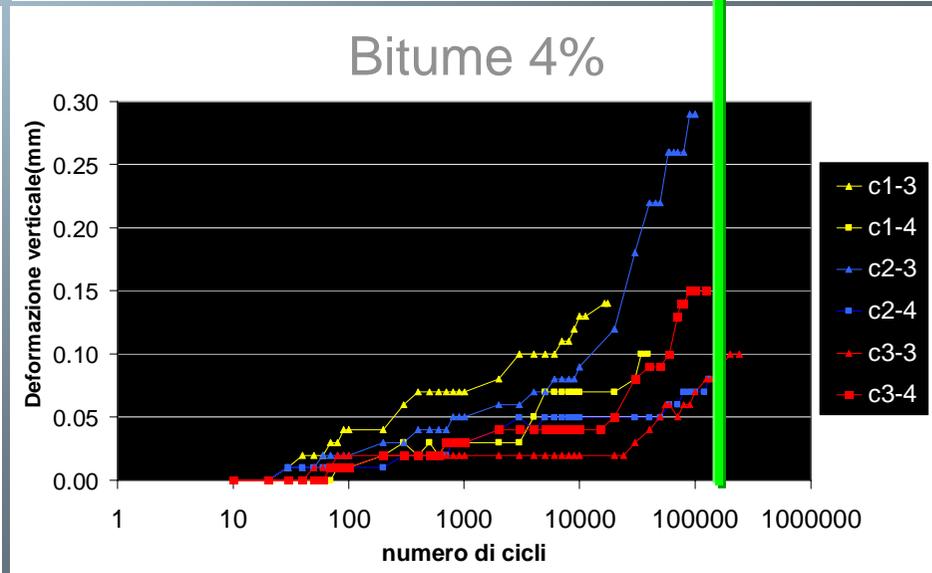
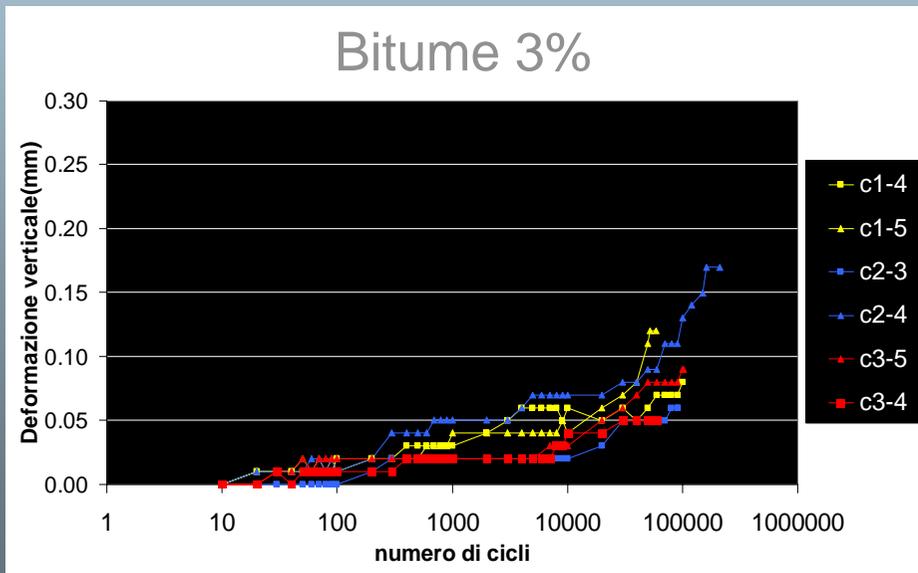
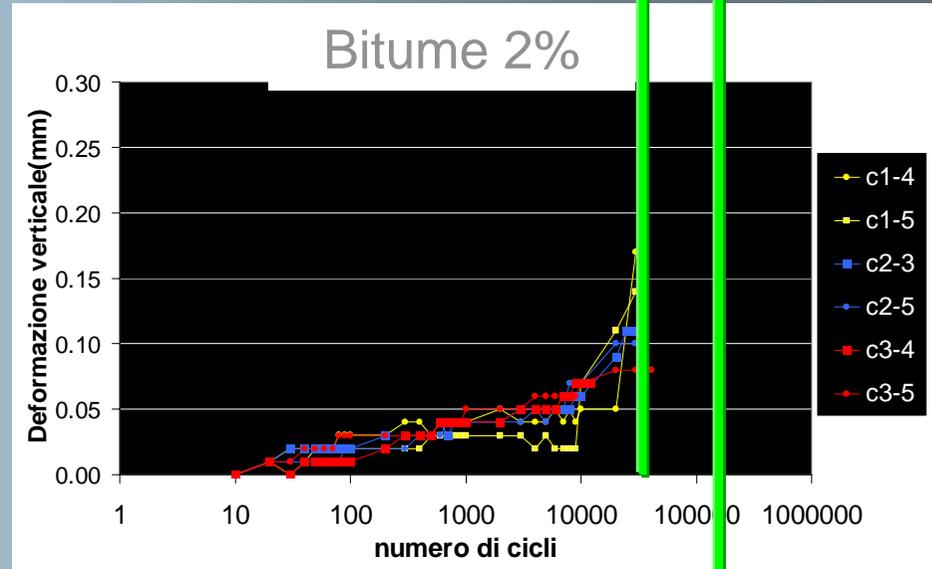
- Il cemento instaura legami RIGIDI ma FRAGILI
- Il bitume meno rigidi ma DUTTILI



Analisi dei risultati:

Influenza del bitume schiumato:

- ↑ bitume ↑ vita a fatica
- ↑ bitume ↑ deformazioni ultime



controlli qualitativi in corso d'opera

➤ Controllo dei parametri di mix design in sito

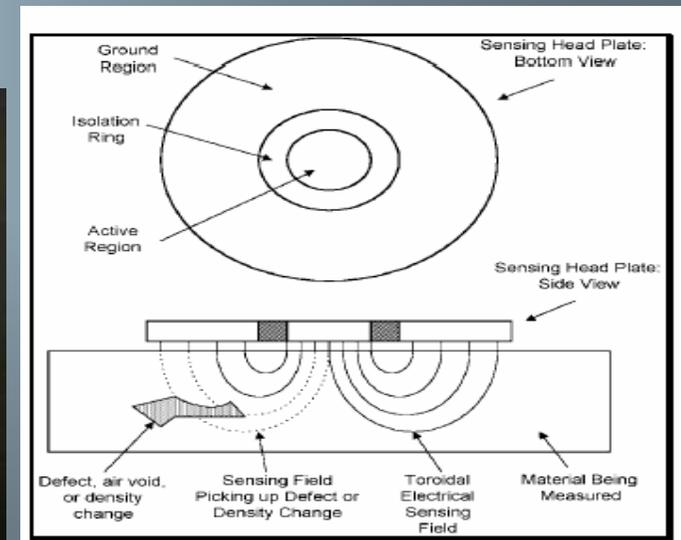
- granulometria in sito
- % bitume
- % cemento
- % umidità del materiale inerte in sito



controlli qualitativi in corso d'opera

- **Controllo dei parametri di mix design in sito**
- **Controllo della compattazione in corso d'opera**
 - densità in sito
 - **Gamma Densimetro Non Nucleare**

Principio della Impedenza Elettrica



controlli qualitativi in corso d'opera

- **Controllo dei parametri di mix design in sito**
- **Controllo della compattazione in corso d'opera**
- **Controllo della portanza in corso d'opera**
 - **misura Evd mediante prova di carico su piastra dinamica**



controlli qualitativi in corso d'opera

- **Controllo dei parametri di mix design in sito**
- **Controllo della compattazione in corso d'opera**
- **Controllo della portanza in corso d'opera**
 - **misura E_{vd} mediante prove di carico su piastra dinamica**
 - **misura E mediante prove FWD**



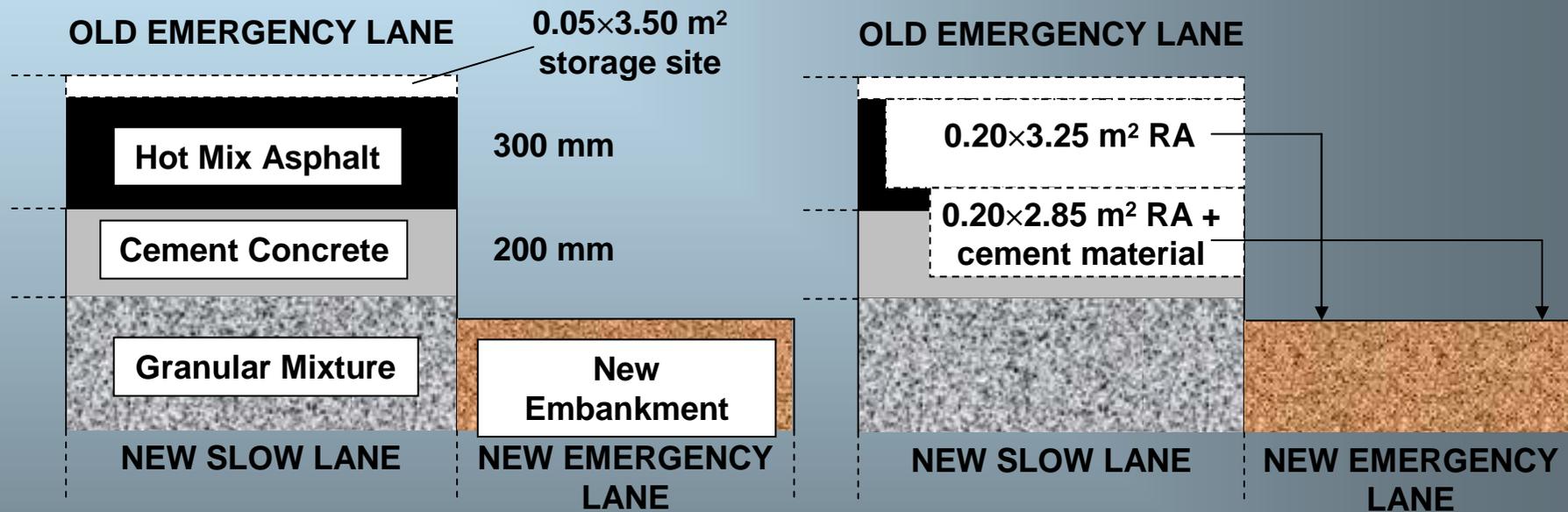


CASO STUDIO

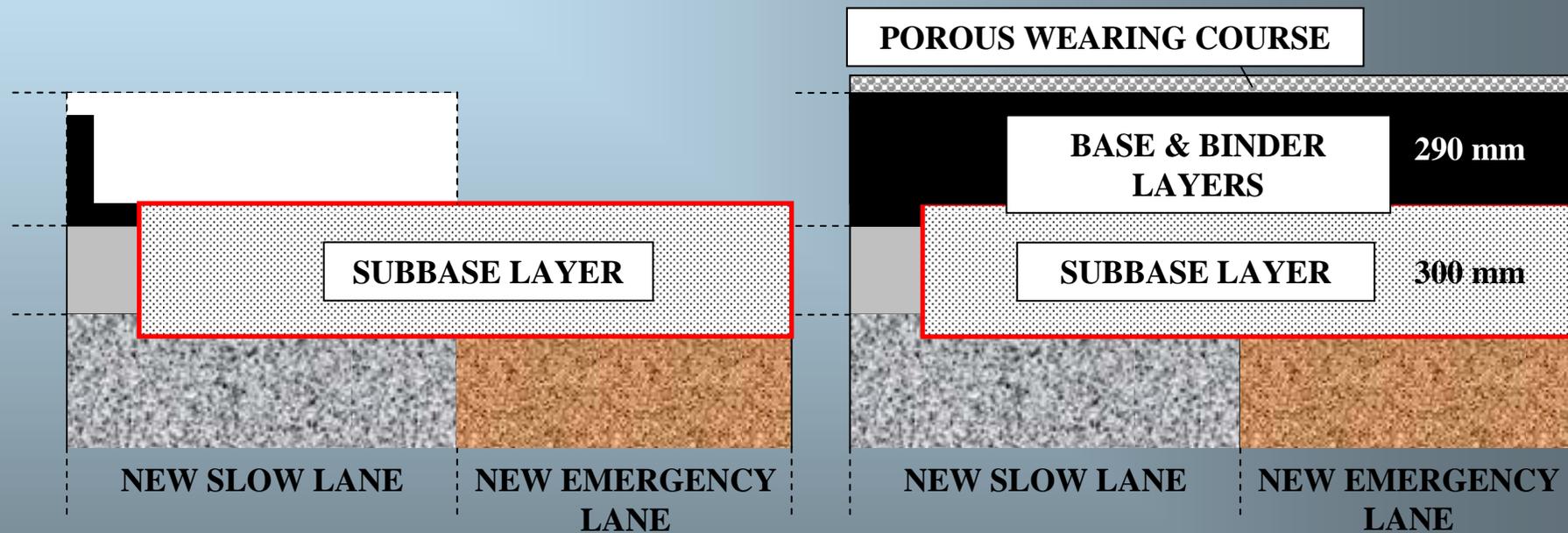
Autostrada A14 - Adriatica Ampliamento alla terza corsia Tratto Ancona Sud – Porto S. Elpidio **ANNO 2008**



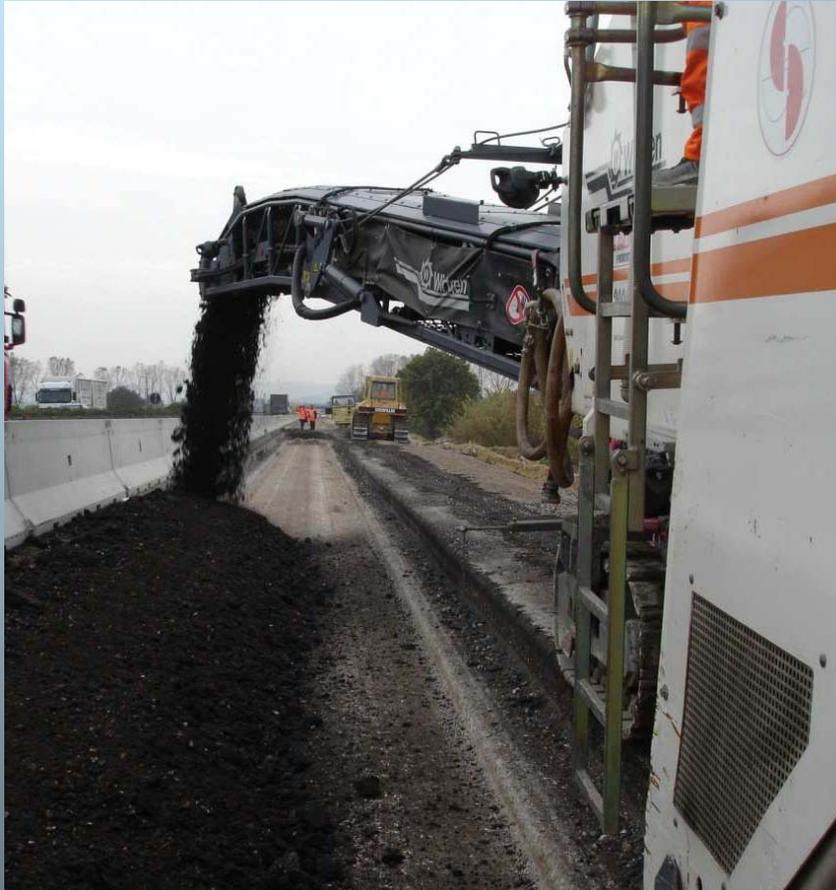
Ampliamento alla terza corsia dell'Autostrada A14 Tratto Ancona Sud – Porto S. Elpidio



Ampliamento alla terza corsia dell'Autostrada A14 Tratto Ancona Sud – Porto S. Elpidio



Fresatura articolata



Miscelazione con i leganti



Livellazione e costipamento



Protezione dello strato



1.2 kg/m² di emulsione bituminosa

Parametri di riferimento

Test in laboratorio

Maturazione: 72 hours @ 40°C

ITSM @ 20°C $\geq 3,000$ MPa

ITS @ 25°C ≥ 0.35 MPa

Test in-situ

$g_{in-situ} \geq g_{lab}$ (80 giri pressa giratoria)

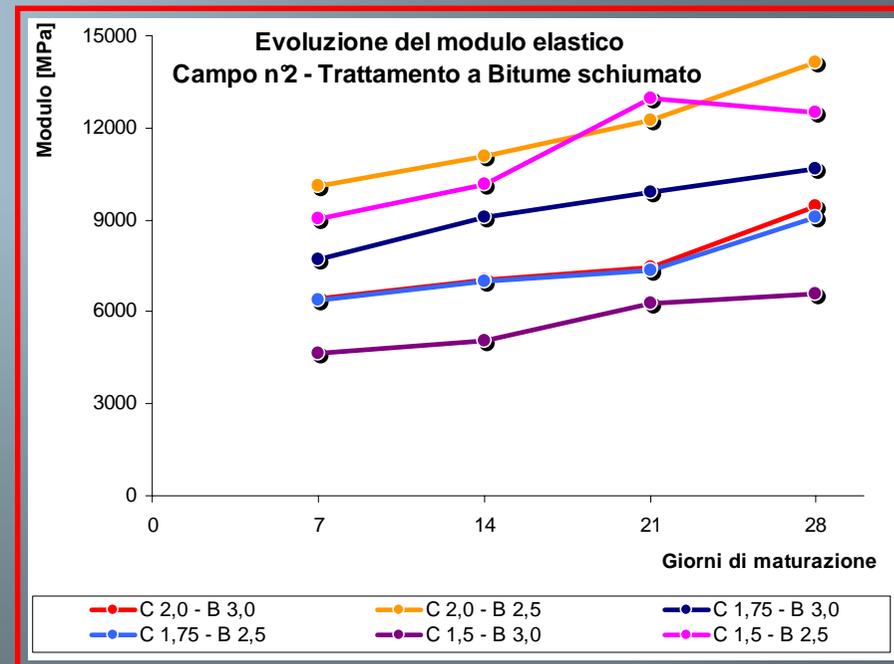
LFWD @ 25°C (dopo rullatura) ≥ 70 MPa

FWD @ 20°C (dopo 90 giorni) $\geq 3,000$ MPa

Campo prove

Prove di modulo elastico per trazione indiretta Miscele con cemento e bitume schiumato

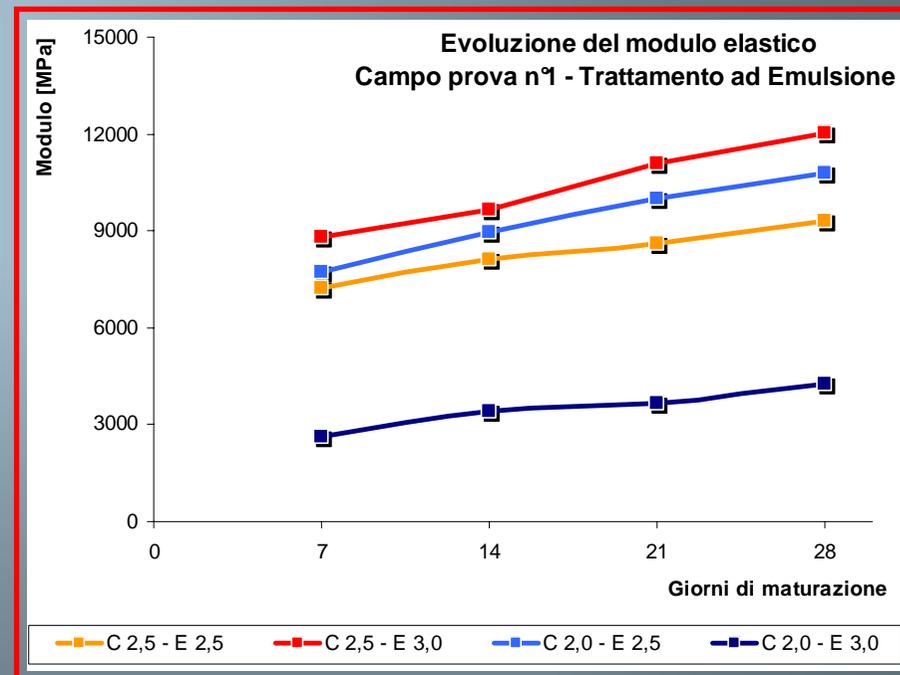
composizione		Stagg.	M_{medio}	Incremento
C [%]	B [%]	[gg]	[MPa]	[%] dopo 7 gg
2,0	3,0	7	6409	-
		14	7042	10
		21	7472	17
		28	9454	48
2,0	2,5	7	10104	-
		14	11073	10
		21	12233	21
		28	14153	40
1,8	3,0	7	7705	-
		14	9087	18
		21	9886	28
		28	10681	39
1,8	2,5	7	6353	-
		14	7004	10
		21	7333	15
		28	9073	43
1,5	3,0	7	4637	-
		14	5055	9
		21	6301	36
		28	6602	42
1,5	2,5	7	9027	-
		14	10137	12
		21	12936	43
		28	12493	38



Campo prove

Prove di modulo elastico per trazione indiretta Miscele con cemento ed emulsione bituminosa

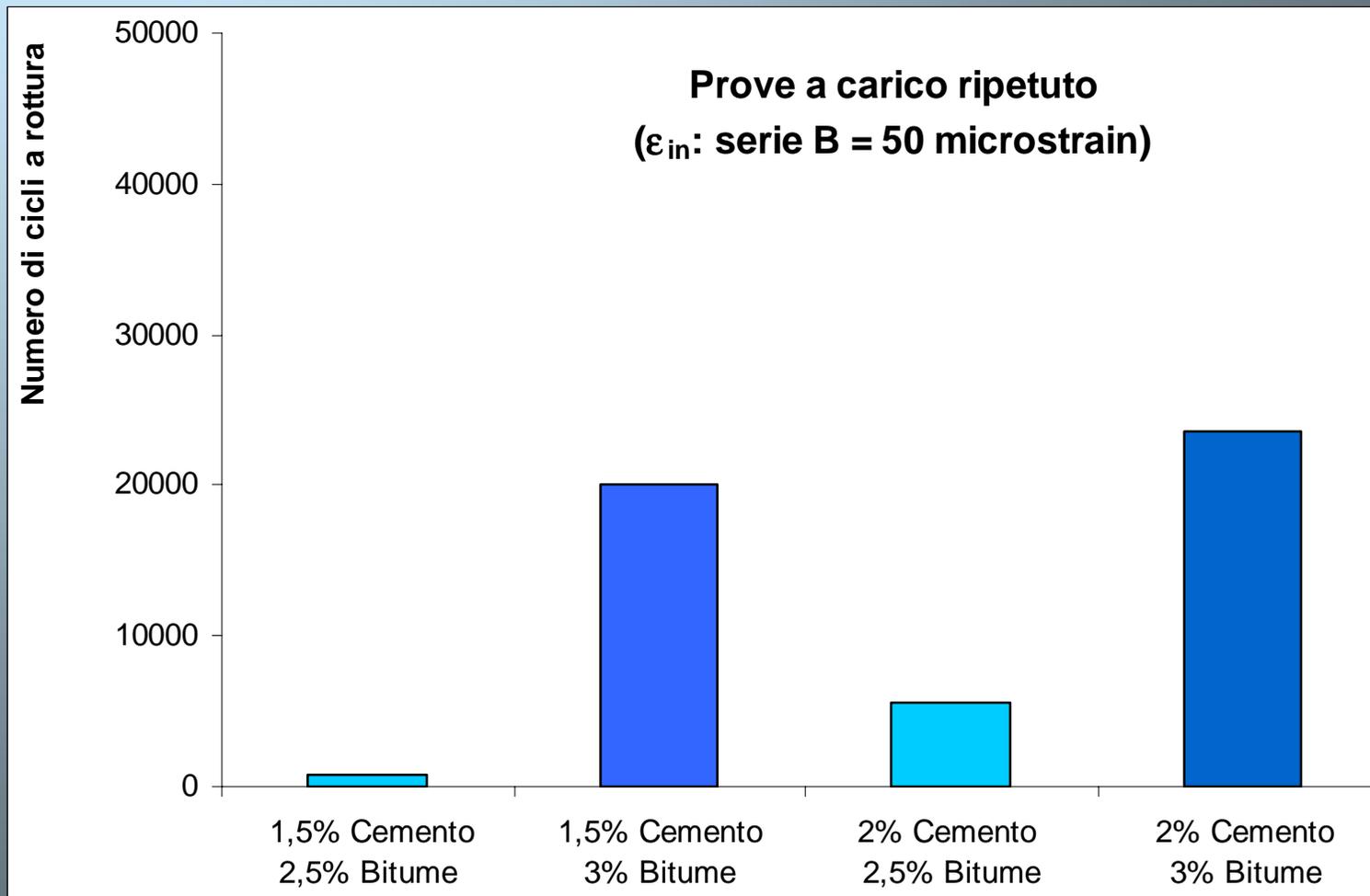
composizione		Stagg.	M _{medio}	Incremento
C [%]	E [%]	[gg]	[MPa]	[%] dopo 7 gg
2,5	2,5	7	7220	-
		14	8116	12
		21	8592	19
		28	9293	29
2,5	3,0	7	8832	-
		14	9670	9
		21	11084	25
		28	12036	36
2,0	3,0	7	2600	-
		14	3429	32
		21	3688	42
		28	4245	63
2,0	2,5	7	7744	-
		14	8971	16
		21	9992	29
		28	10790	39



Emulsione Bituminosa utilizzata

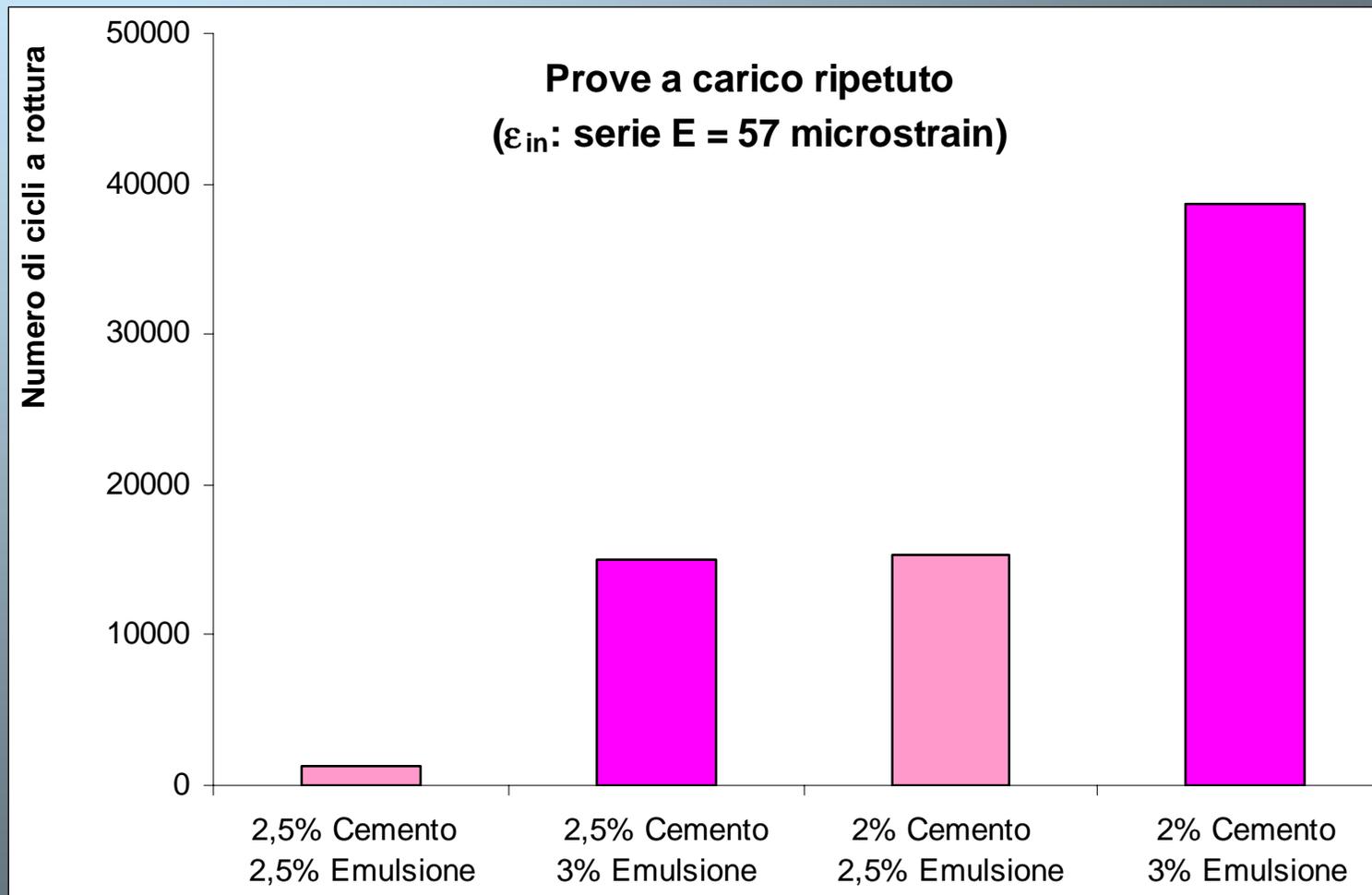
EMULSIONE BITUMINOSA SOVRASTABILIZZATA			
<i>Parametro</i>	<i>Normativa</i>	<i>unità di misura</i>	<i>Valori richiesti</i>
Contenuto di acqua	UNI EN 1428	%	40±2
Contenuto di legante	UNI EN 1431	%	60±2
Omogeneità	UNI EN 1429	%	≤ 0,2
Sedimentazione a 7gg.	UNI EN 12847	%	≤ 10
pH (grado di acidità)	UNI EN 12850		2÷4
Cement mix	UNI EN 12848		<2
Caratteristiche bitume estratto	UNI EN 1431		50 - 100
Penetrazione a 25°C	UNI EN1426	dmm	35 - 56
Punto di rammollimento	UNI EN1427	°C	≥ 45
Punto di rottura (Fraass)	UNI EN112593	°C	≤ -8

Prove di fatica per trazione indiretta bitume schiumato

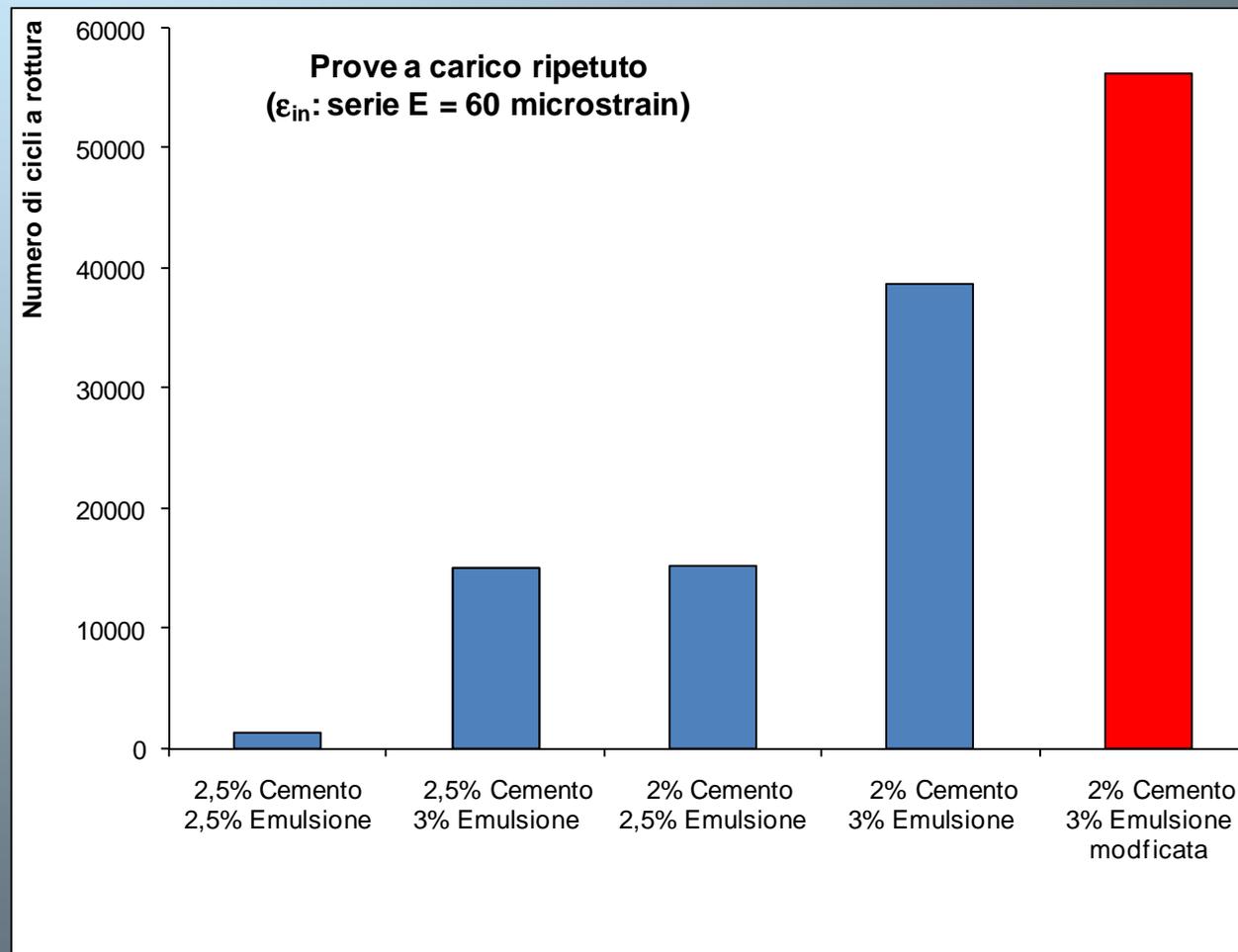


Prove di fatica per trazione indiretta

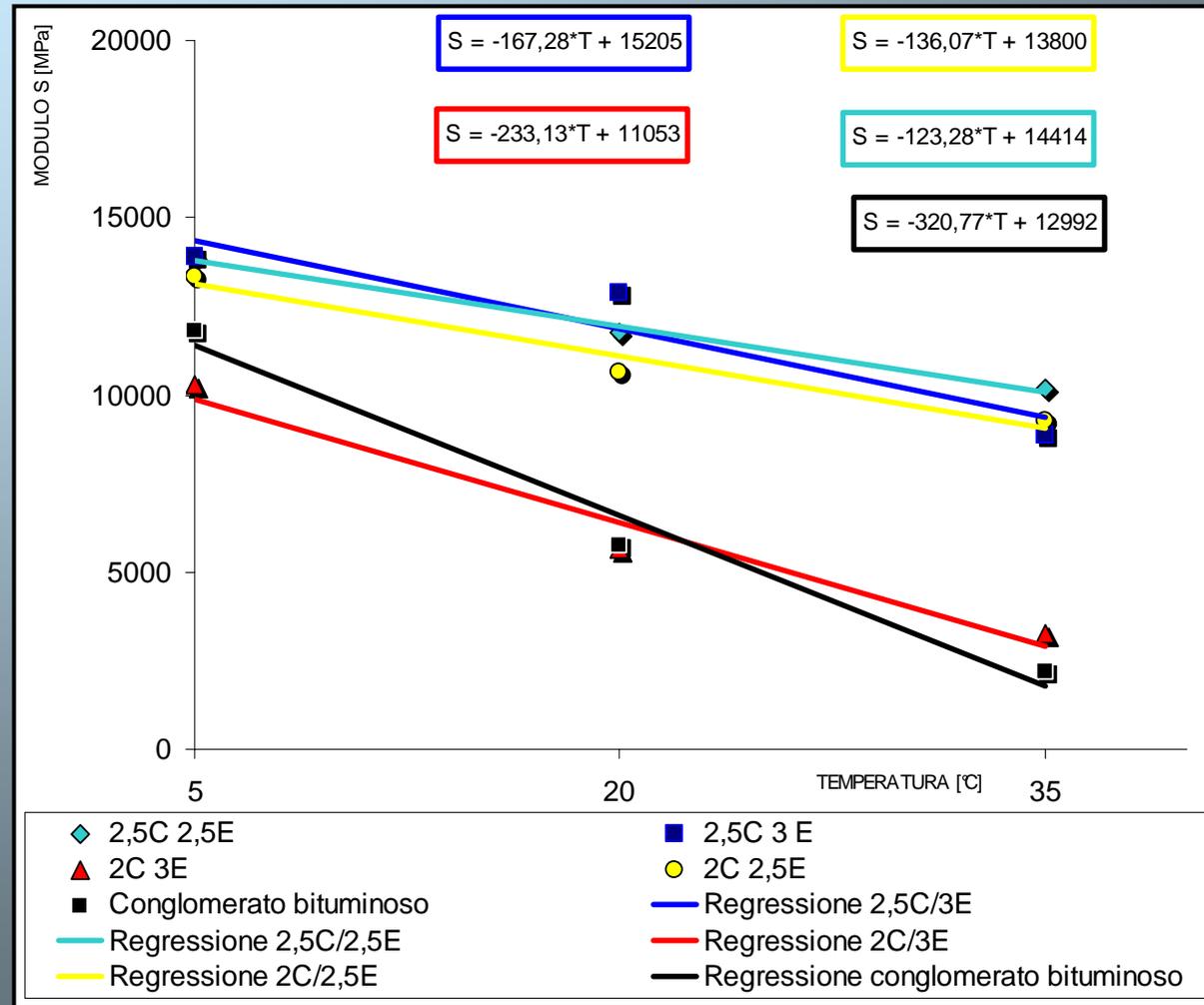
Emulsione bituminosa sovrastabilizzata



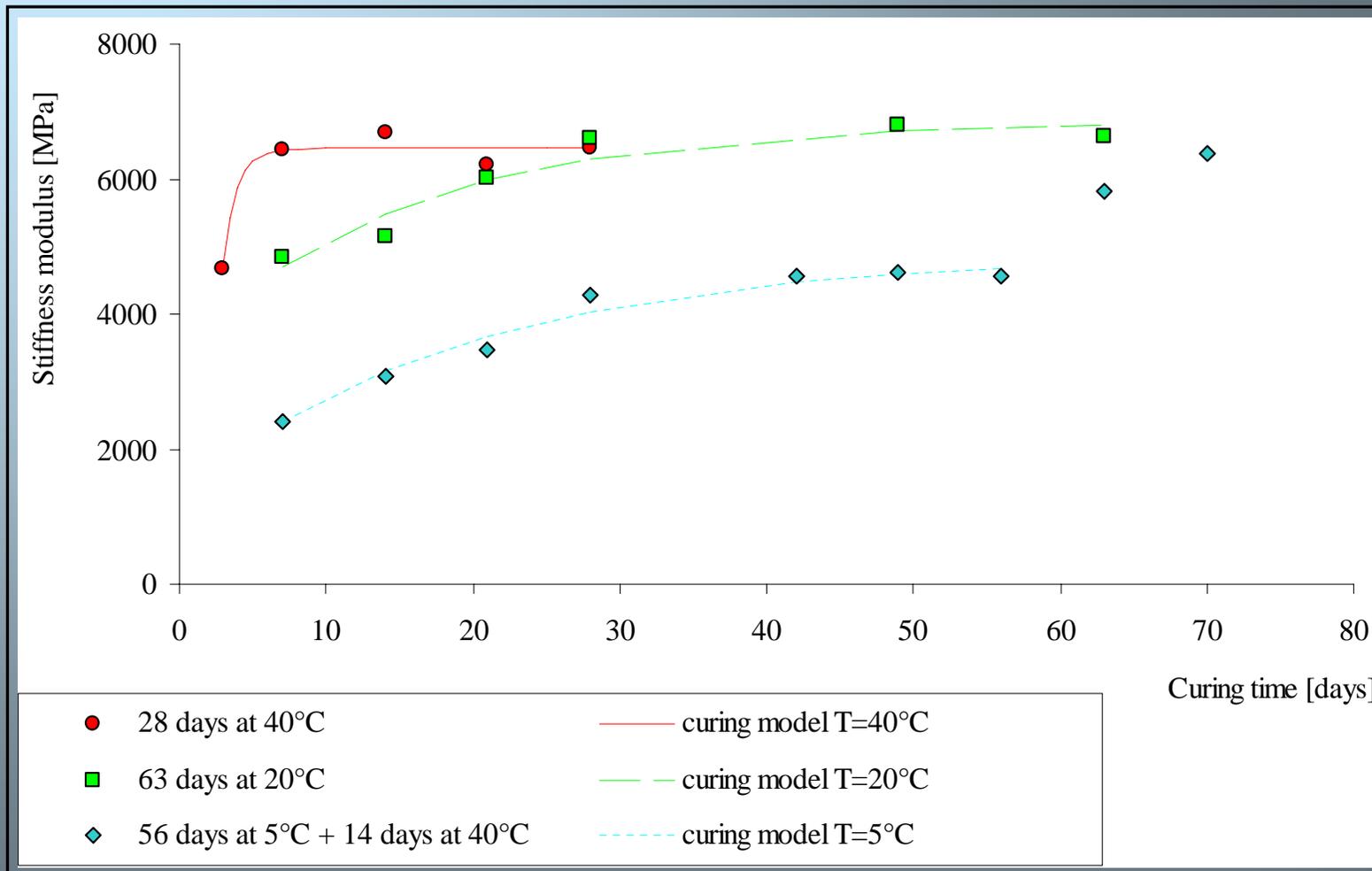
Prove di fatica per trazione indiretta cemento ed emulsione di bitume modificato



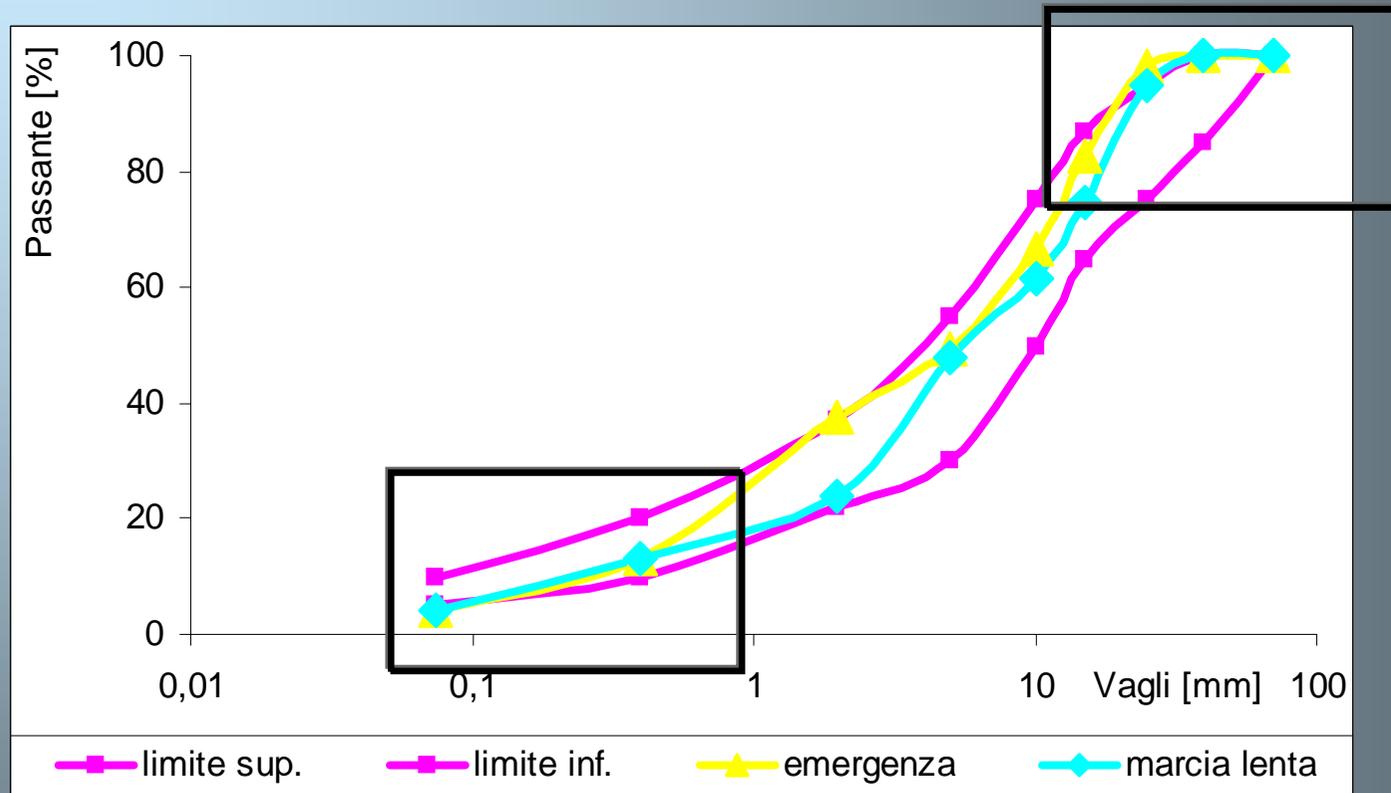
Influenza della **temperatura** sul **modulo elastico** di **miscele stabilizzate con cemento ed emulsione**



Influenza della temperatura sulla maturazione

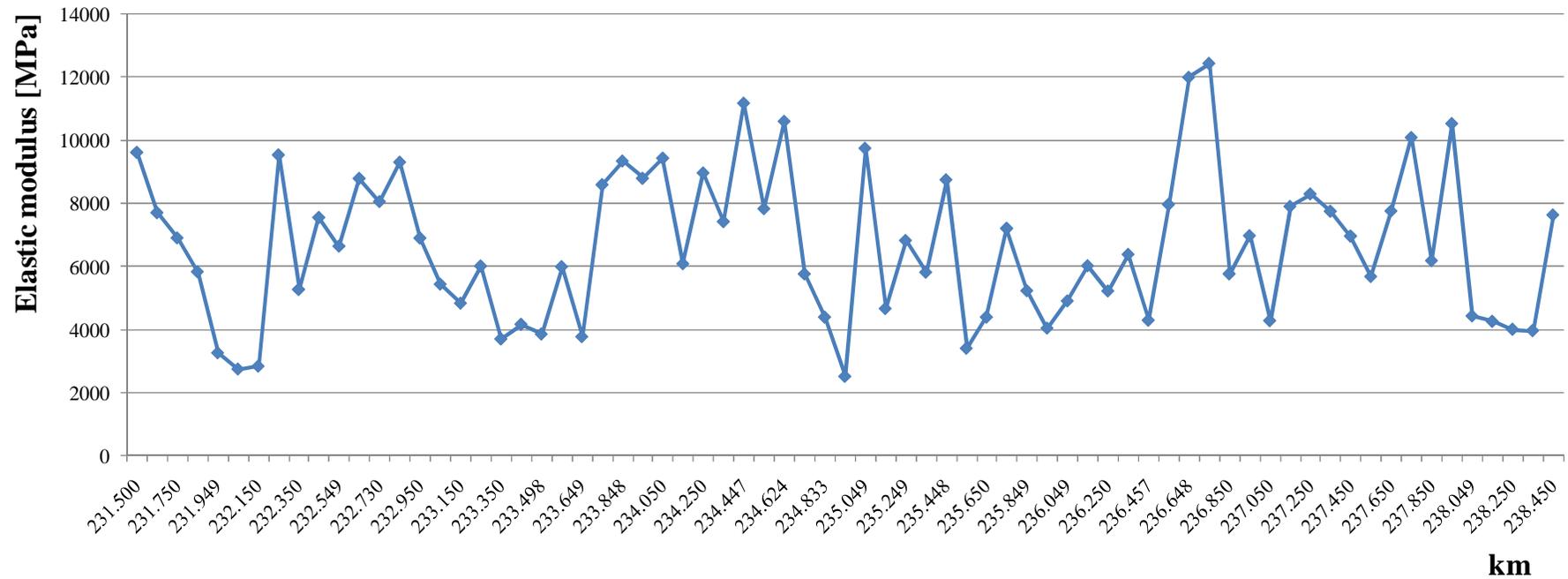


Correzione granulometrica



Integrazione con sabbia fine 0/3 mm – quantità 10%

FWD dopo 90 giorni di maturazione



Section group	Section		Section [km]		Survey station	E_{mean} 20°C	Standar deviation	Normalized standar deviation	Variance	Confidance (a=0.05)
1	24	113	231.500	233.413	20	6252	2218	0.35	4921079	972
2	113	171	233.413	234.624	12	7832	2333	0.30	5441957	1320
3	171	182	234.624	234.950	3	4221	1633	0.39	2667554	1848
4	182	270	234.950	236.850	19	6579	2571	0.39	6607542	1156
5	270	344	236.850	238.450	16	6665	2103	0.32	4420813	1030
Verifica attendibilità della suddivisione in tronchi omogenei (se $t_1 > t_{val}$ la differenza tra le medie dei due tronchi è significativa)										
Section	Pooled variance		t1	tval (a=0.05)	check	Section group	$E2_{mean}$	Note	Length [km]	
1 - 2.	5112067		1.91	2.04	no	1	7042	ok	3.124	
2 - 3.	5015125		2.50	2.16	ok	2				
3 - 4.	6213543		1.52	2.09	no	3	5822	ok	3.826	
4 - 5.	5613574		0.11	2.03	no	4				
						5				

Altre applicazioni

AUTOSTRADA A1 MILANO – NAPOLI Casalecchio di Reno – Sasso Marconi Ampliamento alla terza corsia – anno 2009



Riciclaggio in sito
Quantità di fresato 50%
Emulsione sovrastabilizzata 3.0%
Cemento 2.0%



Tappeto di usura drenante: 4 cm
Binder alto modulo: 6 cm

Base alto modulo : 20 cm

Sottobase riciclata a freddo: 30 cm
Con emulsione sovrastabilizzata

Altre applicazioni

AUTOSTRADA A1 MILANO – NAPOLI Casalecchio di Reno – Sasso Marconi Ampliamento alla terza corsia – anno 2009



Riciclaggio in sito
Quantità di fresato 50%
Emulsione sovrastabilizzata 3.0%
Cemento 2.0%



Tappeto di usura drenante: 4 cm
Binder alto modulo: 6 cm

Base alto modulo : 20 cm

Sottobase riciclata a freddo: 30 cm
Con emulsione sovrastabilizzata

S.S. n°16 “Adriatica” Tronco Foggia – Cerignola 2° LOTTO: INCORONATA – INNESTO S.S. n°161



Anno 2009

BASE



Riciclaggio in sito
Quantità di fresato 50%
Emulsione sovrastabilizzata 3.0%
Cemento 2.0%



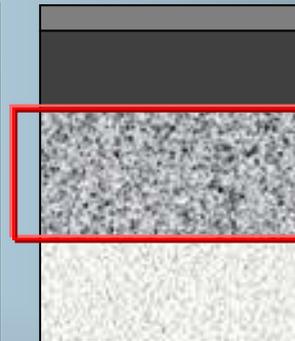
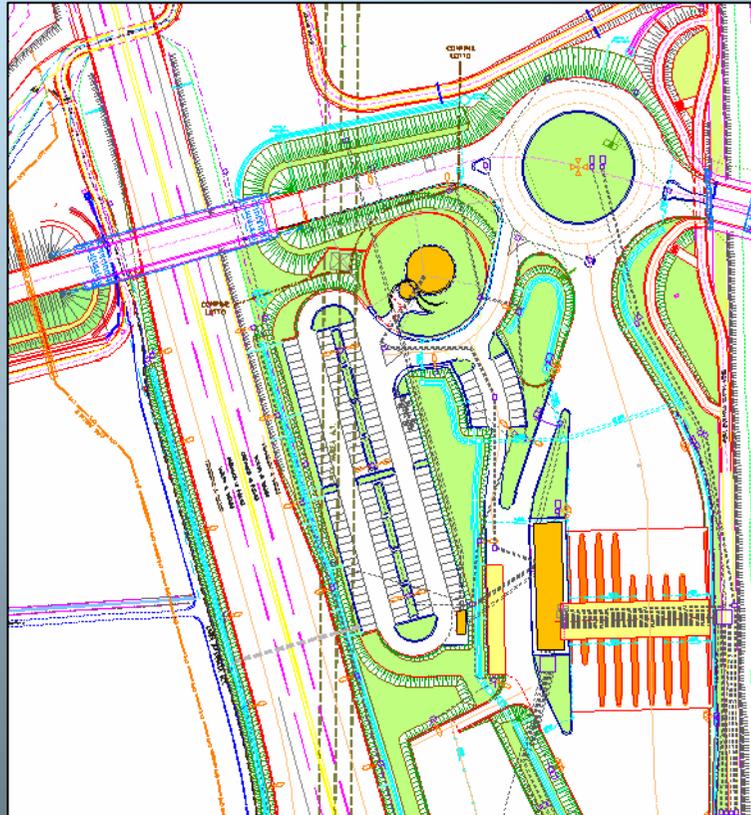
AUTOSTRADA A31 (Valdastico) Completamento a sud - Vicenza Rovigo **nuova costruzione – Anno 2010**



Produzione in impianto fisso
Quantità di fresato 100%
Emulsione sovrastabilizzata 3.0%
Cemento 2.0%



Autostrada del Brennero (A22) casello di Trento Sud nuova costruzione



Tappeto : 5 cm

Binder alto modulo: 5 cm

Base riciclata a freddo: 15 cm

Con emulsione di bitume modificato

Fondazione cm 40

Anno 2011

Produzione in impianto fisso

Quantità di fresato 80%

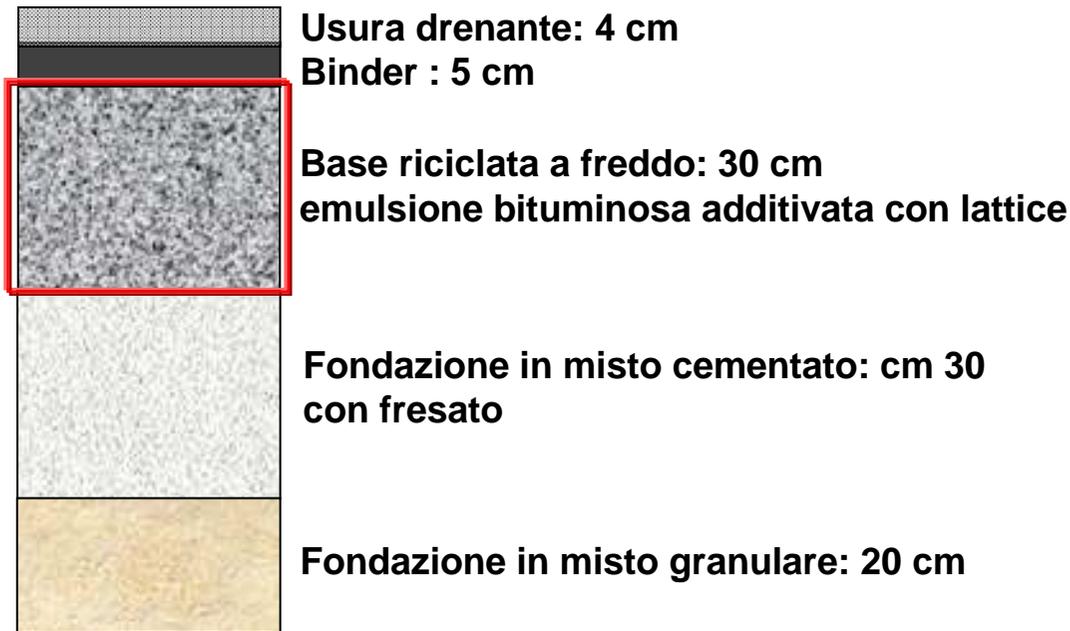
Emulsione di bitume modificato 4.00%

Cemento 2.0%

Autostrada del Brennero (A22) casello di Trento Sud



Ampliamento alla terza corsia dell'autostrada A1 "Diramazione Roma Nord" da Roma Nord a Settebagni



Anni 2010 - 2011

Produzione in impianto fisso
Quantità di fresato 85%
Emulsione con lattice 4.00%
Cemento 2.0%

Ampliamento alla terza corsia dell'autostrada A1



Autostrada A3 Salerno – Reggio Calabria

Tronco 2°, tratto 6 e tratto 7

Lotto 1° dal km 286+000 al km 294+600



Anno 2011

Produzione con pulvimixer
Quantità di fresato 100%
Emulsione sovrastabilizzata 3.00%
Cemento 2.0%

Conclusioni

Consumo ambientale

Territorio

10 km autostrada

Materiali

Terre

30 Ha

Aggregati lapidei

1.500.000 mc

250.000 mc

Energia

1500 + 3000 t

87.500 passaggi

2.625.000 km



GRAZIE PER L'ATTENZIONE