



Corso SIIV 2011



di Alta Formazione alla Ricerca

Brescia, 8 Settembre 2011

**Caratterizzazione Prestazionale di Miscele
Bituminose e Cementizie confezionate con
Scorie di Acciaieria da Forno ad Arco Elettrico**

Ph.D. Ing. N. Baldo

nicola.baldo@uniud.it

Università di Udine

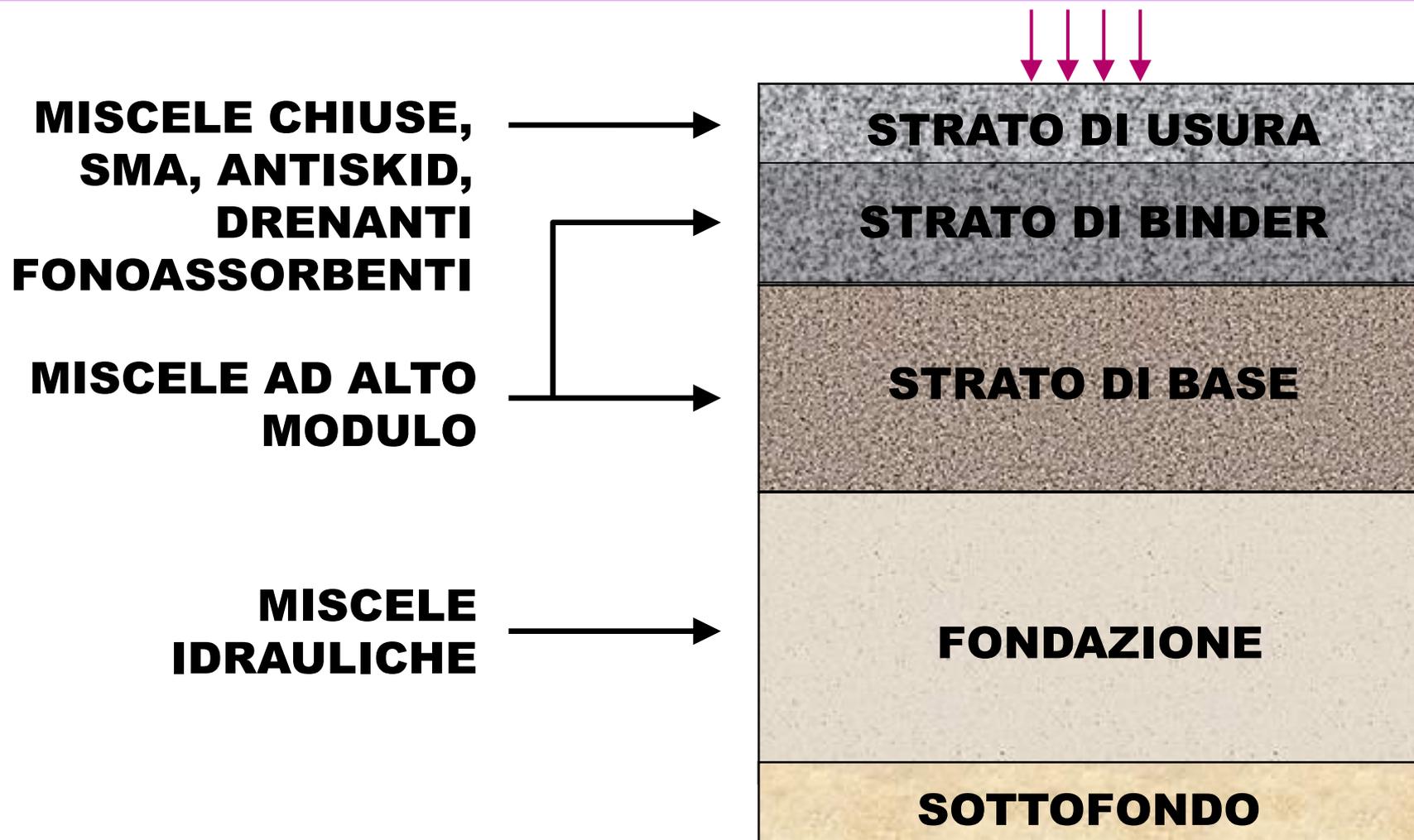
Dipartimento di Chimica, Fisica ed Ambiente

ARGOMENTI DELLA PRESENTAZIONE

- ✓ **Introduzione**
- ✓ **Caratteristiche fisico-meccaniche delle scorie EAF**
- ✓ **Impiego delle scorie EAF nelle miscele bituminose**
- ✓ **Impiego delle scorie EAF nelle miscele cementizie**
- ✓ **Conclusioni**

INTRODUZIONE

Ambiti Applicativi nelle Infrastrutture Viarie



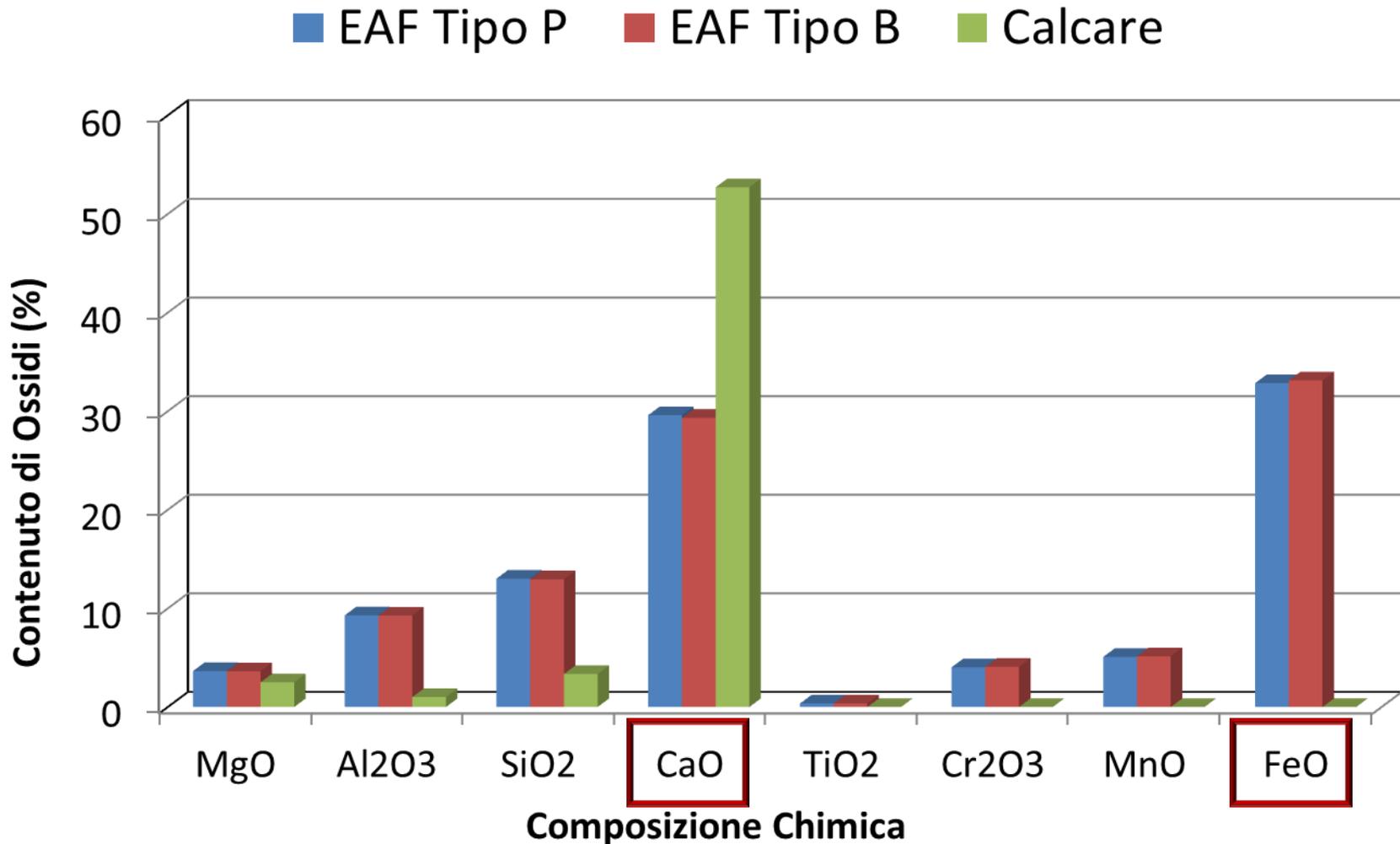
Scorie di acciaieria da Forno ad Arco Elettrico



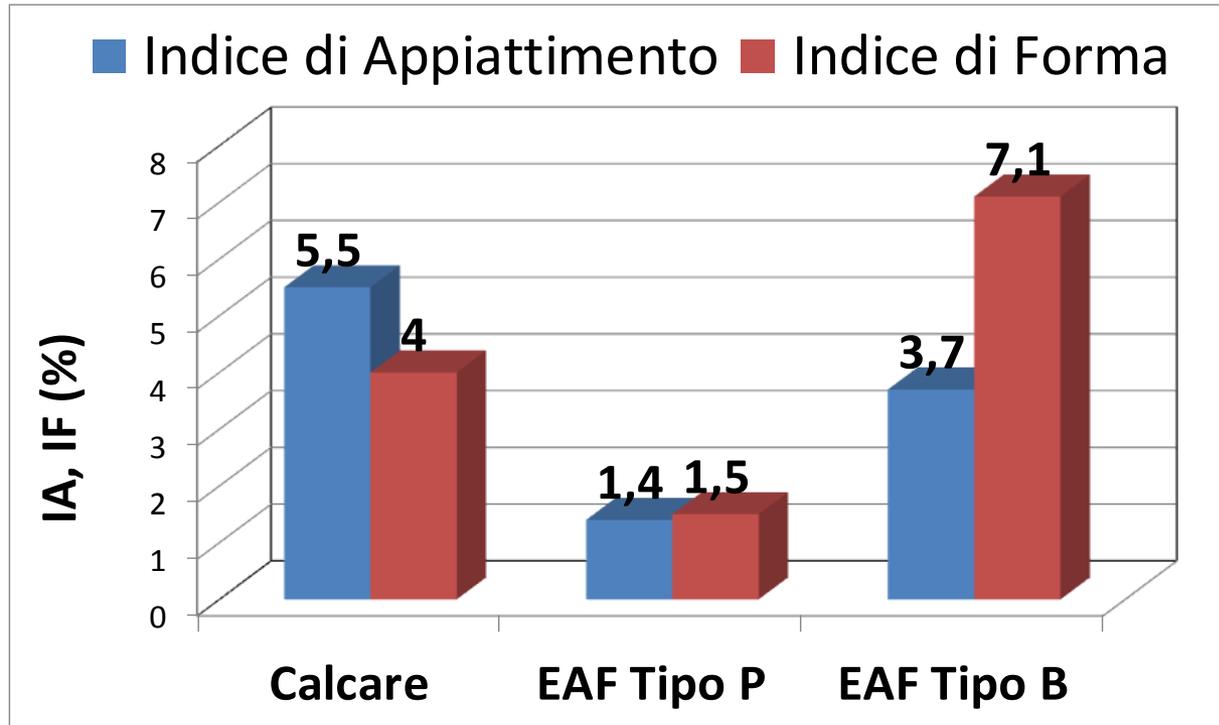
Scorie di acciaieria da Forno ad Arco Elettrico



Composizione Chimica delle Scorie EAF



Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF



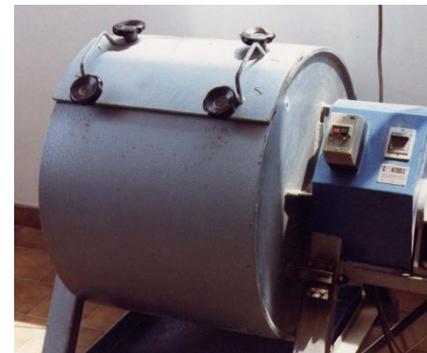
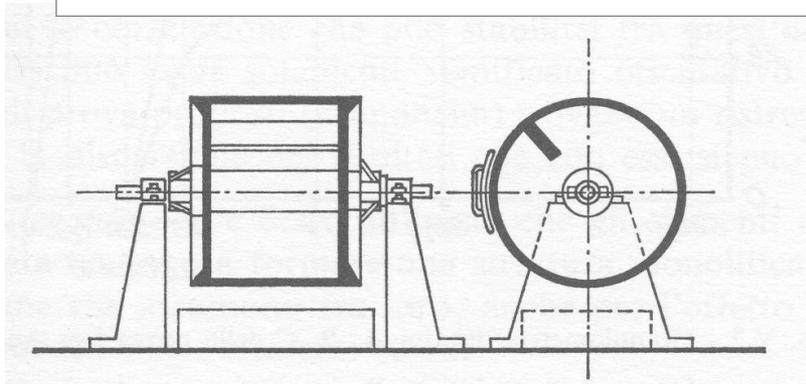
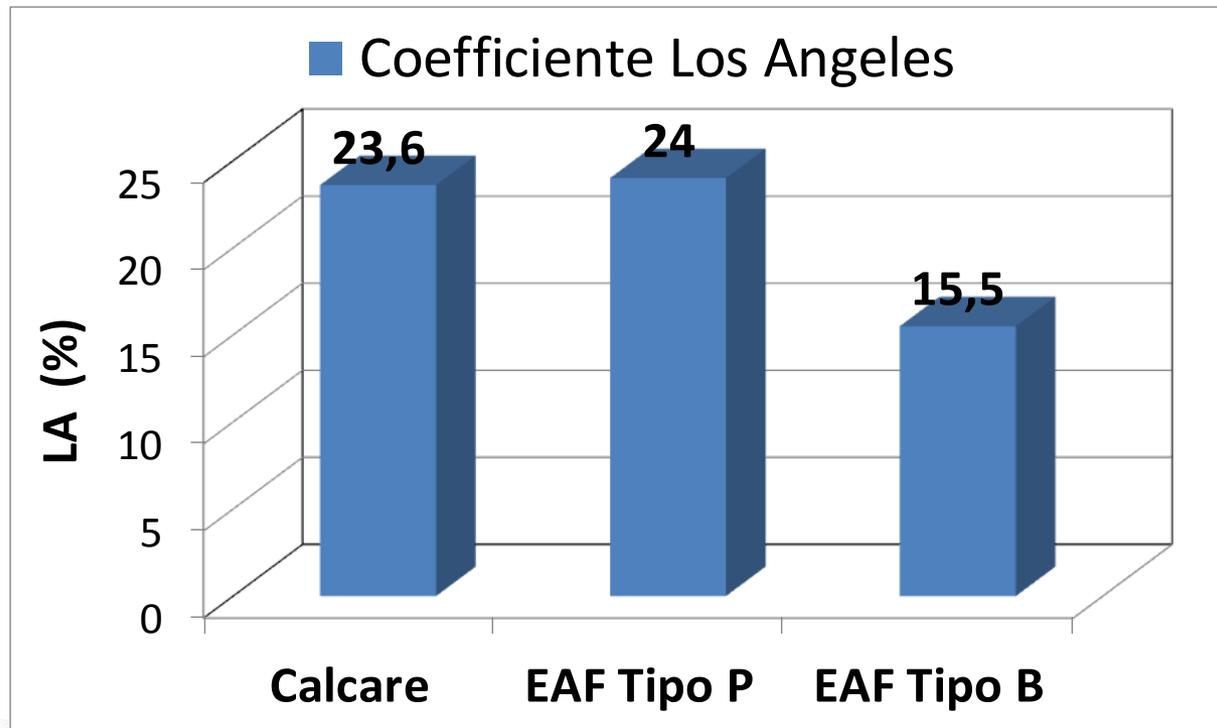
Indice di appiattimento (IA)



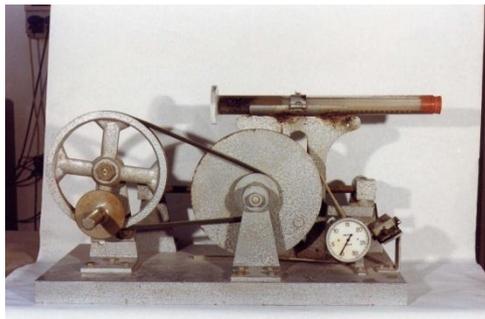
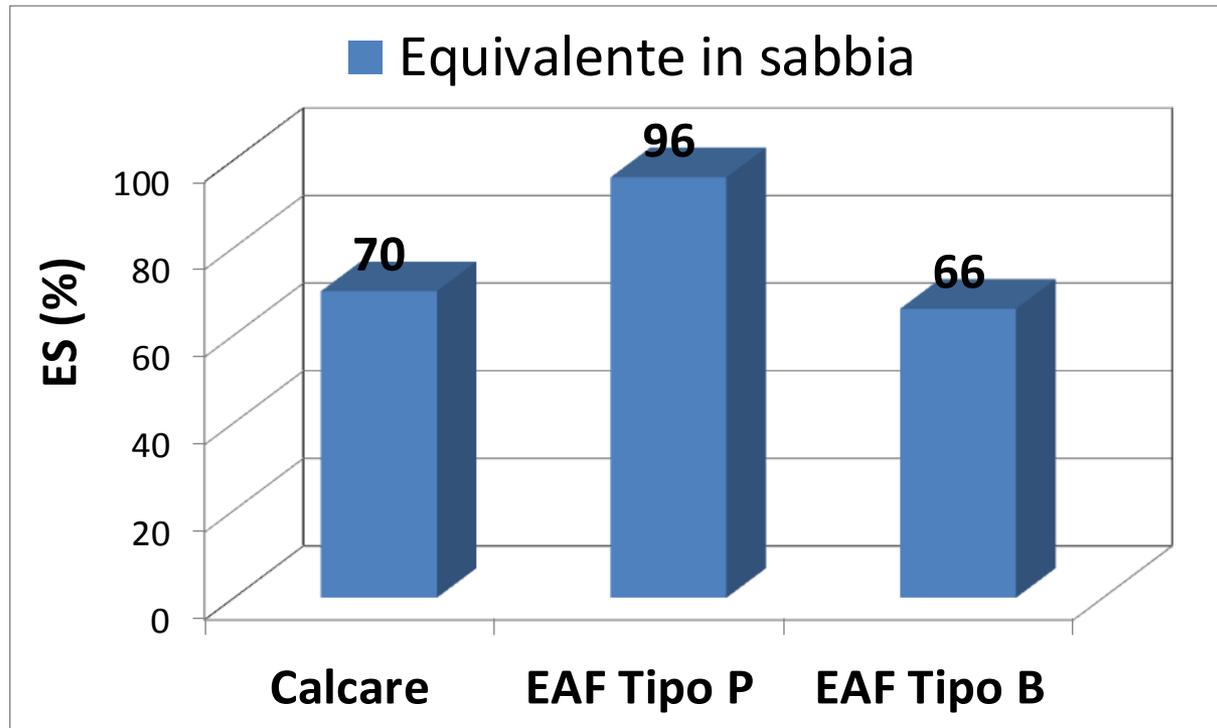
Indice di forma (IF)



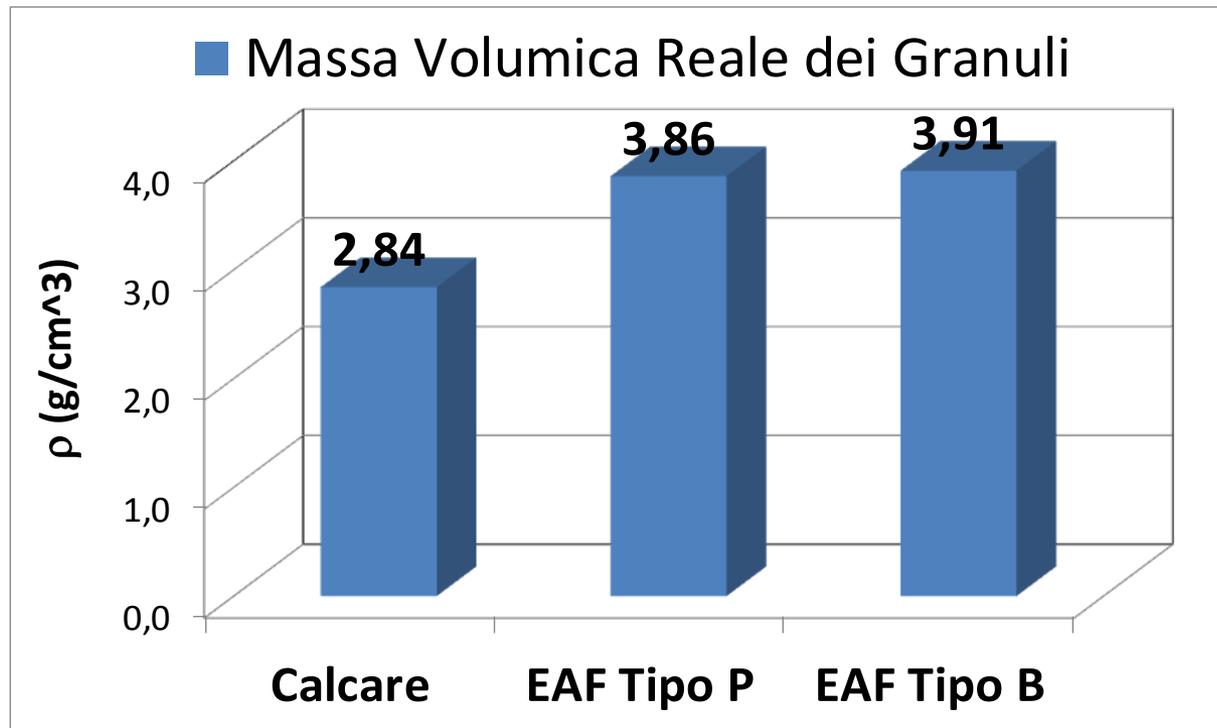
Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF



Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF

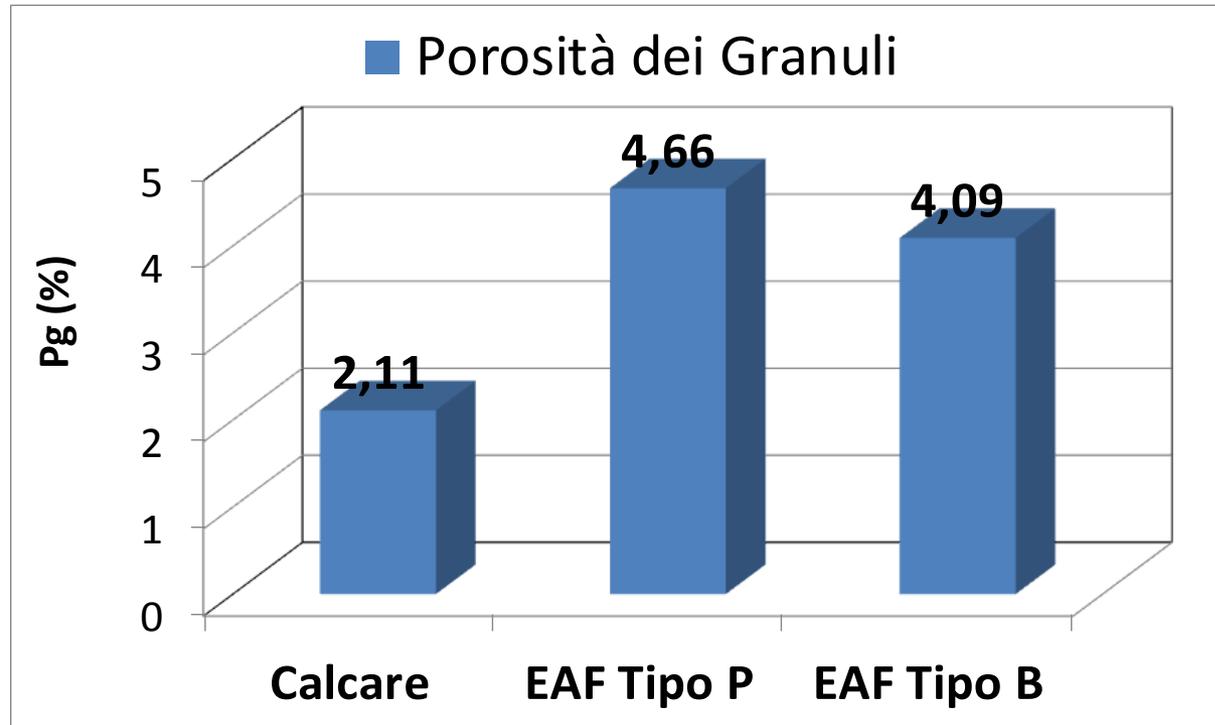


Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF



- ✓ L'elevata massa volumica comporta un aumento del costo di trasporto
- ✓ Risulta necessario verificare accuratamente l'incidenza del costo di trasporto, in relazione alla distanza cantiere-sito produttivo delle scorie EAF e considerando il minor costo della scoria rispetto al materiale litico naturale

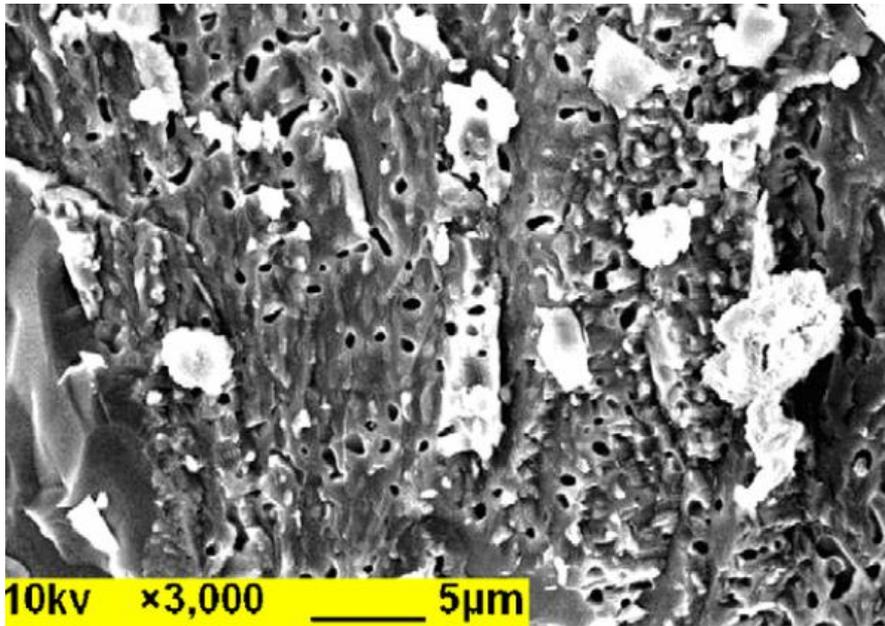
Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF



- ✓ La porosità è legata alla formazione di micro cavità durante il raffreddamento della scoria fusa, pertanto dipende dal processo tecnologico adottato nelle acciaierie
- ✓ Influenza la tessitura superficiale dei grani e l'assorbimento di bitume

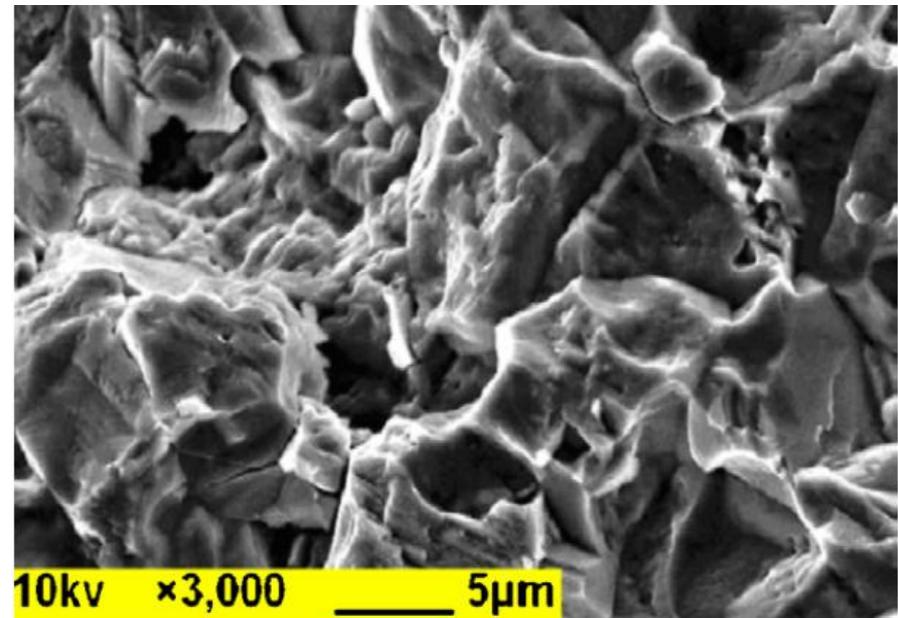
Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF

Analisi SEM



Scoria di acciaieria

Calcare



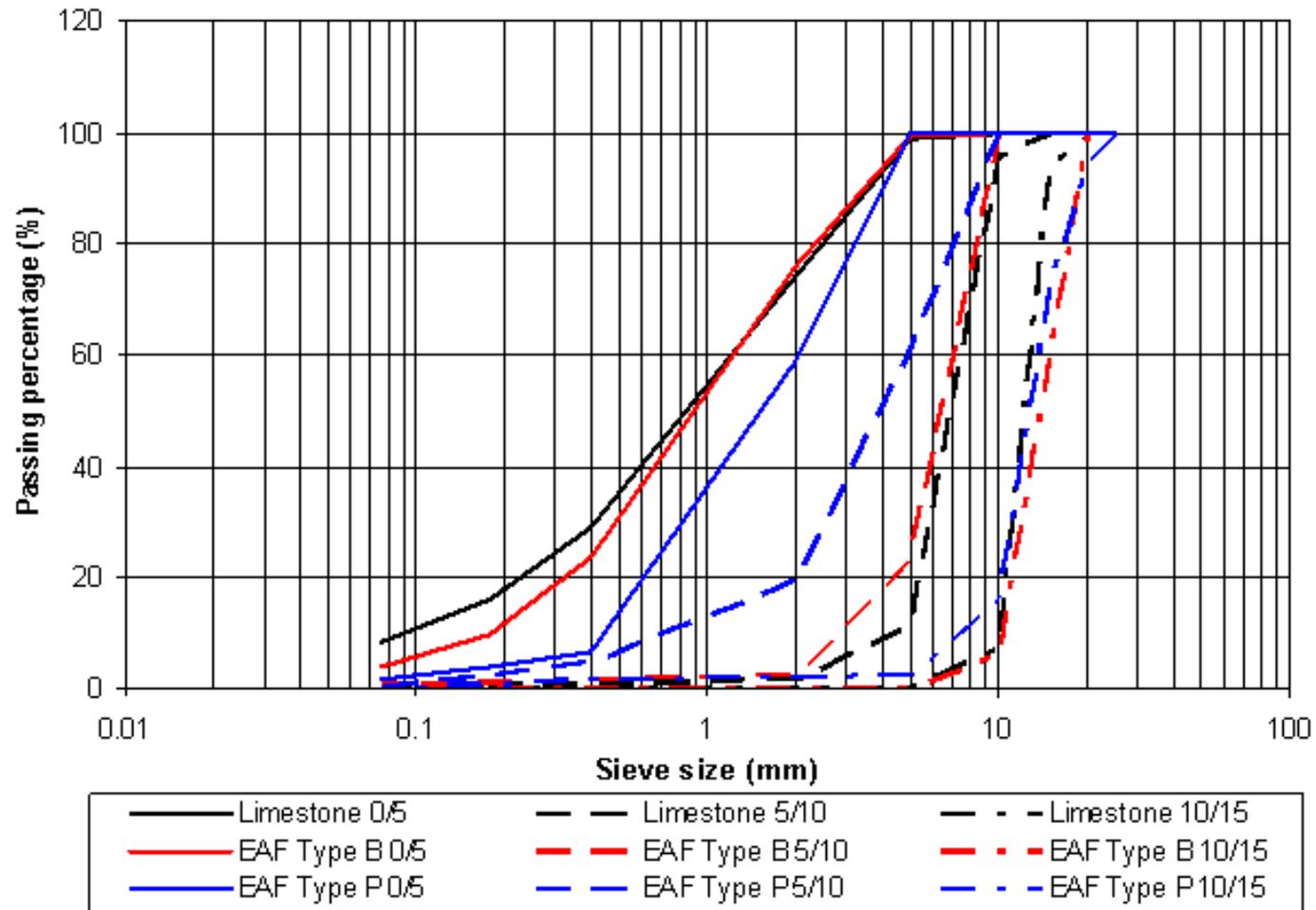
Conglomerati Bituminosi ad Alto Modulo

CARATTERISTICHE

- **Elevata rigidezza, senza riduzioni di flessibilità**
- **Invecchiamento del legante più graduale**
- **Minore suscettività termica**
- **Riduzione deformazioni permanenti (ormae)**
- **Aumento resistenza a fatica**
- **Riduzione spessori della sovrastruttura**
- **Utilizzo inerte non pregiato**

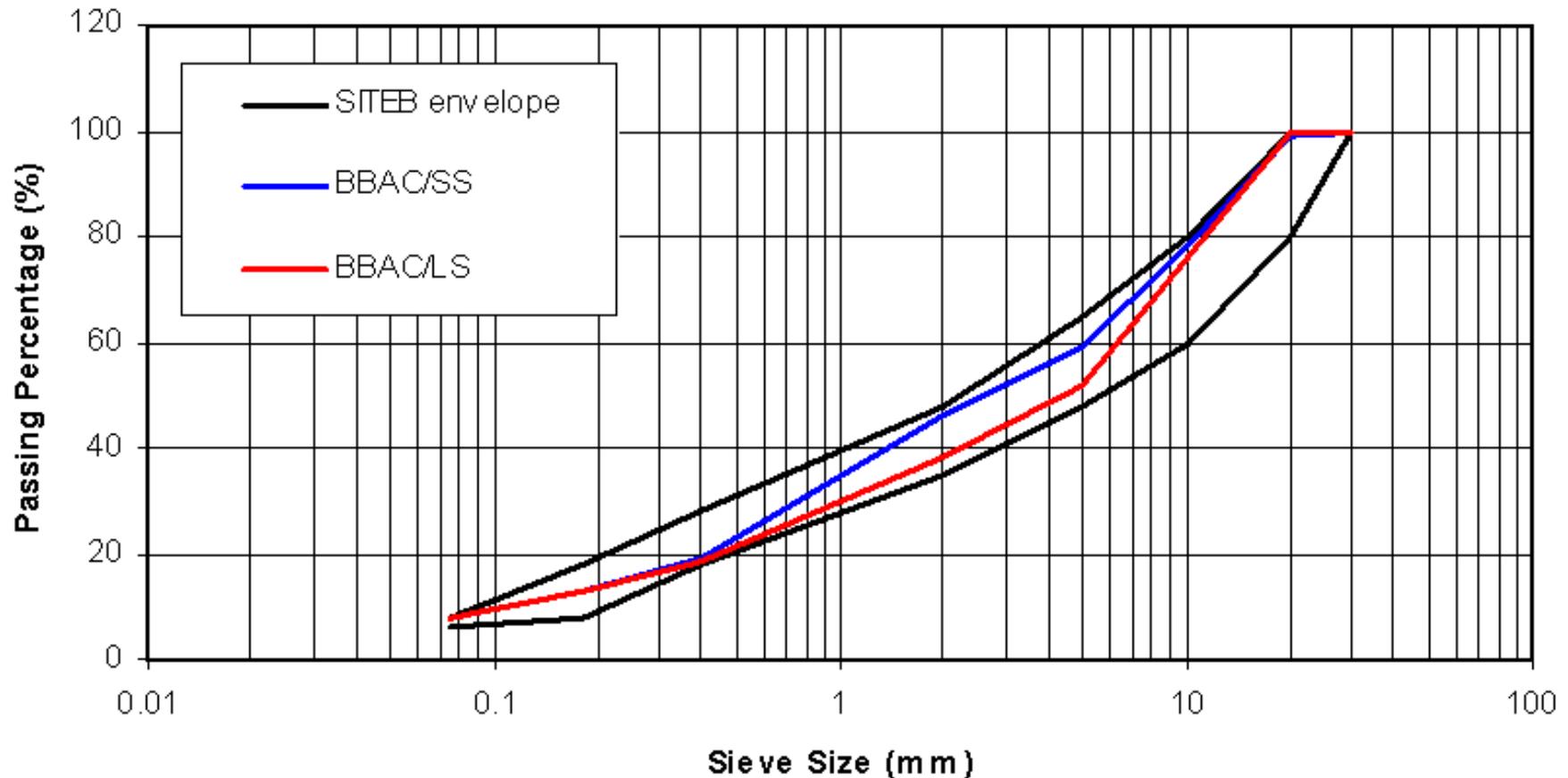


Curve granulometriche dei materiali granulari



Curva granulometrica delle miscele BBAC

(Base-Binder Asphalt Concrete)



LEGANTI BITUMINOSI IMPIEGATI

Bitumi modificati con polimeri SBS

Proprietà	Standard	PMB 1 (<i>Soft</i>)	PMB 2 (<i>Hard</i>)
Penetrazione (mm/10), @ 25°C	(CNR 24/71)	46	21
Rammolimento (°C)	(CNR 35/73)	78	80
Duttilità (cm) @ 25°C	(CNR 44/74)	oltre 100	oltre 100
Punto di Rottura Fraas (°C)	(CNR 43/74)	- 12	- 14
Recupero Elastico (%) @ 25°C	(DIN 52013)	> 50	> 50

COMPOSIZIONE delle MISCELE	Frazioni (mm)	Quantità (%)			
		BBAC-1/LS	BBAC-1/SS	BBAC-2/LS	BBAC-2/SS
CALCARE	0/5	43	36	43	36
	5/10	26	7	26	7
	10/15	25	-	25	-
EAF Tipo P	0/5	-	-	-	-
	5/10	-	12	-	12
	10/15	-	20	-	20
EAF Tipo B	0/5	-	7	-	7
	5/10	-	7	-	7
	10/15	-	5	-	5
Filler minerale		6	6	6	6

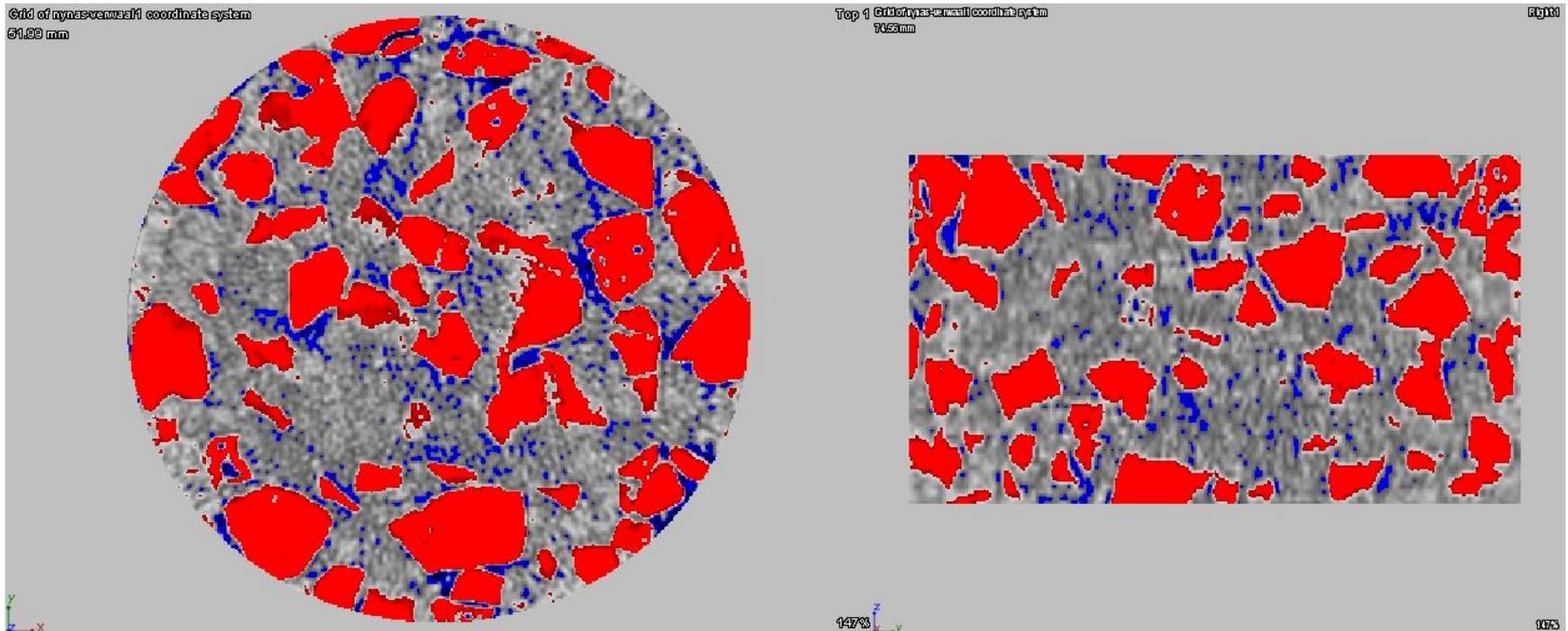


COMPOSIZIONE delle MISCELE	Frazioni (mm)	Quantità (%)			
		BBAC-1/LS	BBAC-1/SS	BBAC-2/LS	BBAC-2/SS
CALCARE	0/5	43	36	43	36
	5/10	26	7	26	7
	10/15	25	-	25	-
EAF Tipo P	0/5	-	-	-	-
	5/10	-	12	-	12
	10/15	-	20	-	20
EAF Tipo B	0/5	-	7	-	7
	5/10	-	7	-	7
	10/15	-	5	-	5
Filler minerale		6	6	6	6

COMPOSIZIONE delle MISCELE	Frazioni (mm)	Quantità (%)			
		BBAC-1/LS	BBAC-1/SS	BBAC-2/LS	BBAC-2/SS
CALCARE	0/5	43	36	43	36
	5/10	26	7	26	7
	10/15	25	-	25	-
EAF Tipo P	0/5	-	-	-	-
	5/10	-	12	-	12
	10/15	-	20	-	20
EAF Tipo B	0/5	-	7	-	7
	5/10	-	7	-	7
	10/15	-	5	-	5
Filler minerale		6	6	6	6

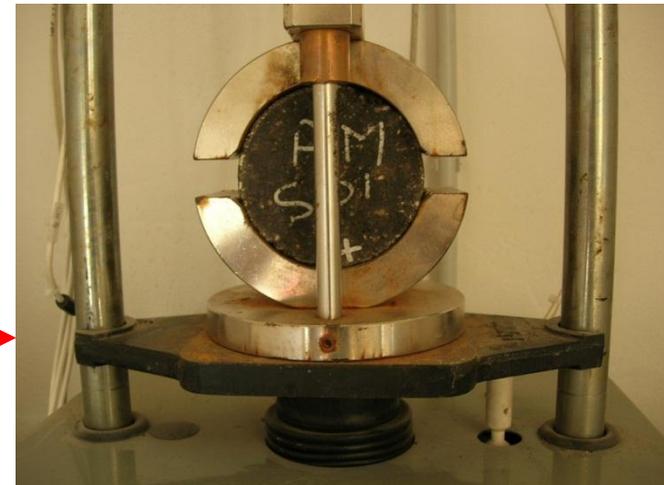
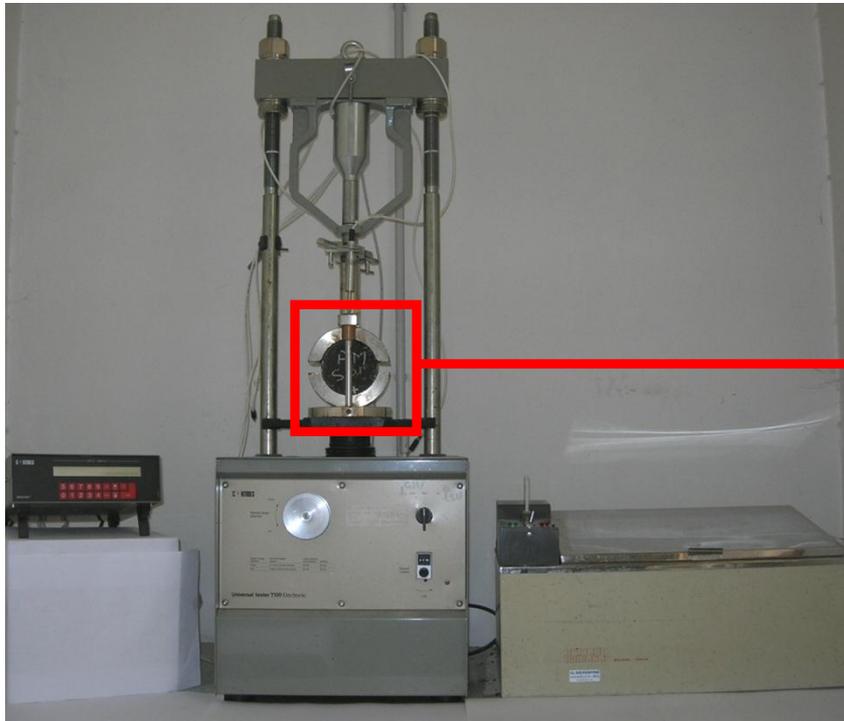
TOMOGRAFIA RX

Contenuto Totale di Scoria
EAF: 51%



APPROCCIO EMPIRICO: PROVA MARSHALL

(4 diversi contenuti di bitume nel range 4.0% - 5.5%)

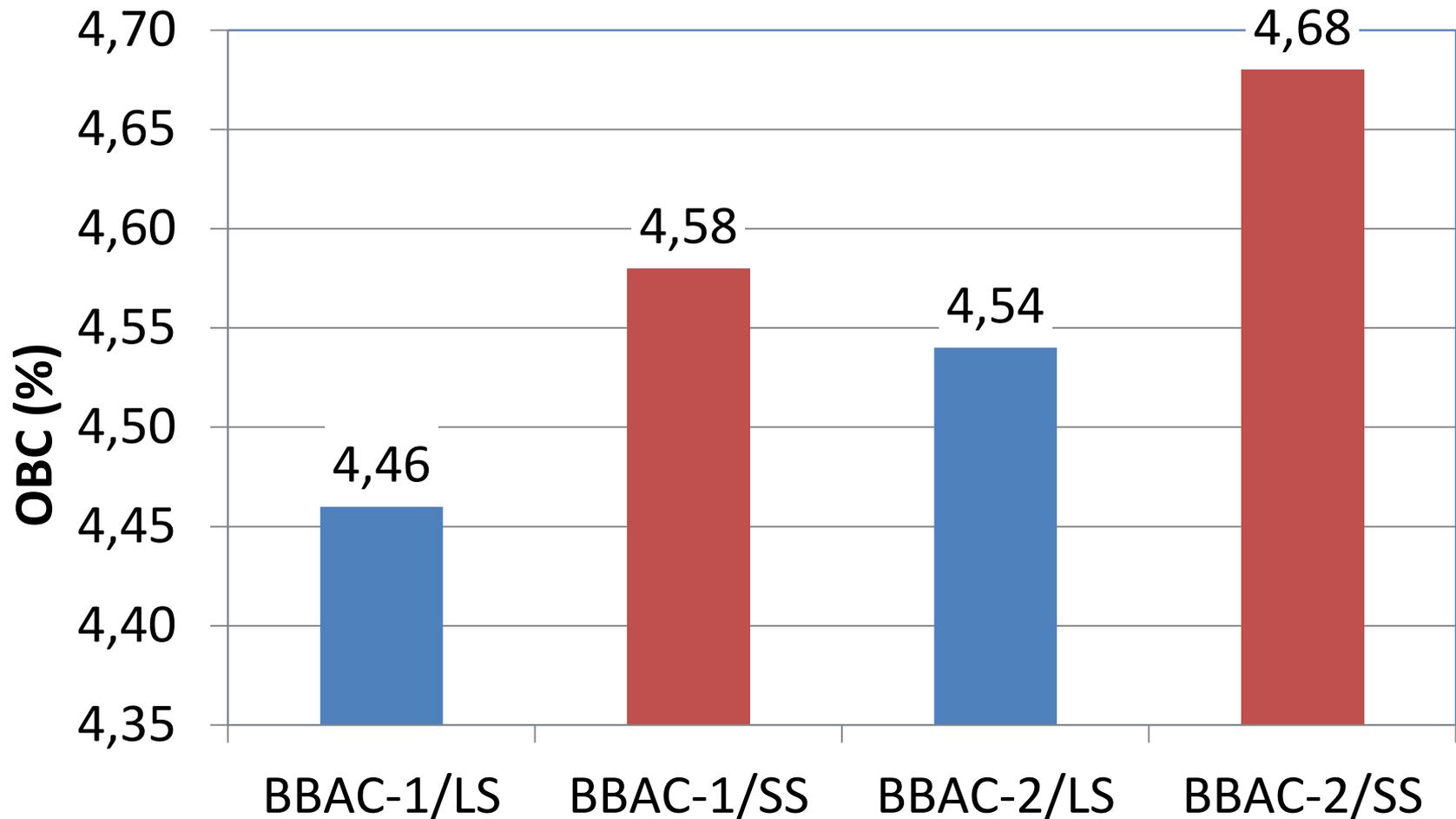


Apparecchiatura in dotazione presso il Laboratorio Sperimentale Stradale dell'Università di Padova

Risultati:

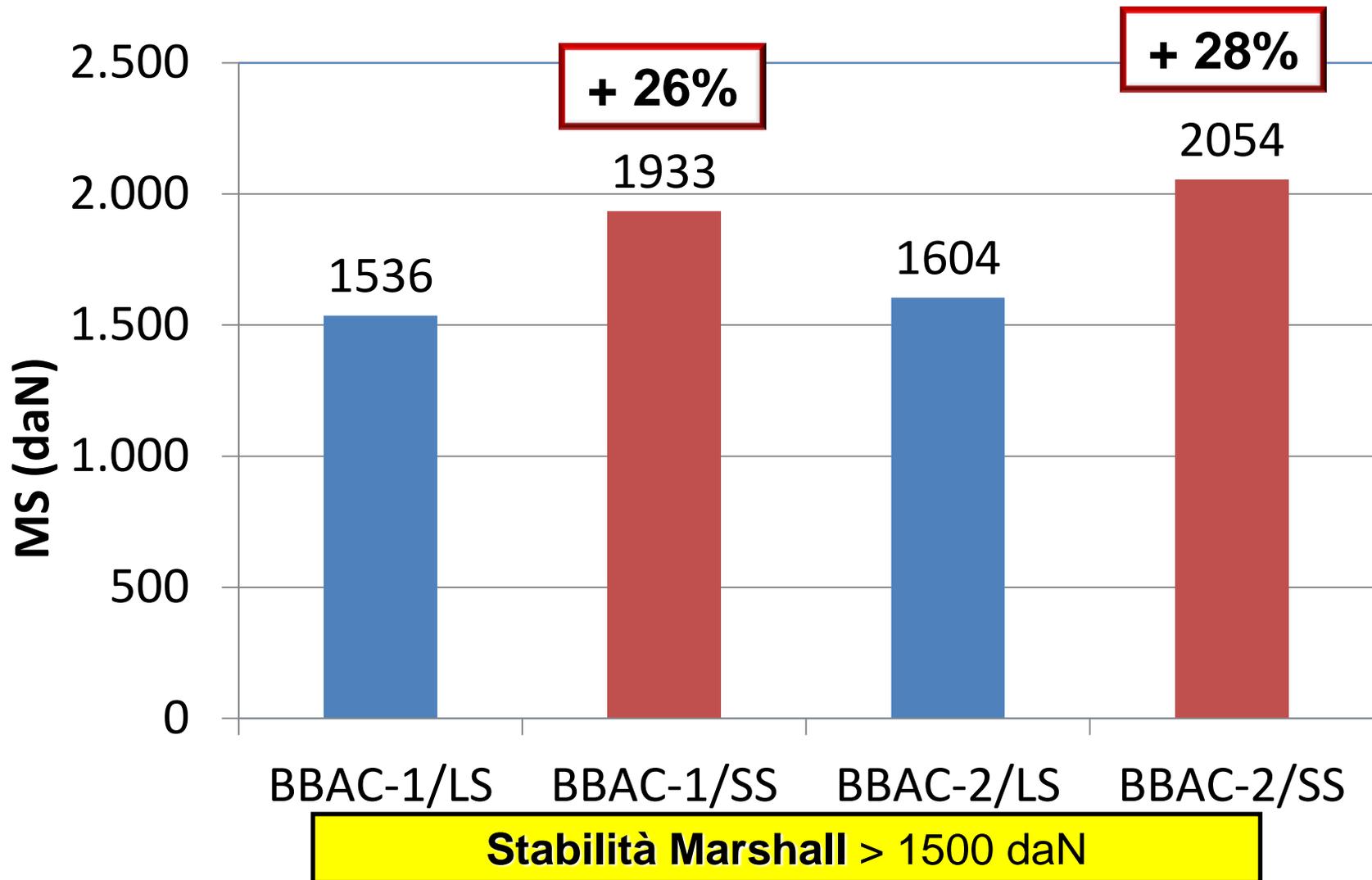
- Stabilità Marshall (daN) → ➤ Quoziente Marshall (daN/mm)
- Scorrimento Marshall (mm)

CONTENUTO OTTIMO DI BITUME @ 4% V_a

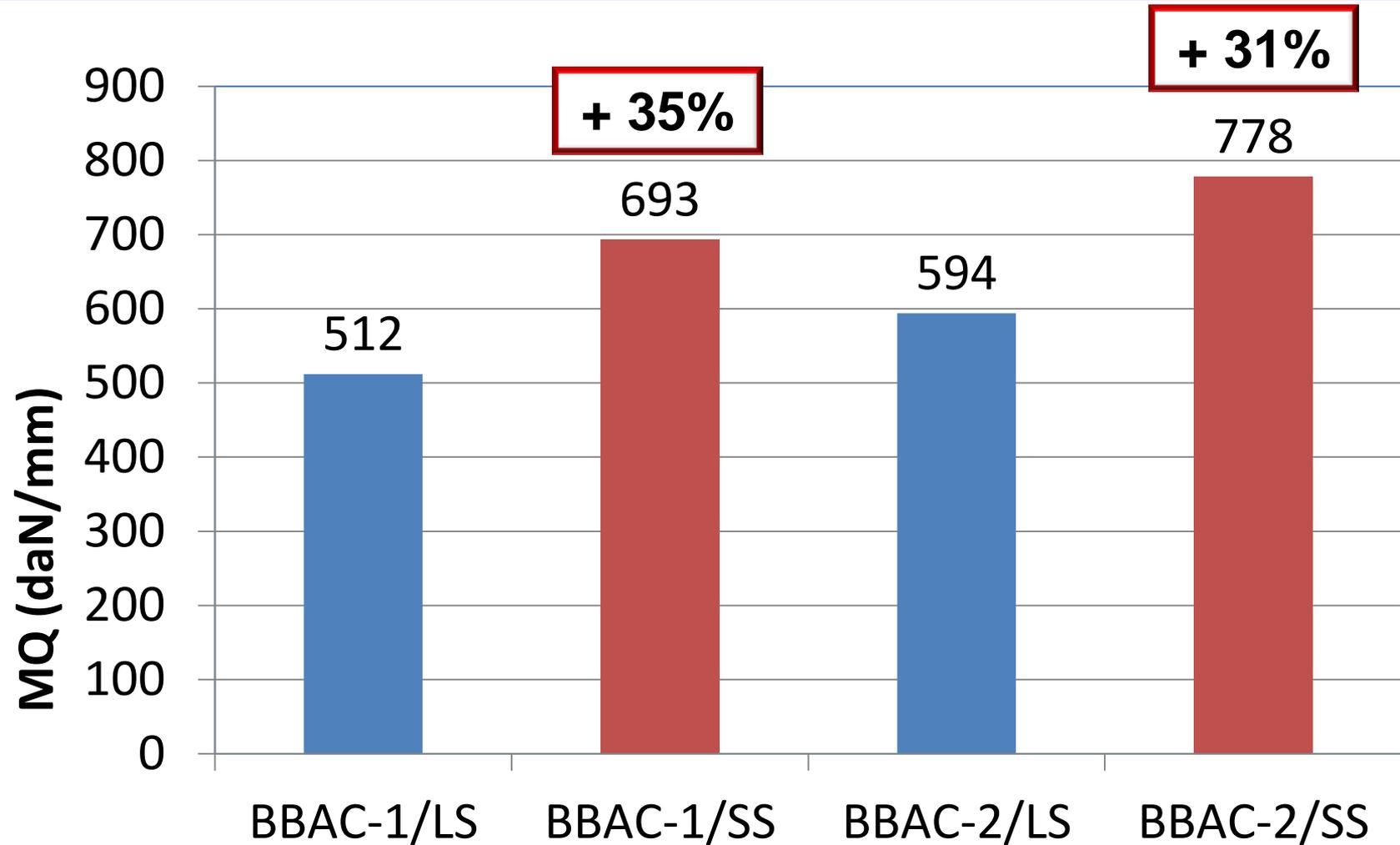


4% < OBC < 5%

STABILITA' MARSHALL @ OBC

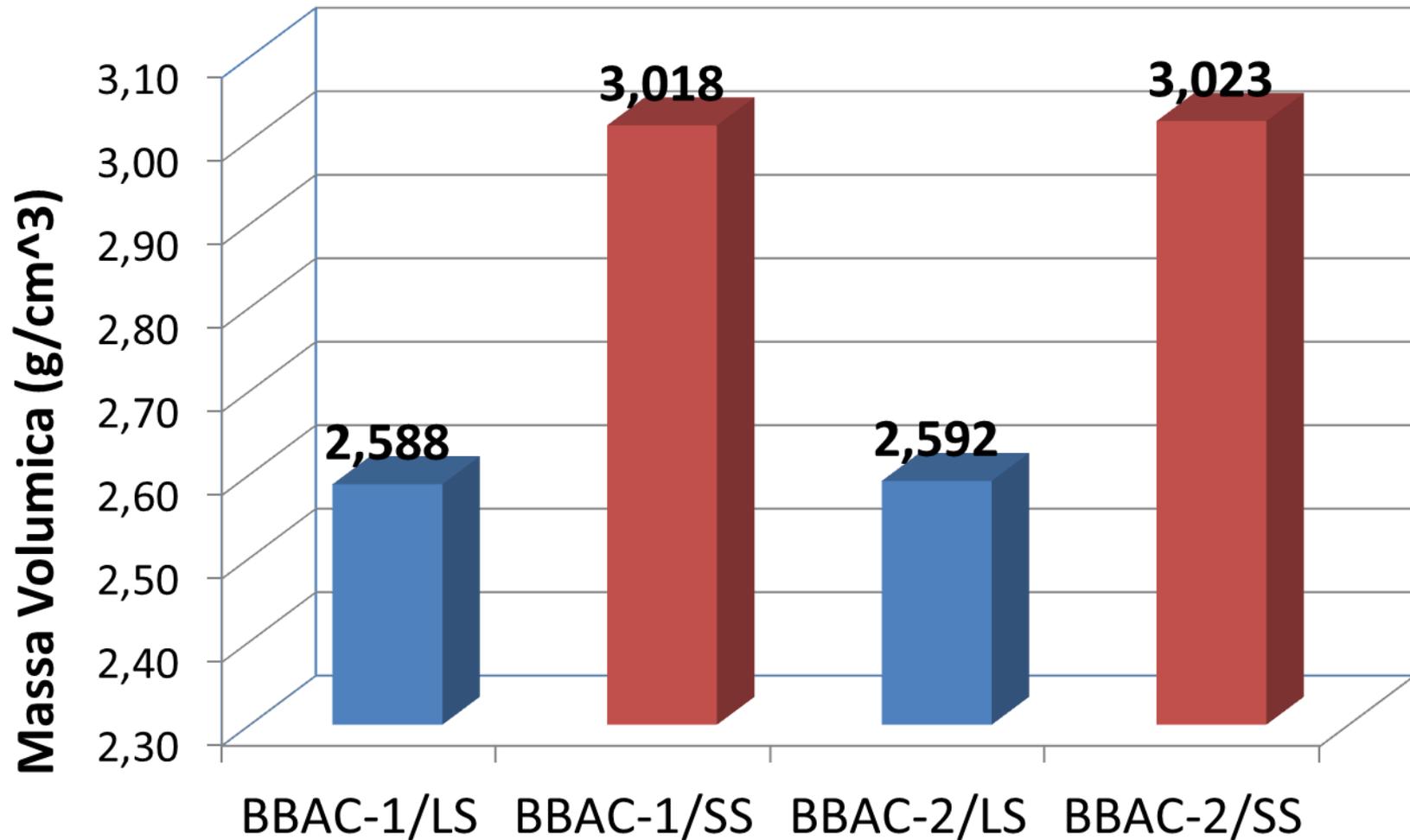


QUOZIENTE MARSHALL @ OBC



Quoziente Marshall > 400 daN/mm

MASSA VOLUMICA @ OBC



PRESSA A TAGLIO GIRATORIA

Determinazione N_{design} - metodologia SUPERPAVE



Traffico (ESALs) 80 kN	Temperatura dell'aria			
	< 39°C	39÷40°C	41÷42°C	43÷44°C
<3x10 ⁵	min 68	74	78	82
<1x10 ⁶	76	83	88	93
<3x10 ⁶	86	95	100	105
<1x10 ⁷	96	106	113	119
<3x10 ⁷	109	121	128	135
<1x10 ⁸	126	139	146	153
>1x10 ⁸	143	158	165	max 172

Apparecchiatura in dotazione presso il Laboratorio Sperimentale Stradale dell'Università di Padova

Pressione: 600kPa

Inclinazione: 1,25 gradi

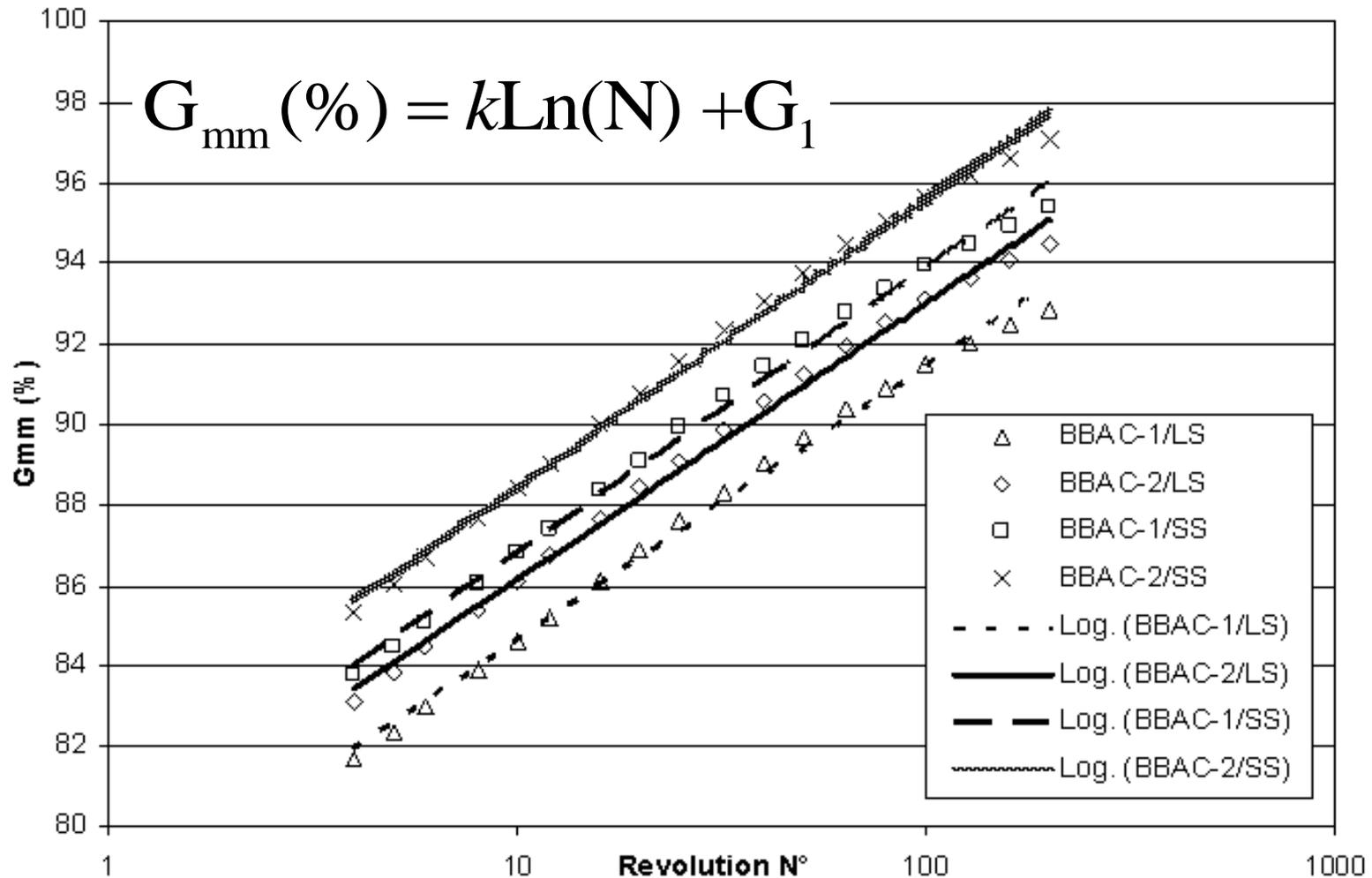
Velocità: 30 giri/minuto

$N_{design} = 96$

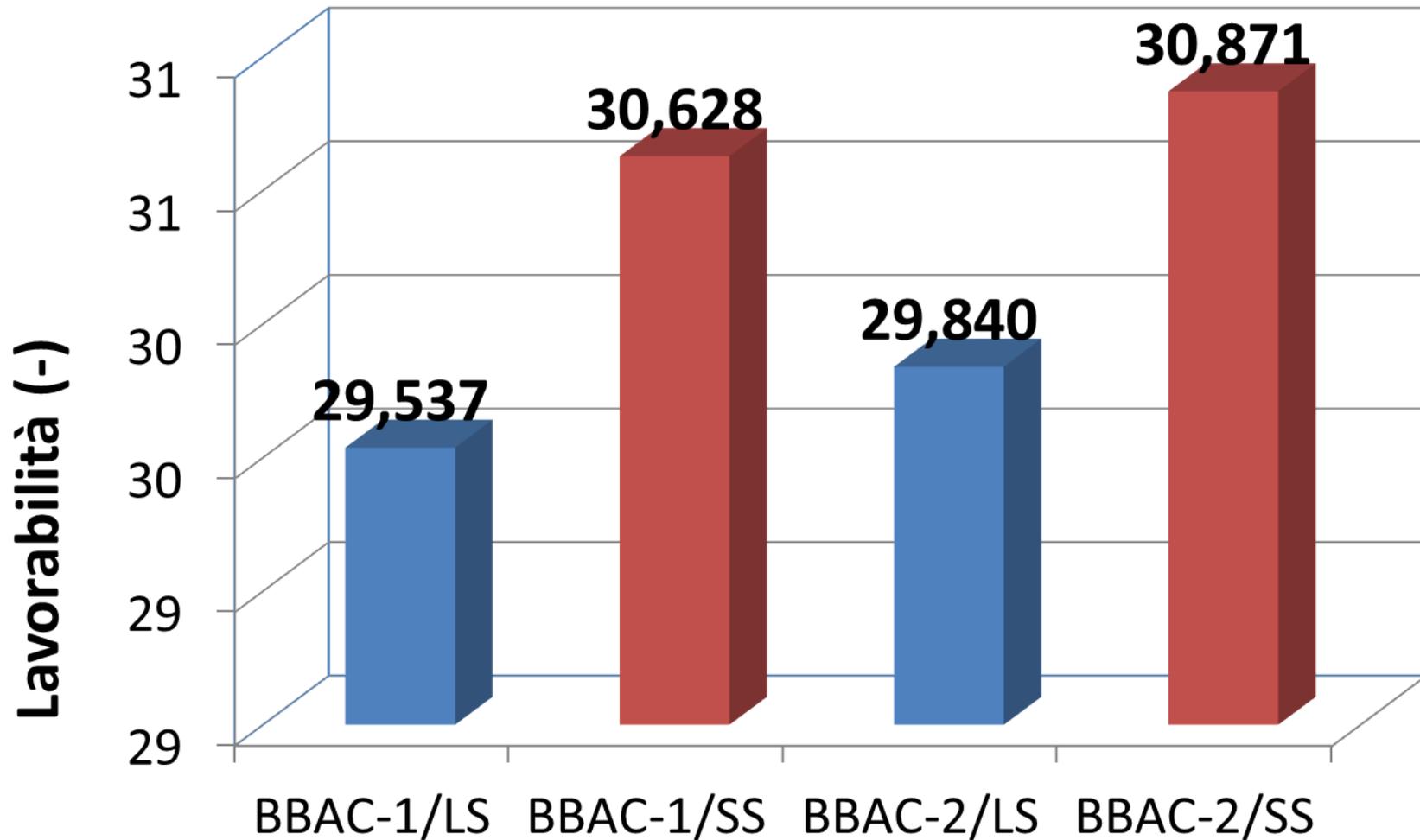
$N_{init} = 8$

$N_{max} = 152$

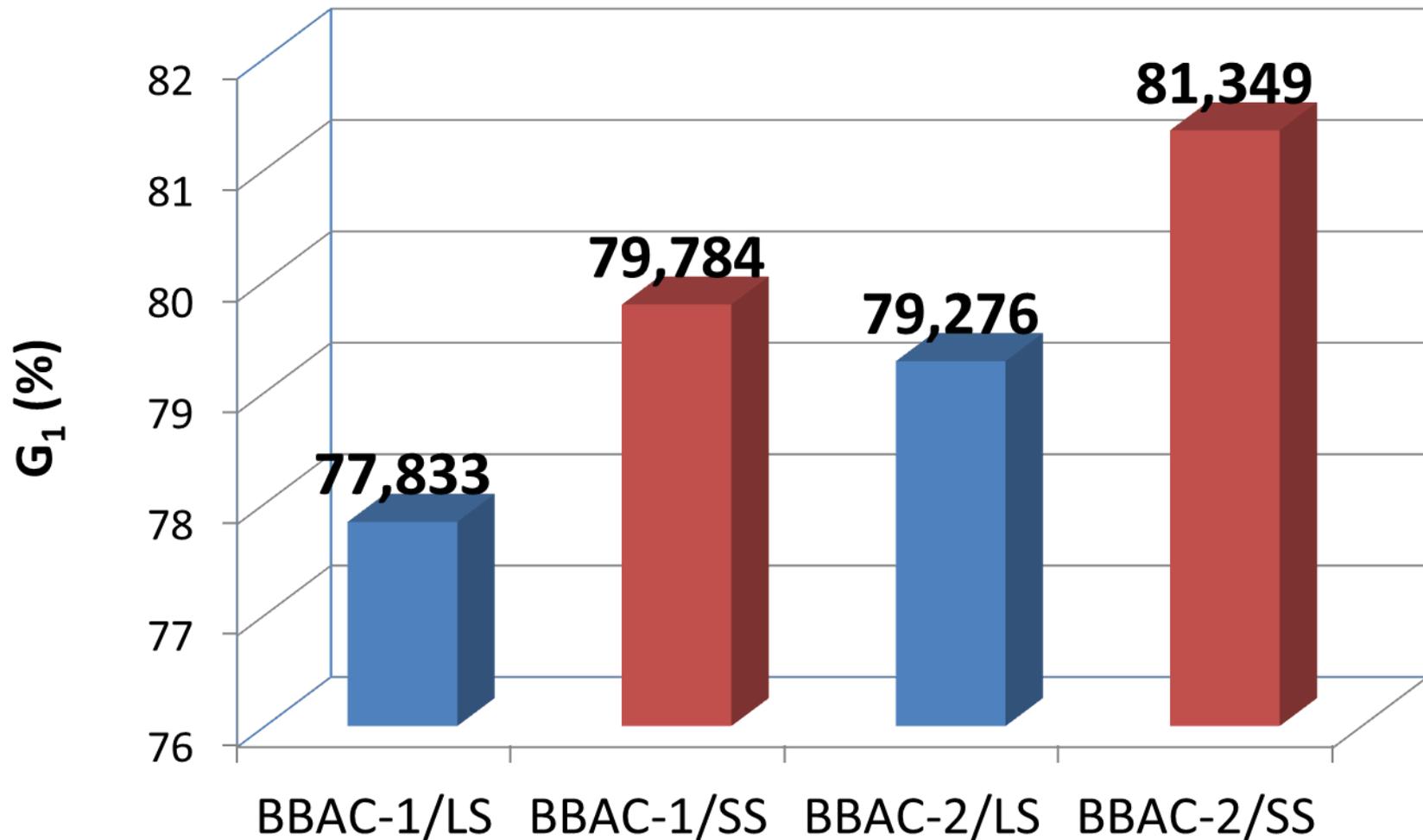
PRESSA A TAGLIO GIRATORIA



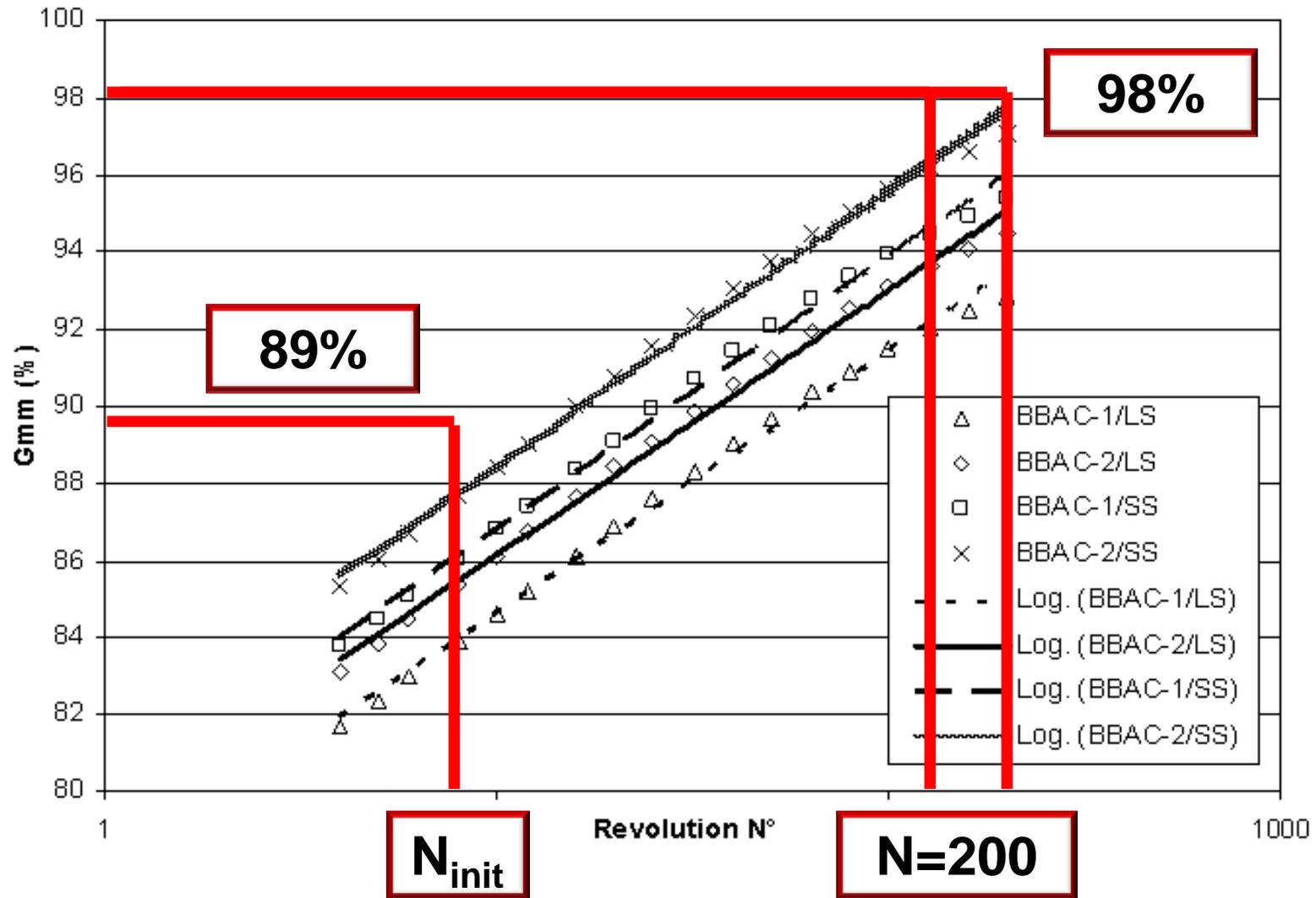
PRESSA A TAGLIO GIRATORIA



PRESSA A TAGLIO GIRATORIA



ANALISI VOLUMETRICA



CARATTERIZZAZIONE PRESTAZIONALE

Analisi di significativi parametri ingegneristici e delle più rilevanti condizioni di degrado delle pavimentazioni

➤ **RIGIDEZZA**

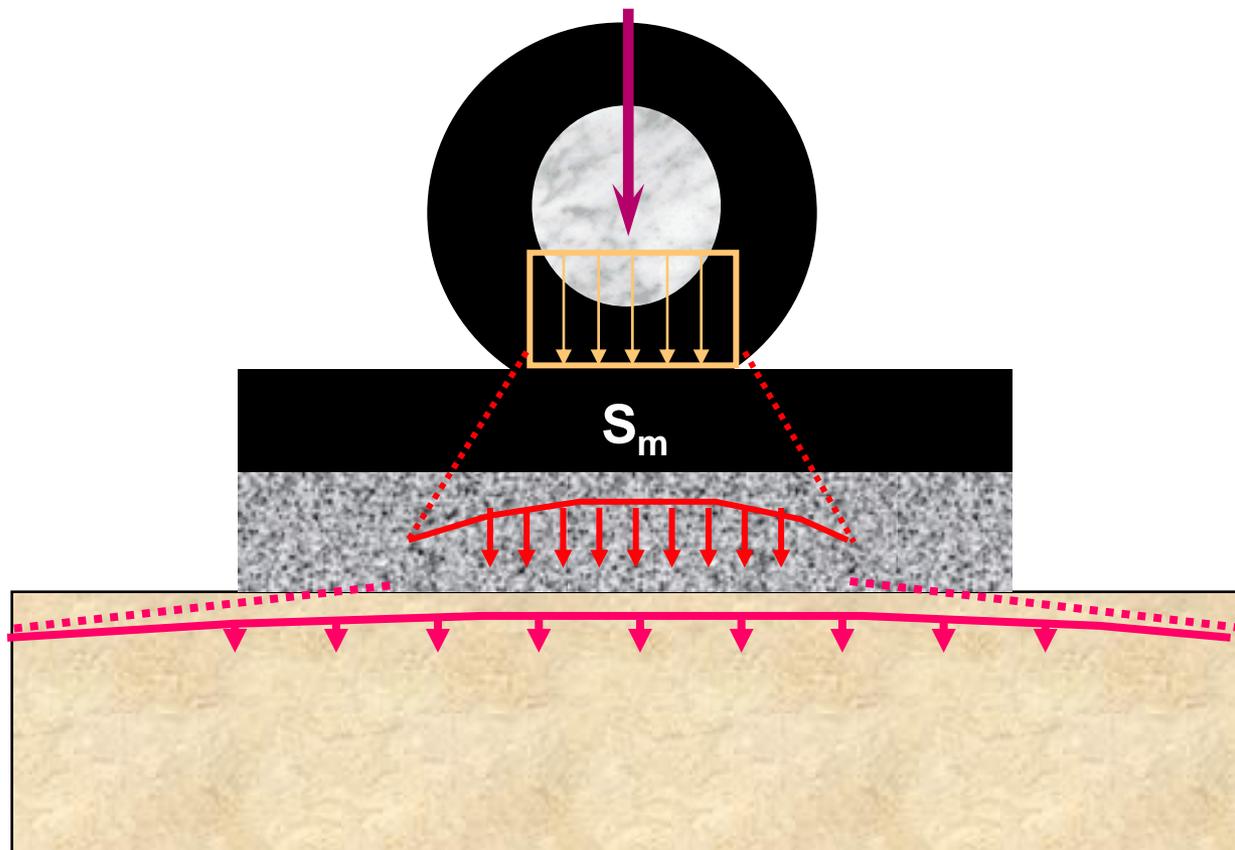
➤ **FATICA**

➤ **ORMAIAMENTO**

➤ **DURABILITA' ALL'ACQUA**

RIGIDEZZA DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

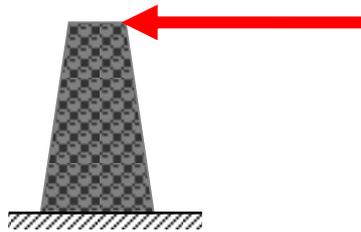
Modulo di Rigidezza (S_m): indicatore sintetico delle proprietà strutturali di una miscela



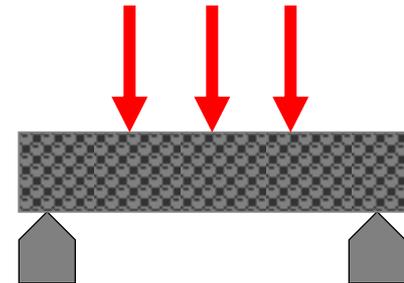
APPROCCIO PRESTAZIONALE

Modulo di Rigidezza

(EN 12697 - 26)



ANNESNO A
2 PB - TR



ANNESNO B
3/4 PB - PR



ANNESNO C
IT - CY

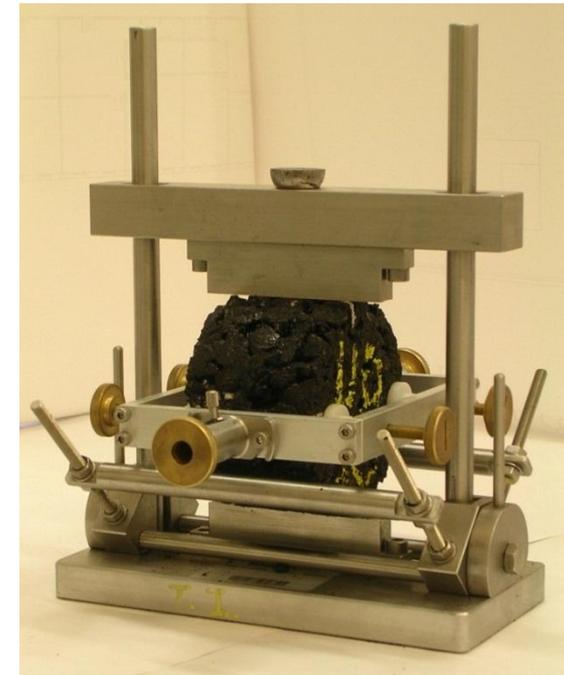
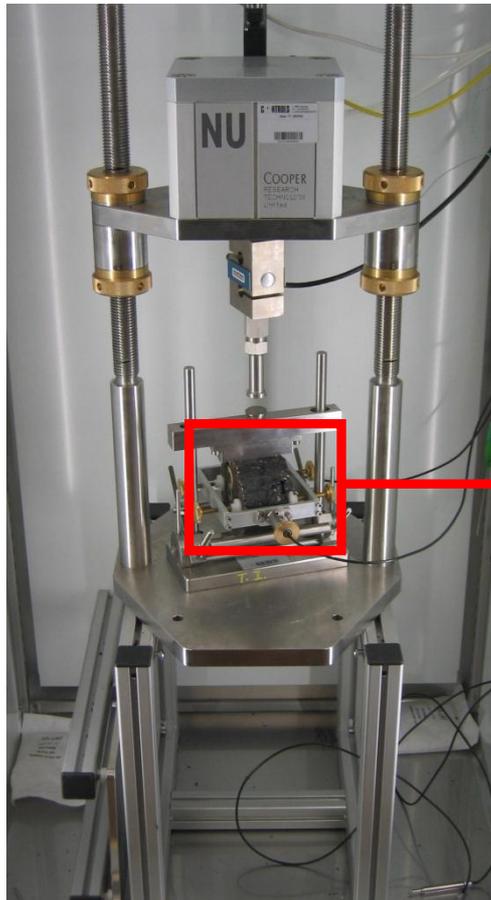


ANNESNO D / E
DTC - CY / DT - CY

APPROCCIO PRESTAZIONALE: ITSM

Modulo di Rigidezza (EN 12697 – 26, Annesso C)

Indirect Tensile Stiffness Modulus Test: ITSM

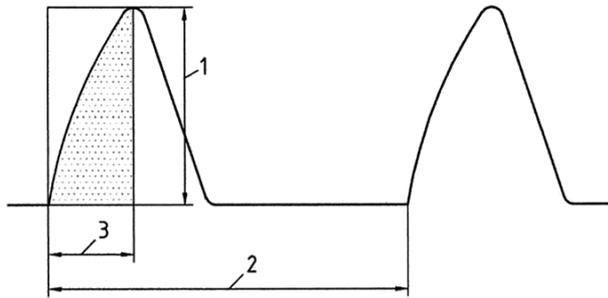


Apparecchiatura in dotazione presso il
Laboratorio Sperimentale Stradale
dell'Università di Padova

APPROCCIO PRESTAZIONALE: ITSM

Modulo di Rigidezza (EN 12697 – 26, Annesso C)

Indirect Tensile Stiffness Modulus Test: ITSM



- 1 – Carico di Picco
- 2 – Periodo di Ripetizione dell'Impulso
- 3 – Tempo di Picco

✓ Il calcolo del Modulo è basato sulla media di 5 impulsi, per ciascuno dei quali la Rigidezza è determinata come:

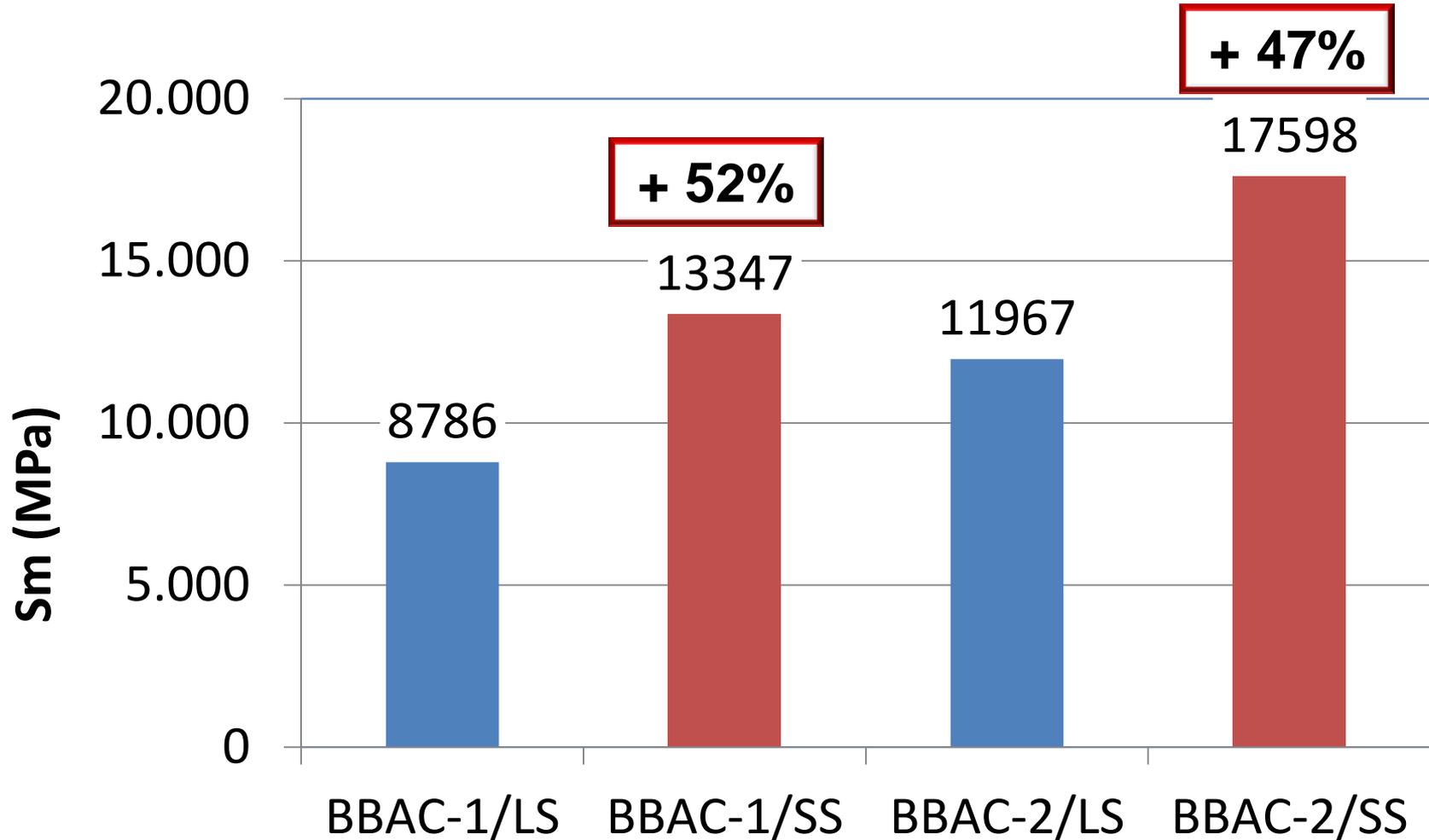
$$S_m = \frac{F(\nu + 0.27)}{z \cdot h}$$

✓ Condizioni Standard di Prova: 20°C, 124ms, 2 diametri, 10 impulsi di condizionamento, h = 5micron.



INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS

(ITSM @ 20°C; 124ms)



INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS

(CURVE MAESTRE @ 20°C)

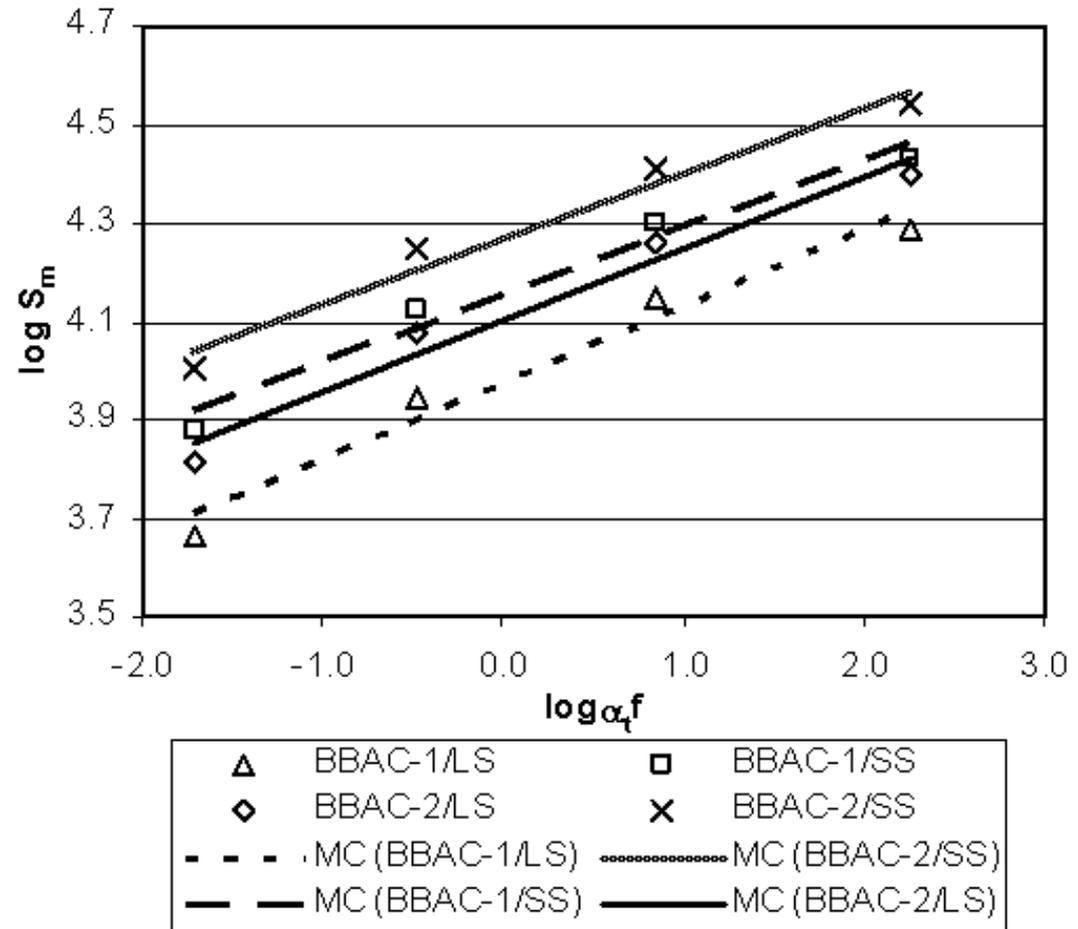
✓ Dati ITSM @ 0°C,
10°C, 20°C, 30°C

✓ Principio di
sovrapposizione
tempo-temperatura

✓ Formula Arrhenius:
 $\ln(\alpha_t) = \Delta H/R*(1/T - 1/T_s)$

✓ ΔH : energia di attivazione
apparente = 210kJ/mole

✓ R: costante universale dei
gas = 8,314 J/(K·mole)



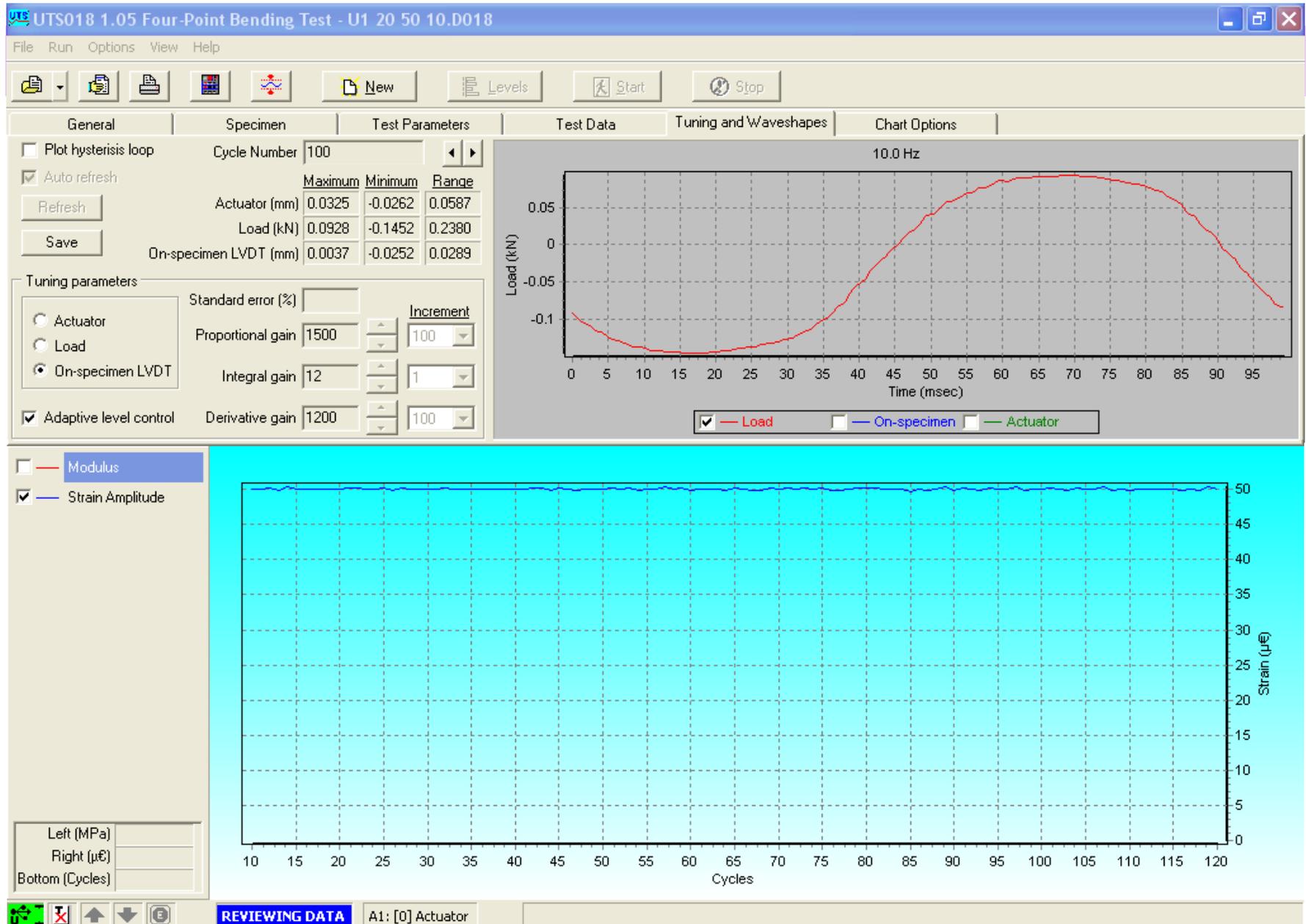
APPROCCIO PRESTAZIONALE: 4PBT

Modulo di Rigidezza (EN 12697 – 26, Annesso B)

4 Point Bending Test: 4PBT



Apparecchiatura in dotazione presso il
Laboratorio Sperimentale Stradale
dell'Università di Padova



APPROCCIO PRESTAZIONALE: 4PBT

UTS UTS018 1.05 Four-Point Bending Test - U1 20 50 10.D018

File Run Options View Help

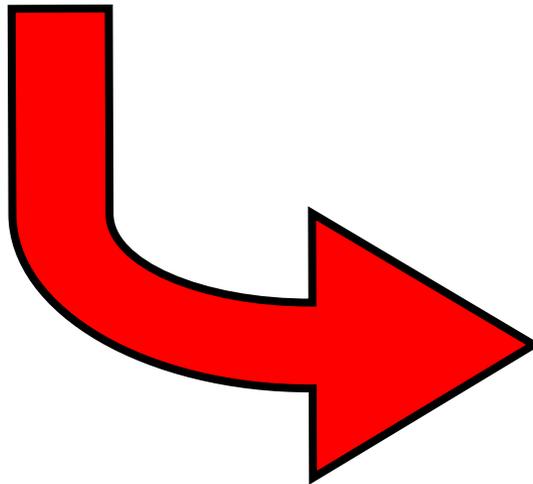
General Specimen Test Parameters Test Data

Start Date and Time	mercoledì, novembre 24, 2010, at 5.26 PM		
Loading time (hh:mm:ss)	00:00:10		
Test frequency 10.0 Hz	Initial	Current	
Cycle number	100	100	Maximum number of test cycles 120
(Complex) stiffness modulus (MPa)	6600	6600	Termination stiffness modulus 3300
Strain amplitude ($\mu\epsilon$)	50	50	
Stress amplitude (MPa)	0.330	0.330	
Phase lag (deg)	26.2	26.2	
Dissipated energy (kJ/m^2)	0.023	0.023	Cumulative dissipated energy (MJ/m^2) 0.00
Core temperature ($^{\circ}\text{C}$)	18.5	18.5	
Surface temperature ($^{\circ}\text{C}$)	19.2	19.2	
Force amplitude (N)	119	119	
Deflection amplitude (mm)	0.029	0.029	
Measured phase lag (deg)	26.3	26.3	



FATICA NELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI

Danno per Fatica:
FESSURAZIONE



APPROCCIO PRESTAZIONALE: ITFT

Prova di Fatica a Trazione Indiretta (EN 12697-24, Annesso E)

Indirect Tensile Fatigue Test: ITFT



Apparecchiatura in dotazione presso il Laboratorio Sperimentale Stradale dell'Università di Padova

Risultati della prova:

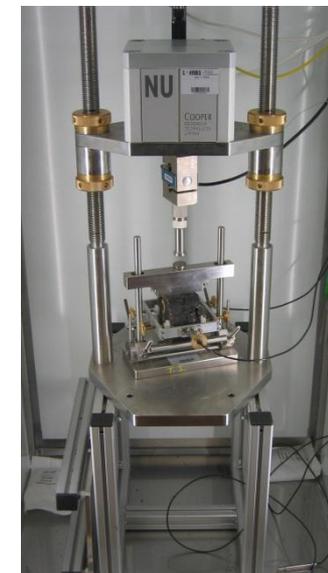
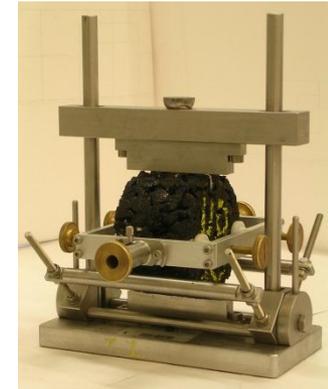
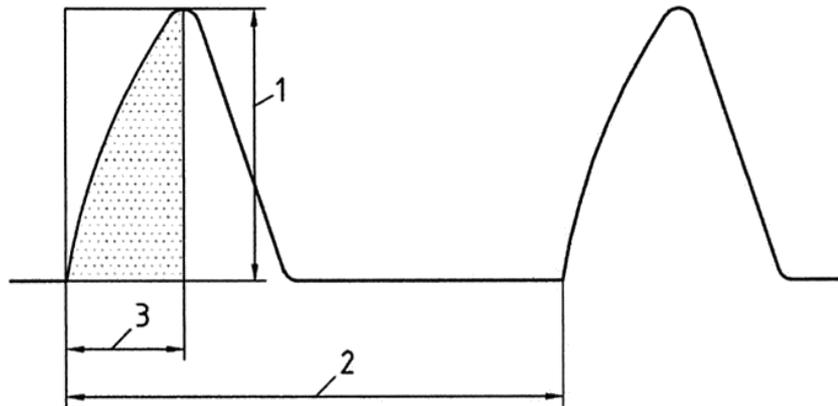
- Deformazione verticale a rottura
- N° di impulsi di carico

Condizioni di prova:

- Prova di Trazione Indiretta Ripetuta
- Temperatura di prova: 20°C
- Carico: dinamico, impulsivo
- Tempo di picco: 124 msec
- Modalità di prova: a tensione imposta

APPROCCIO PRESTAZIONALE: ITST

Indirect Tensile Stiffness Test: ITST

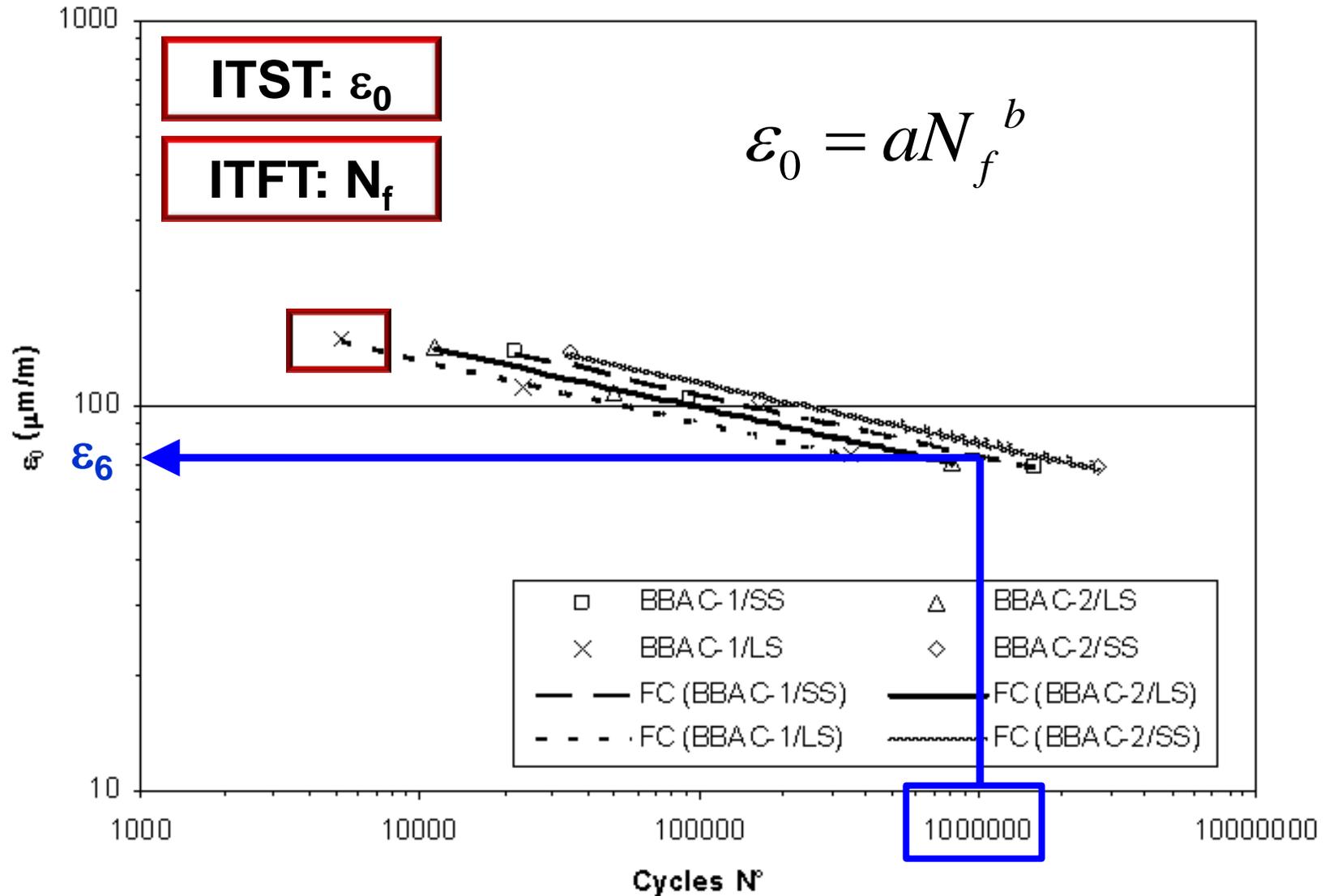


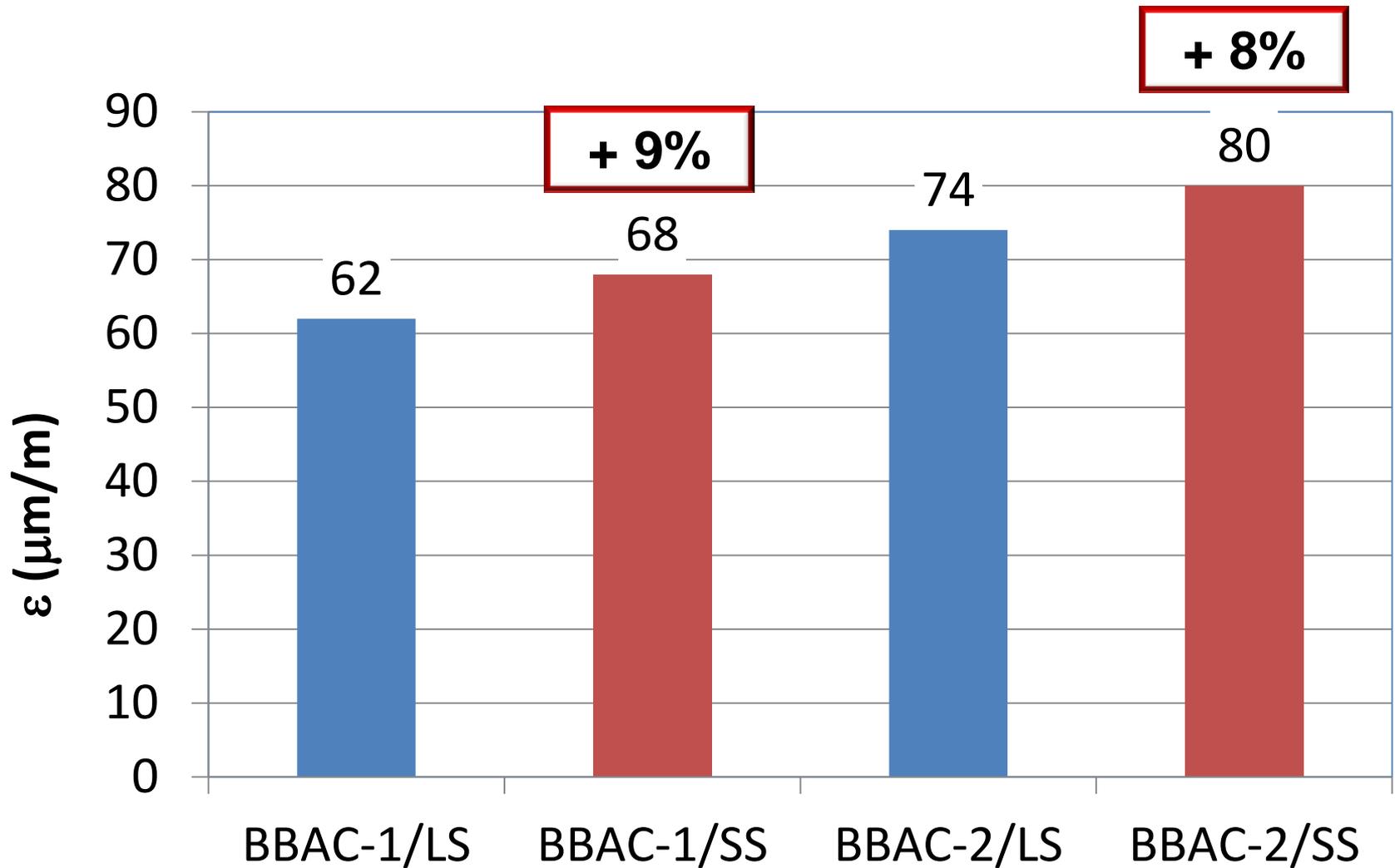
- ✓ Prova di Trazione Indiretta Ripetuta (Non distruttiva)
- ✓ Forma d'onda analoga alla ITSM:

- 1 – Carico di Picco
- 2 – Periodo di Ripetizione (3 s)
- 3 – Tempo di Picco (124 ms)

- ✓ Temperatura di prova: **20°C**
- ✓ Procedura a controllo di carico (**400, 600, 800 kPa**)

Curve di Fatica



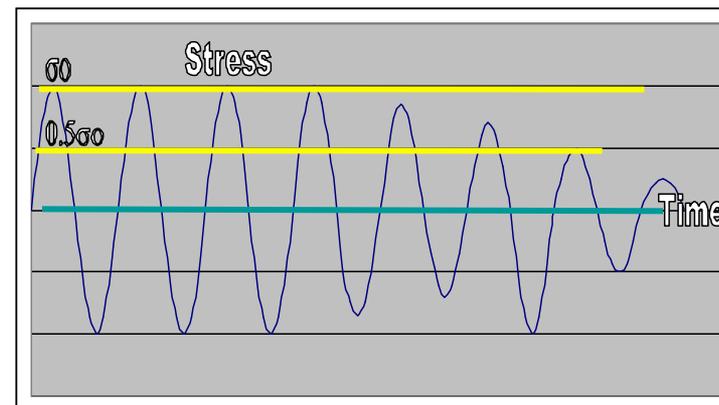
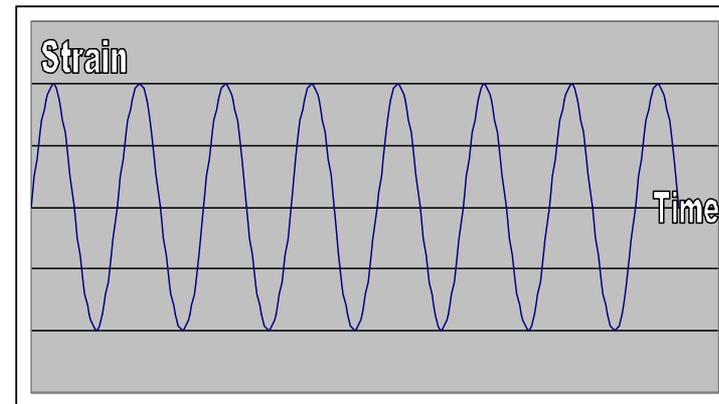
$\varepsilon @ 10^6$ cicli

APPROCCIO PRESTAZIONALE: 4PBT

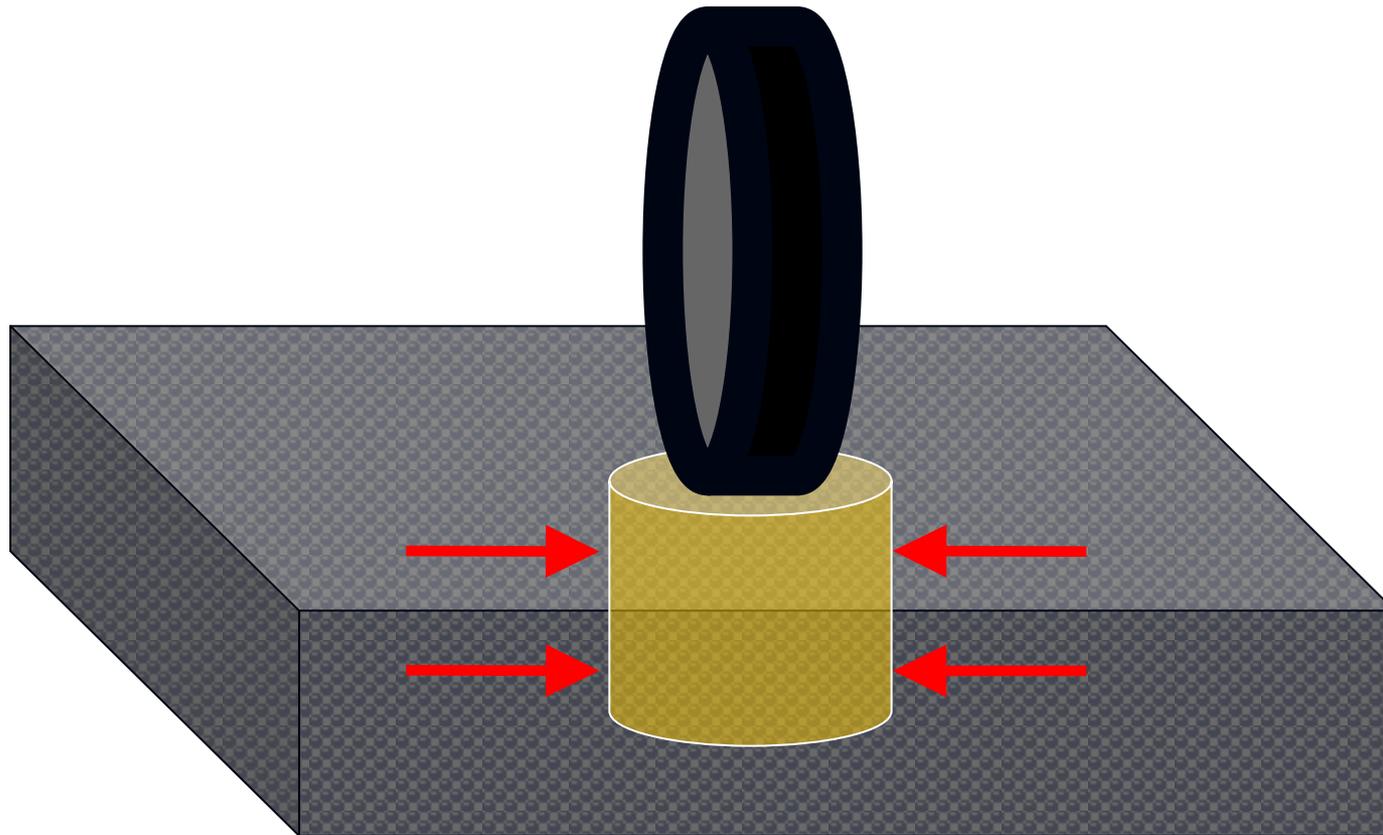
Prova di Fatica a Flessione su 4 Punti (EN 12697-24, Annesso D)



Apparecchiatura in dotazione presso il Laboratorio Sperimentale Stradale dell'Università di Padova

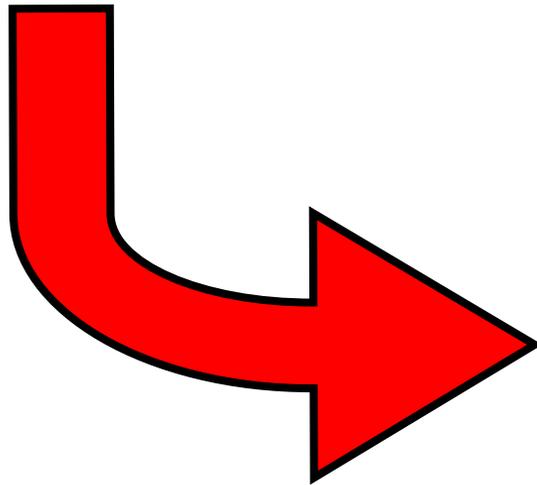


CONDIZIONI DI CONFINAMENTO IN SITU



ORMAIAMENTO DELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI

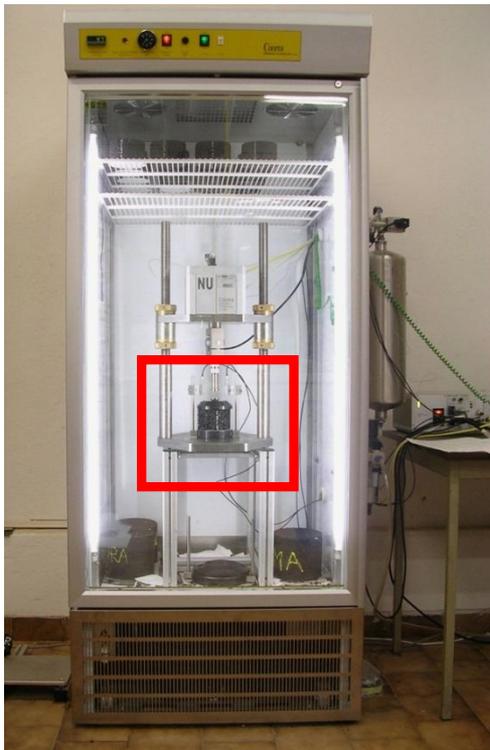
Accumulo di Deformazioni Permanenti:
ORMAIAMENTO



APPROCCIO PRESTAZIONALE: RLAT

Test Fondamentali Prova di Creep Ciclico con Confinamento

(EN 12697-25 - Metodo A)



Risultati della prova:

- Deformazione assiale

Condizioni di prova:

- Temperatura: 40°C
- Carico: Ciclico (onda quadra)
- Tempo di carico: 1 s
- Tempo di scarico: 1 s
- Numero di cicli: 3600
- Tensione di carico: 100kPa

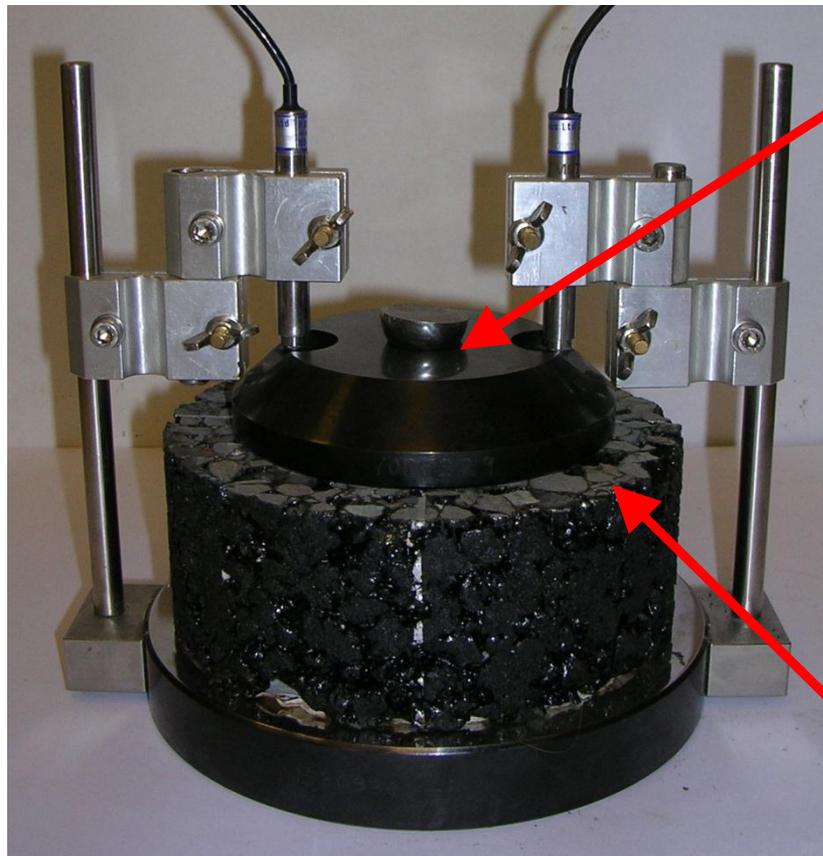
Apparecchiatura in dotazione presso il
Laboratorio Sperimentale Stradale
dell'Università di Padova

APPROCCIO PRESTAZIONALE: RLAT

Prova di Creep Ciclico con Confinamento

(Metodo A - EN 12697-25)

Dimensioni
Provino
Altezza: 60mm
Diametro: 150mm

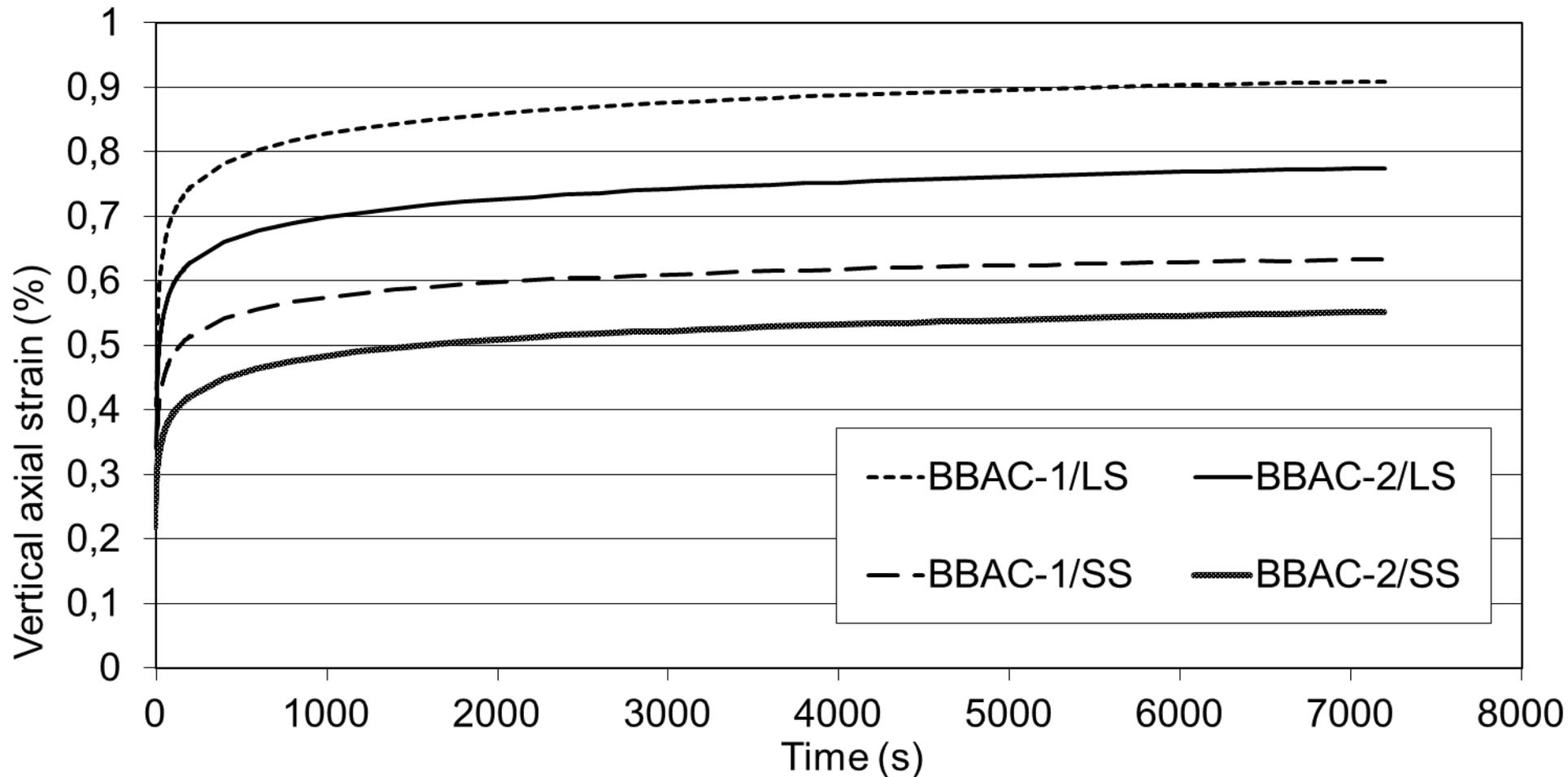


Piatto
Superiore
 $\phi=100\text{mm}$

“Anello di
Confinamento”
R=25mm

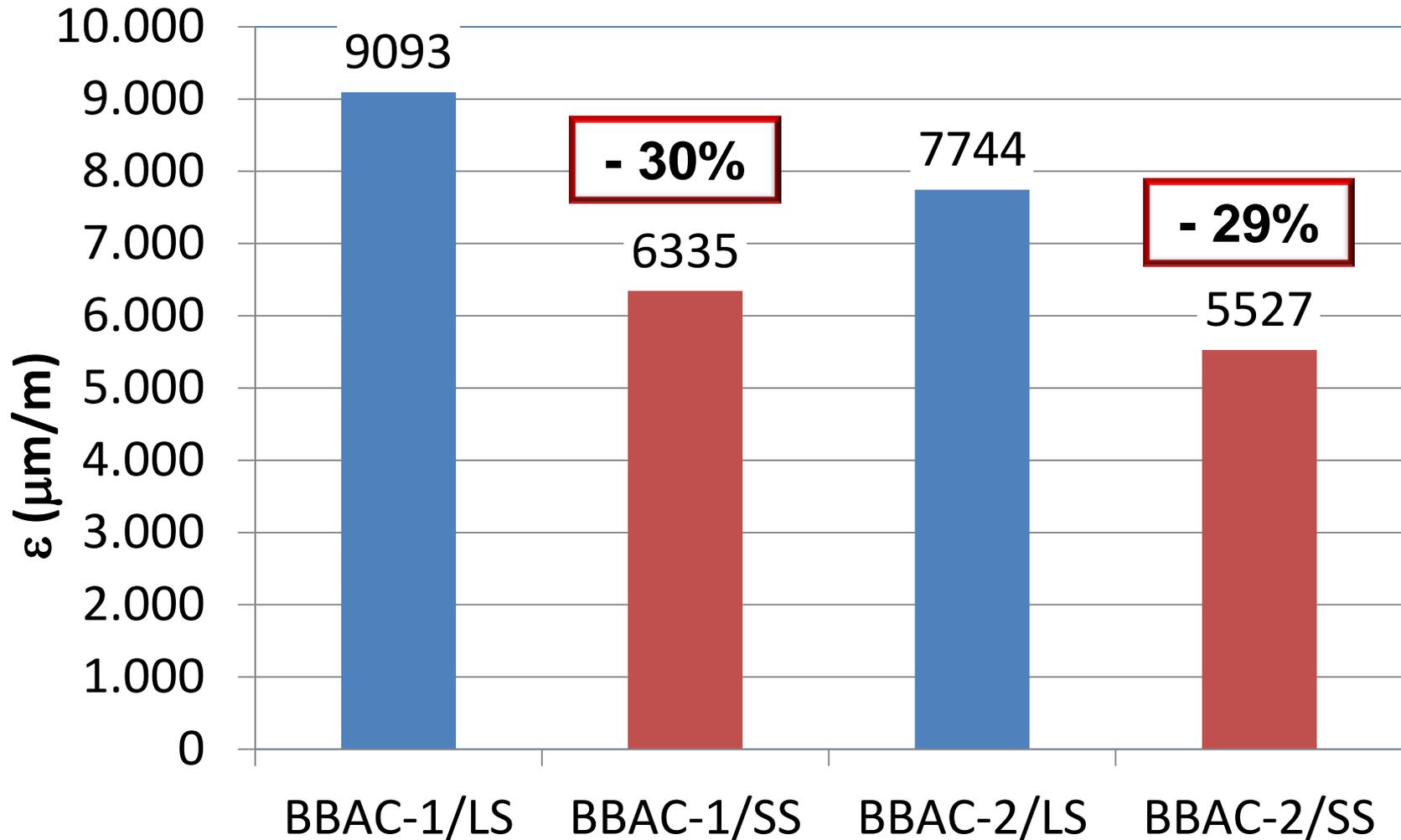
Curve di Creep

(RLAT @ 100kPa - 40°C - 3600 cicli)



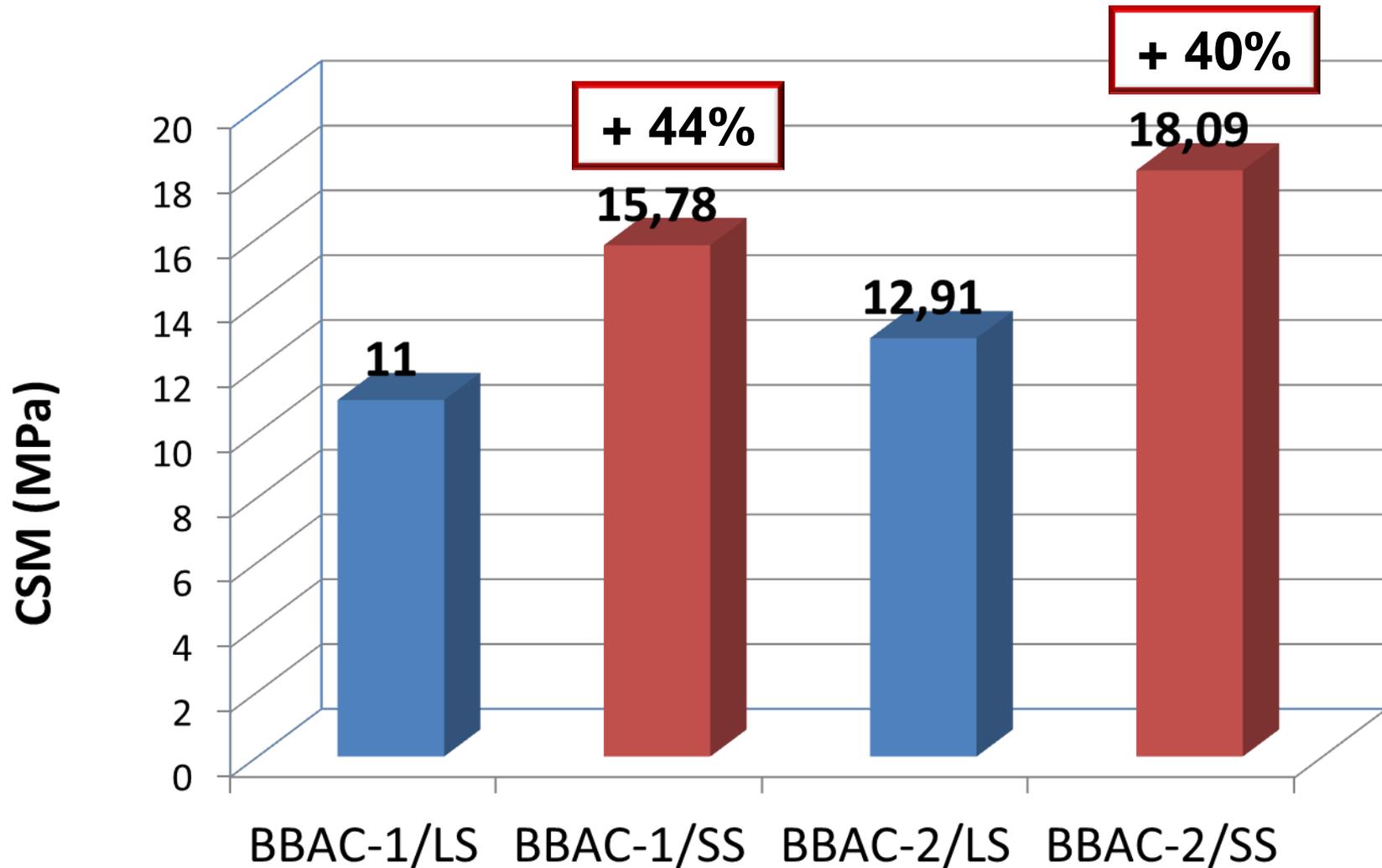
Curve di Creep

(RLAT @ 100kPa - 40°C - 3600 cicli)



Modulo di Creep

(RLAT @ 100kPa - 40°C - 3600 cicli)



APPROCCIO PRESTAZIONALE: WTT

Test Simulativi Prova di Ormaiamento (EN 12697-22)

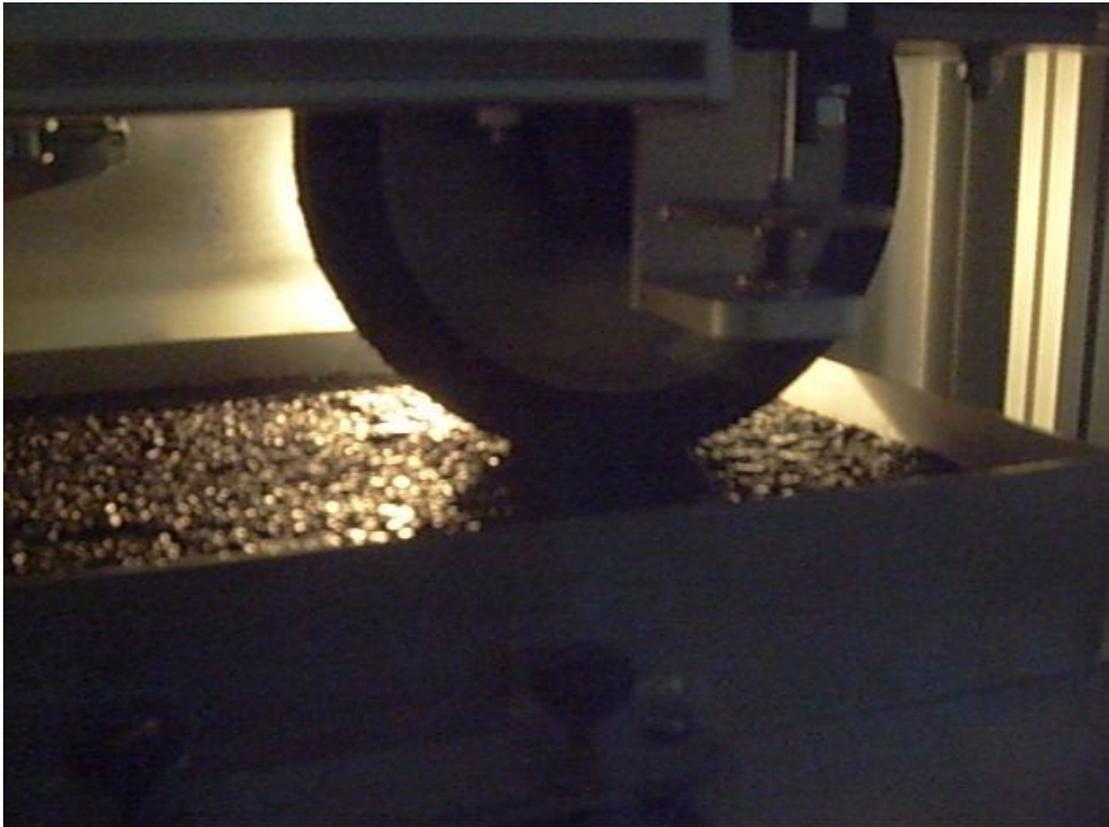


Apparecchiatura in dotazione presso il
Laboratorio Sperimentale Stradale
dell'Università di Padova

APPROCCIO PRESTAZIONALE: WTT

Test Simulativi

Prova di Ormaiamento (EN 12697-22, Procedura B)



Risultati della prova:

- Profondità ormaia

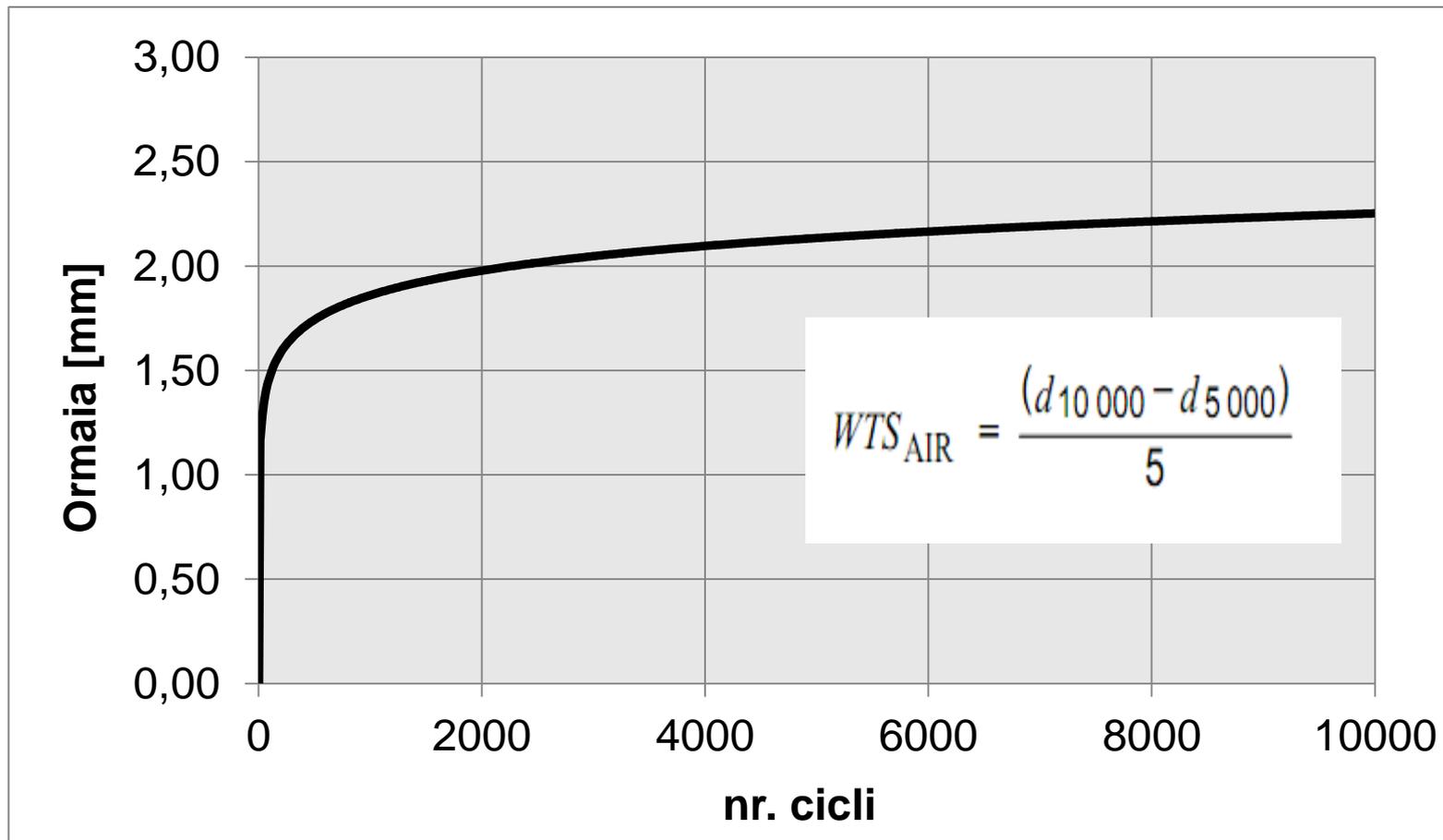
Condizioni di prova:

- Temperatura: 60°C
- Carico: 700 N
- Frequenza: 26.5 cicli/min
- Numero di cicli: 10,000

APPROCCIO PRESTAZIONALE: WTT

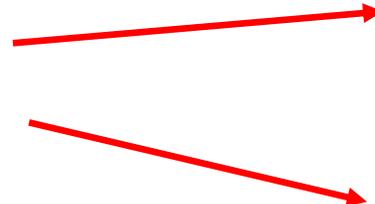
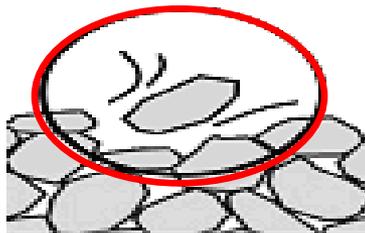
Test Simulativi

Prova di Ormaiamento (EN 12697-22, Procedura B)



DURABILITA' ALL'ACQUA

FENOMENI DI STRIPPING



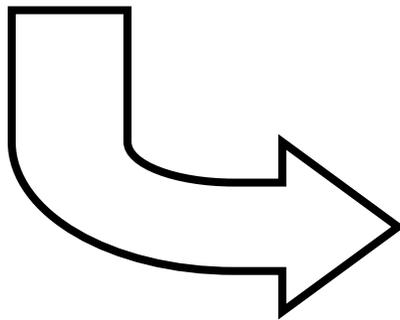
Cohesive failure

COESIONE



Adhesive failure

ADESIONE

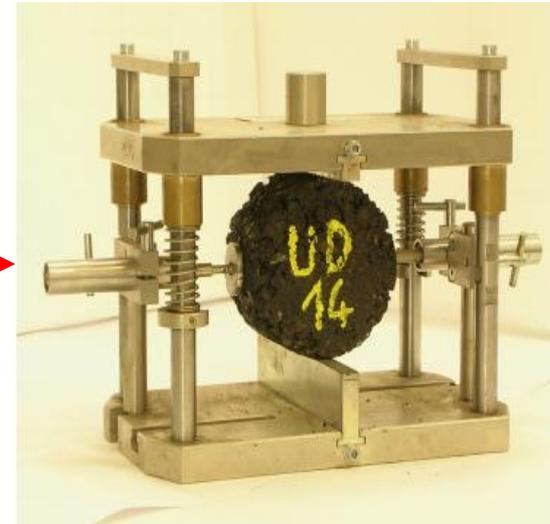
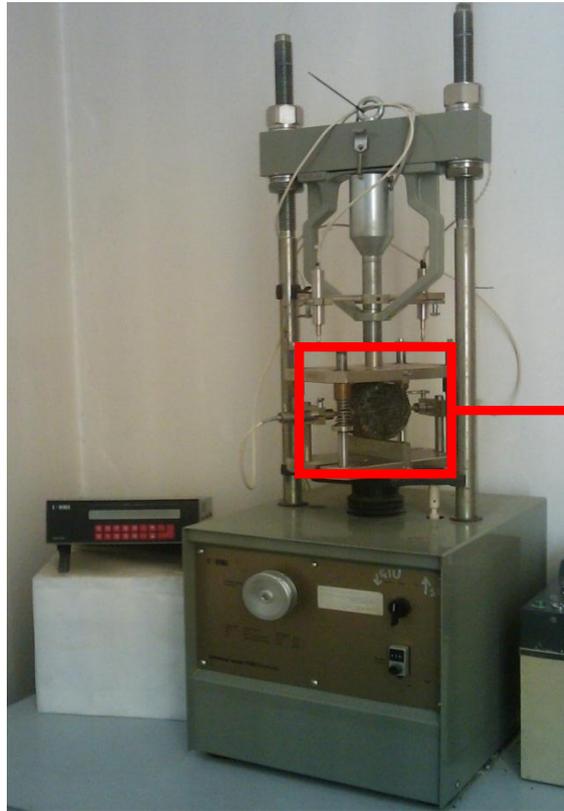


DEGRADO DELLA PAVIMENTAZIONE



TRAZIONE INDIRETTA A ROTTURA

(Prova Brasiliana in condizioni asciutte ed umide) CNR 149/92

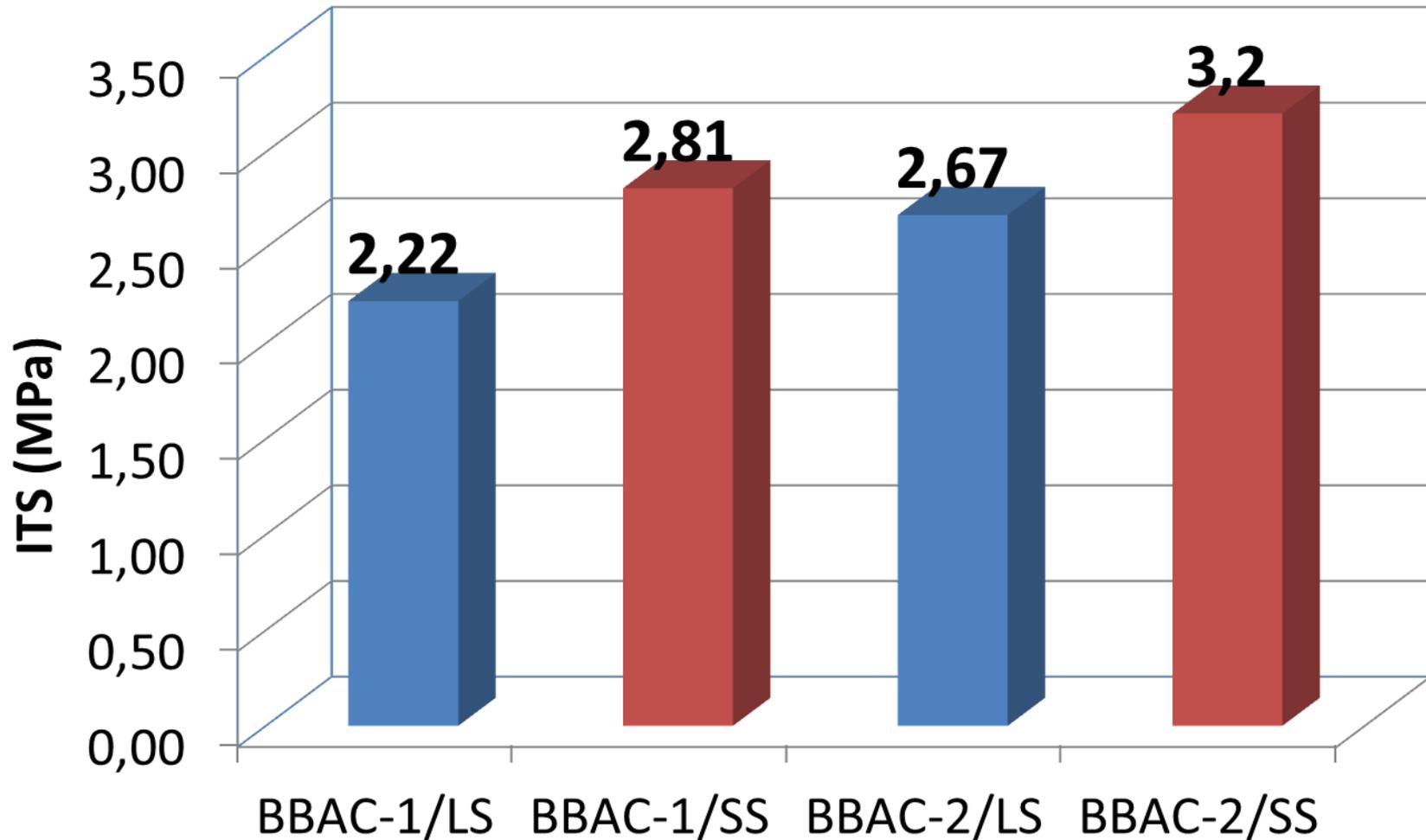


Apparecchiatura in dotazione presso il
Laboratorio Sperimentale Stradale
dell'Università di Padova

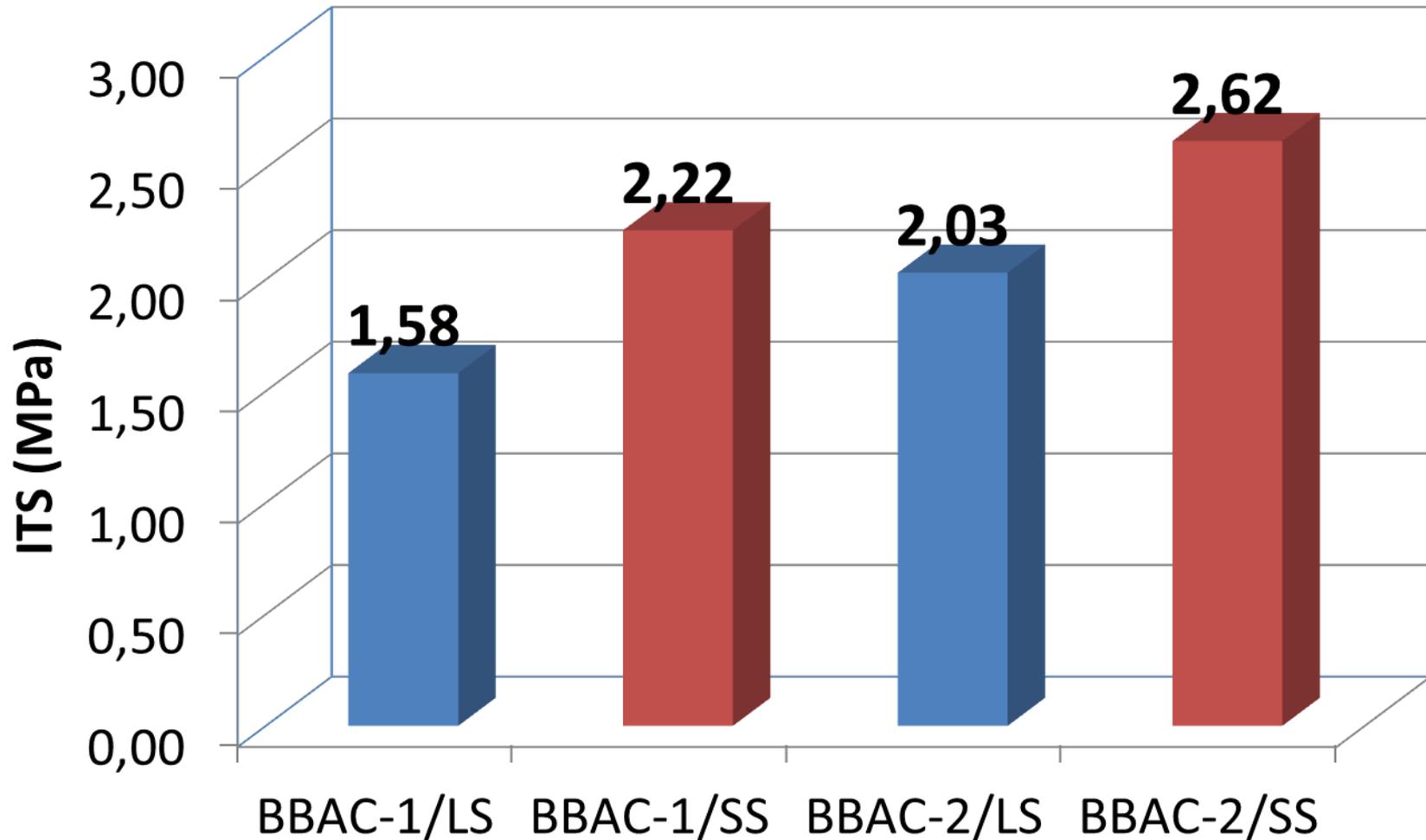
$$R_t = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot h \cdot d}$$

$$TSR = \frac{R_{tW}}{R_{tD}}$$

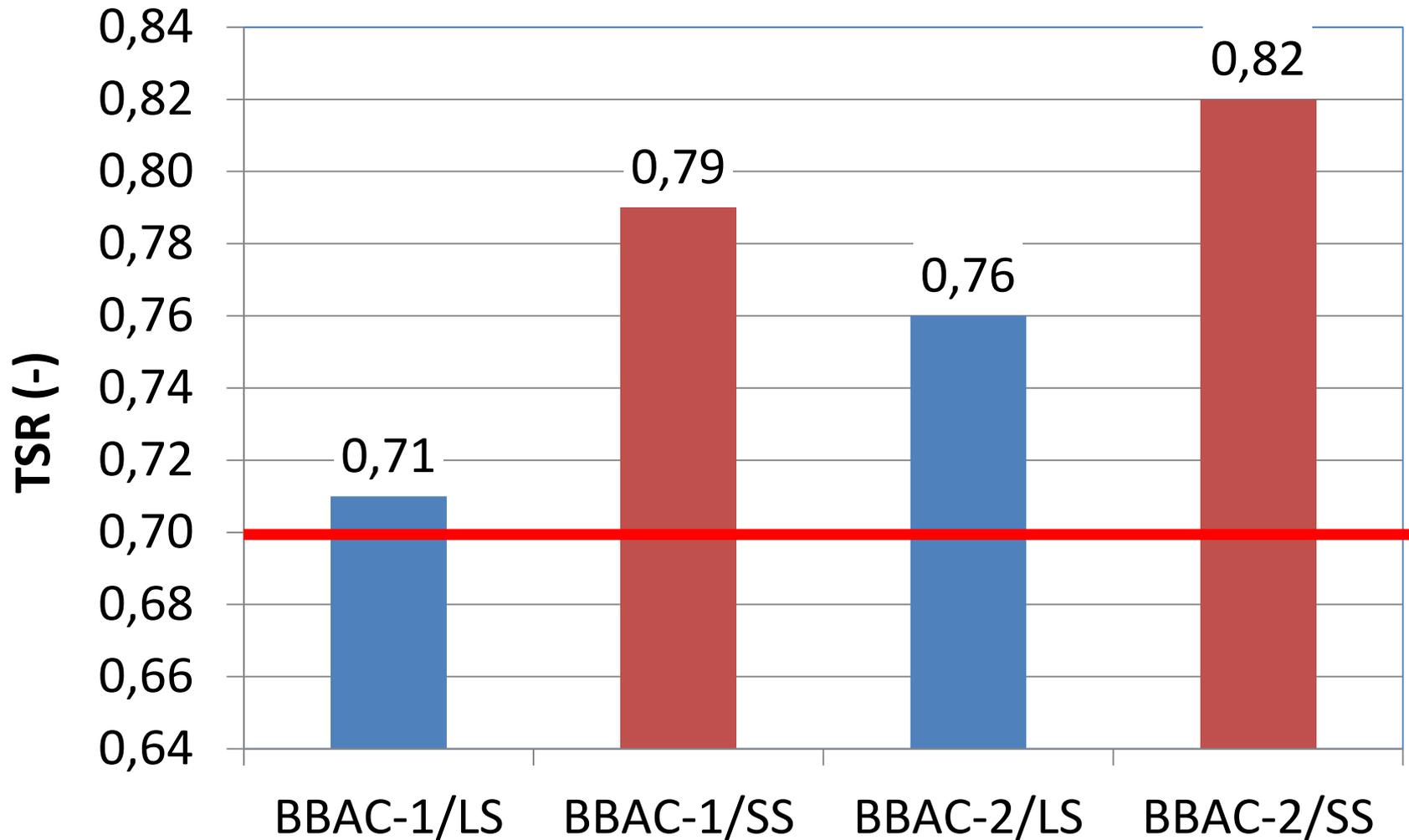
Risultati ITS DRY @ 25°



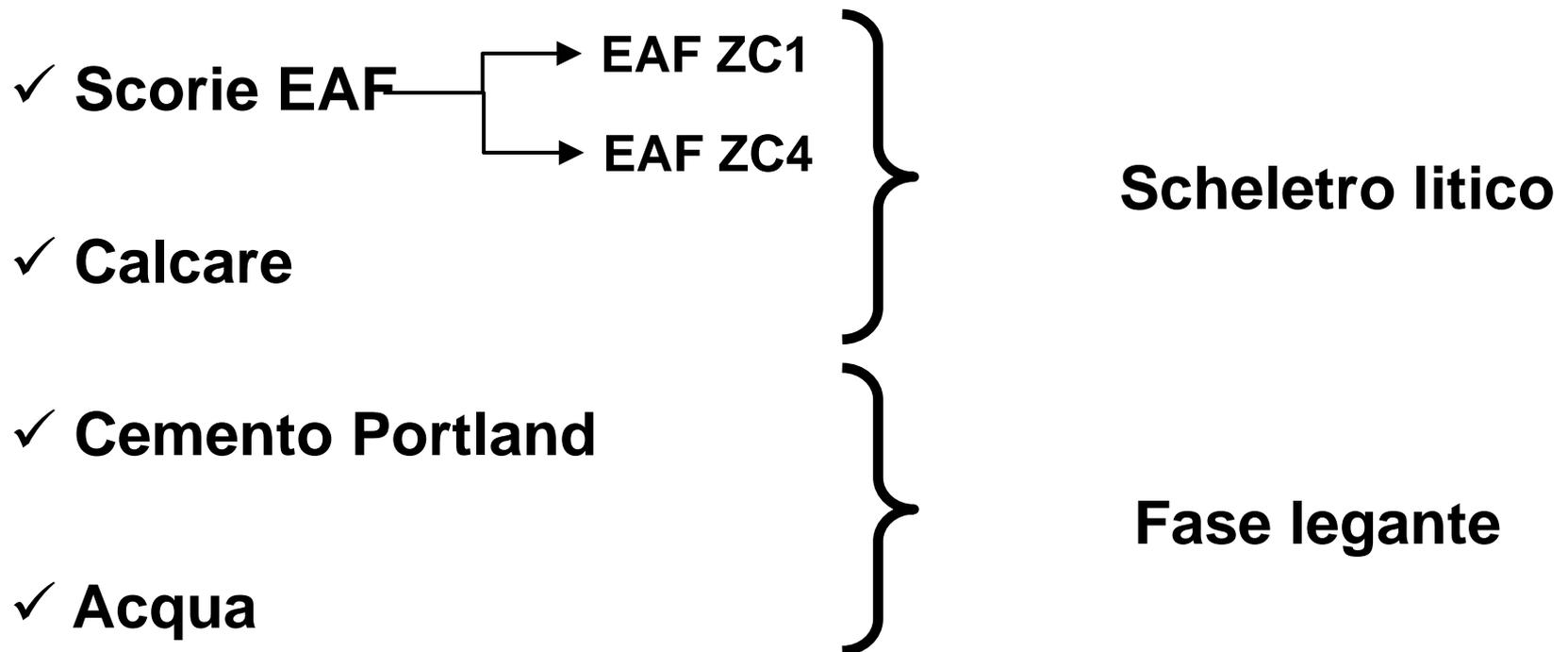
Risultati ITS SOAKED @ 25°



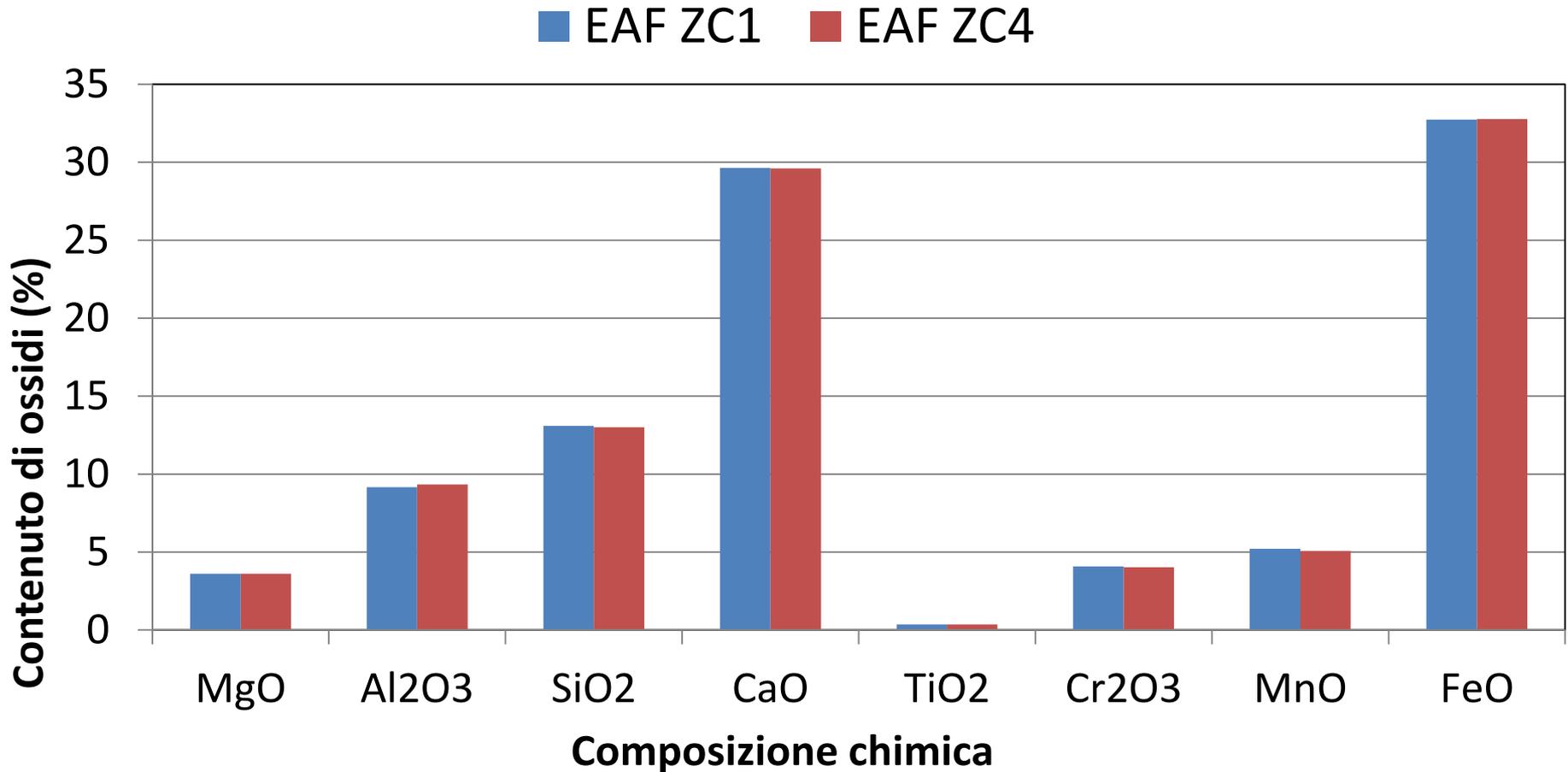
Tensile Strength Ratio (TSR)



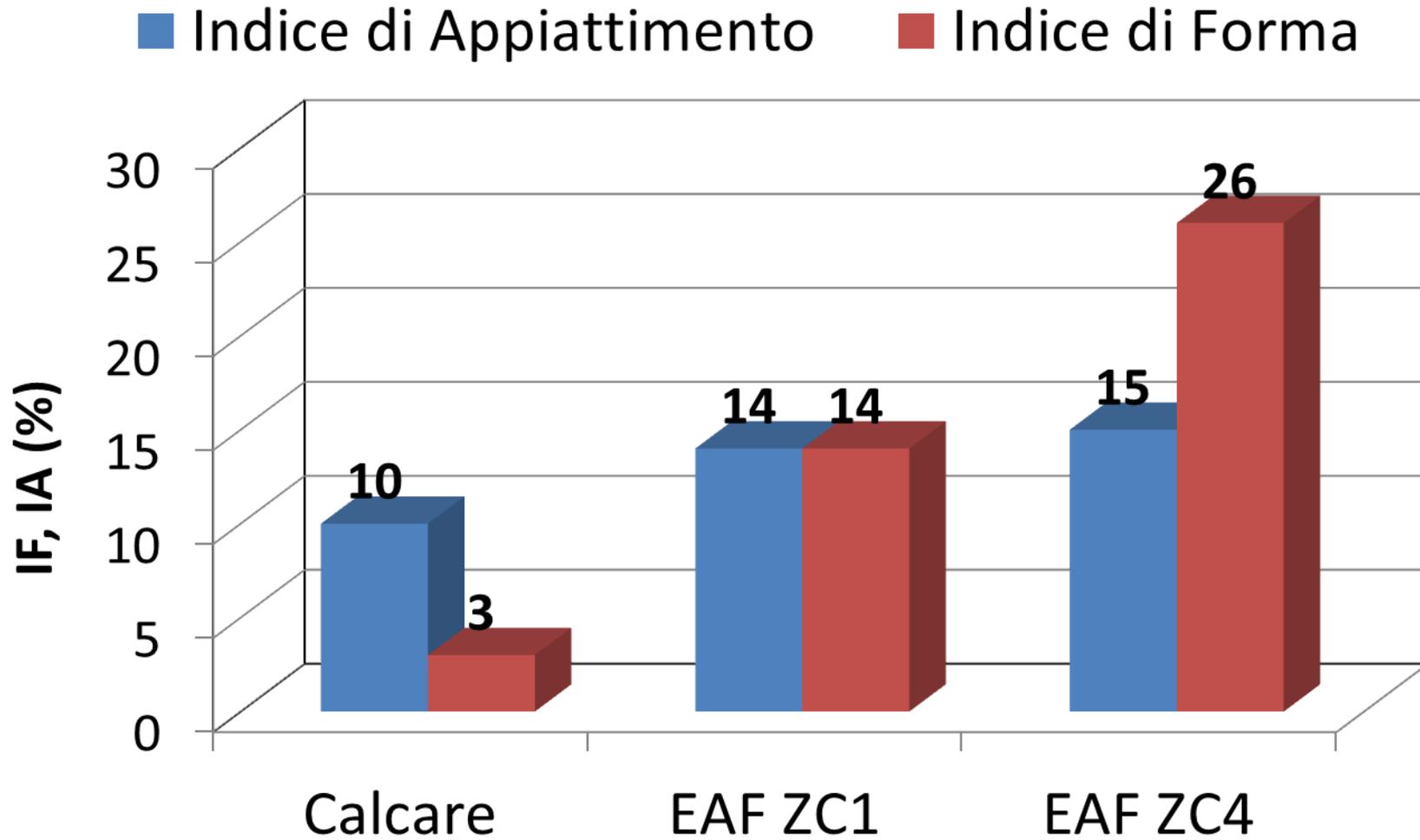
Impiego delle scorie EAF nelle miscele idrauliche per Fondazioni Stradali



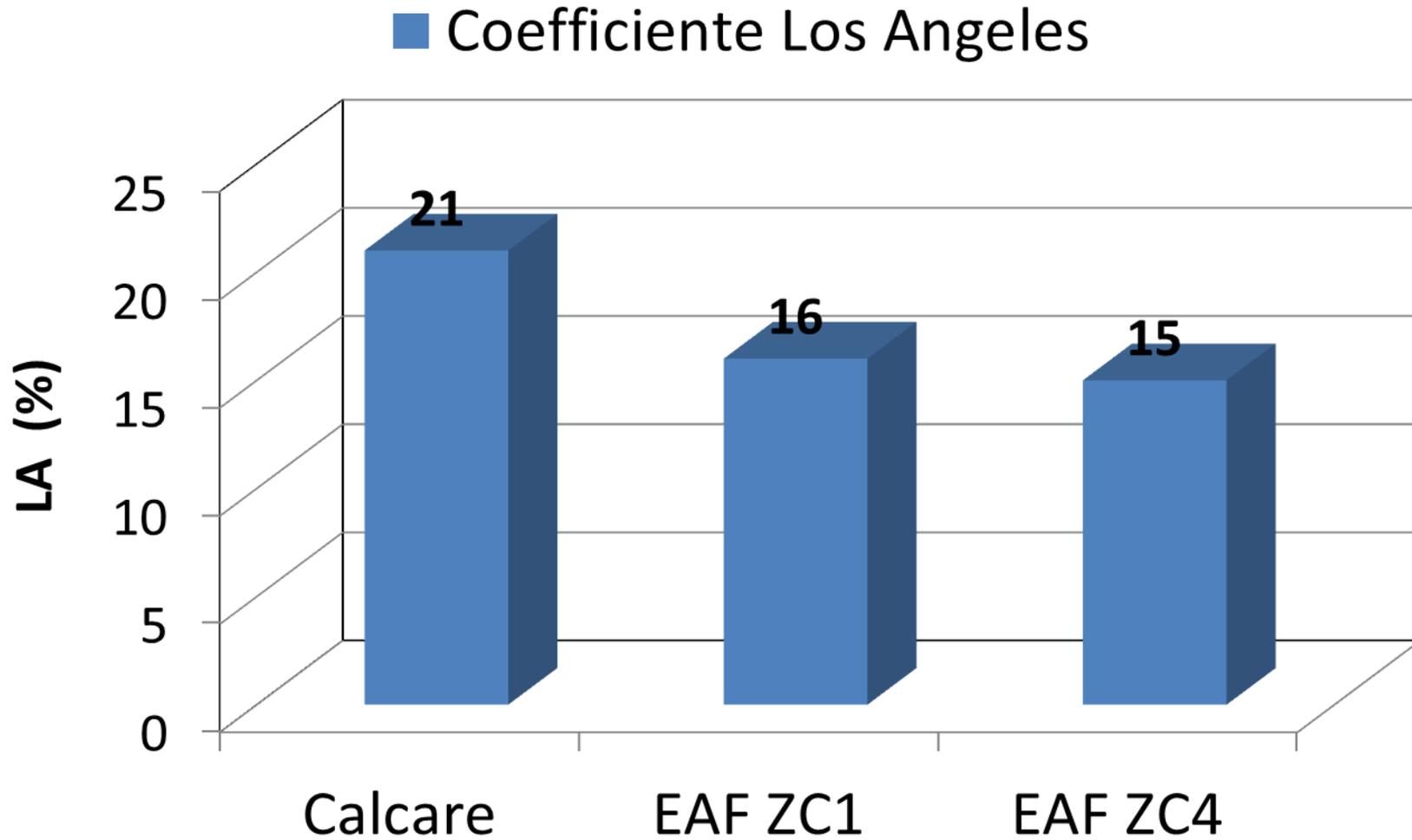
Composizione Chimica delle Scorie EAF



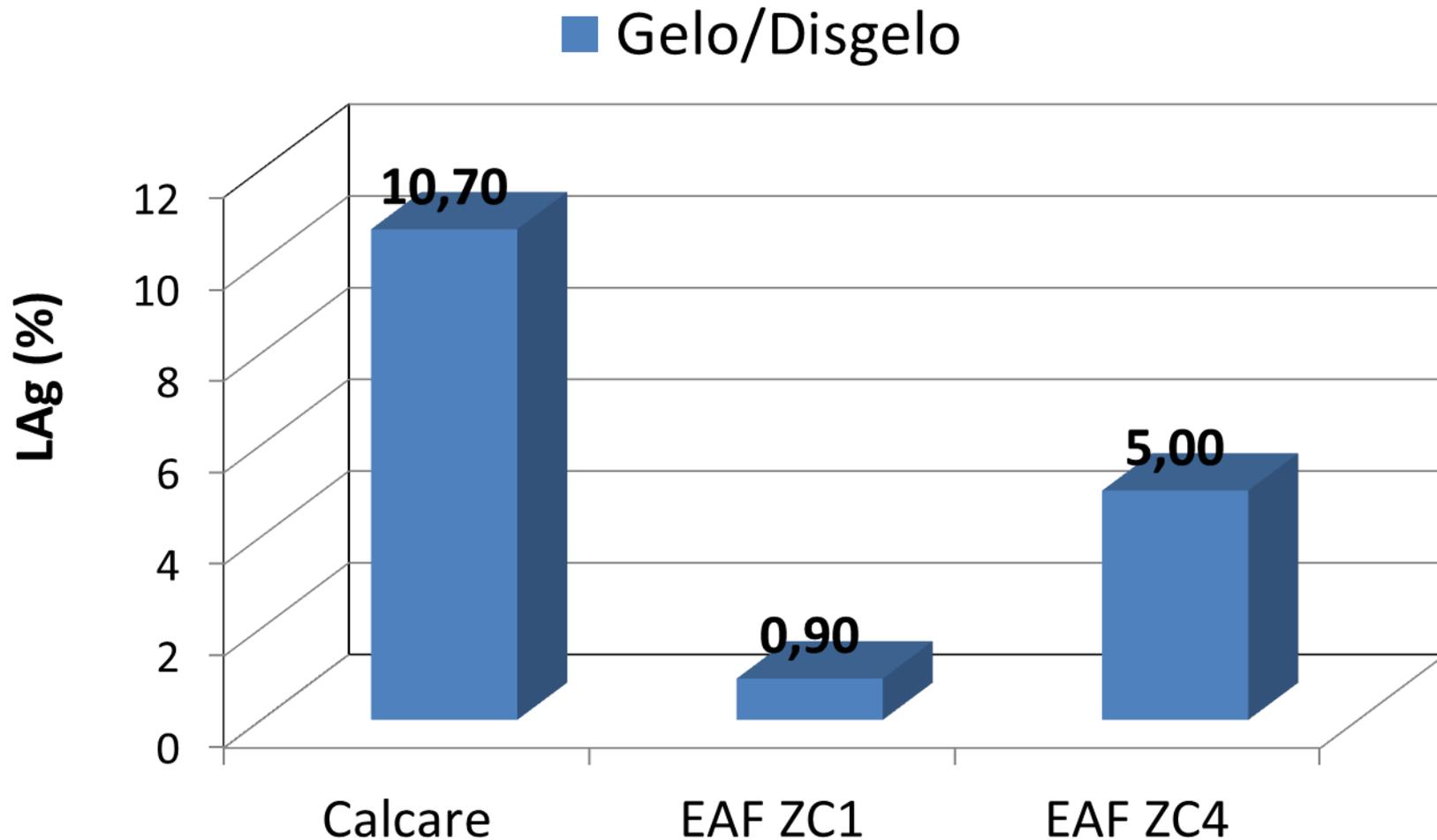
Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF



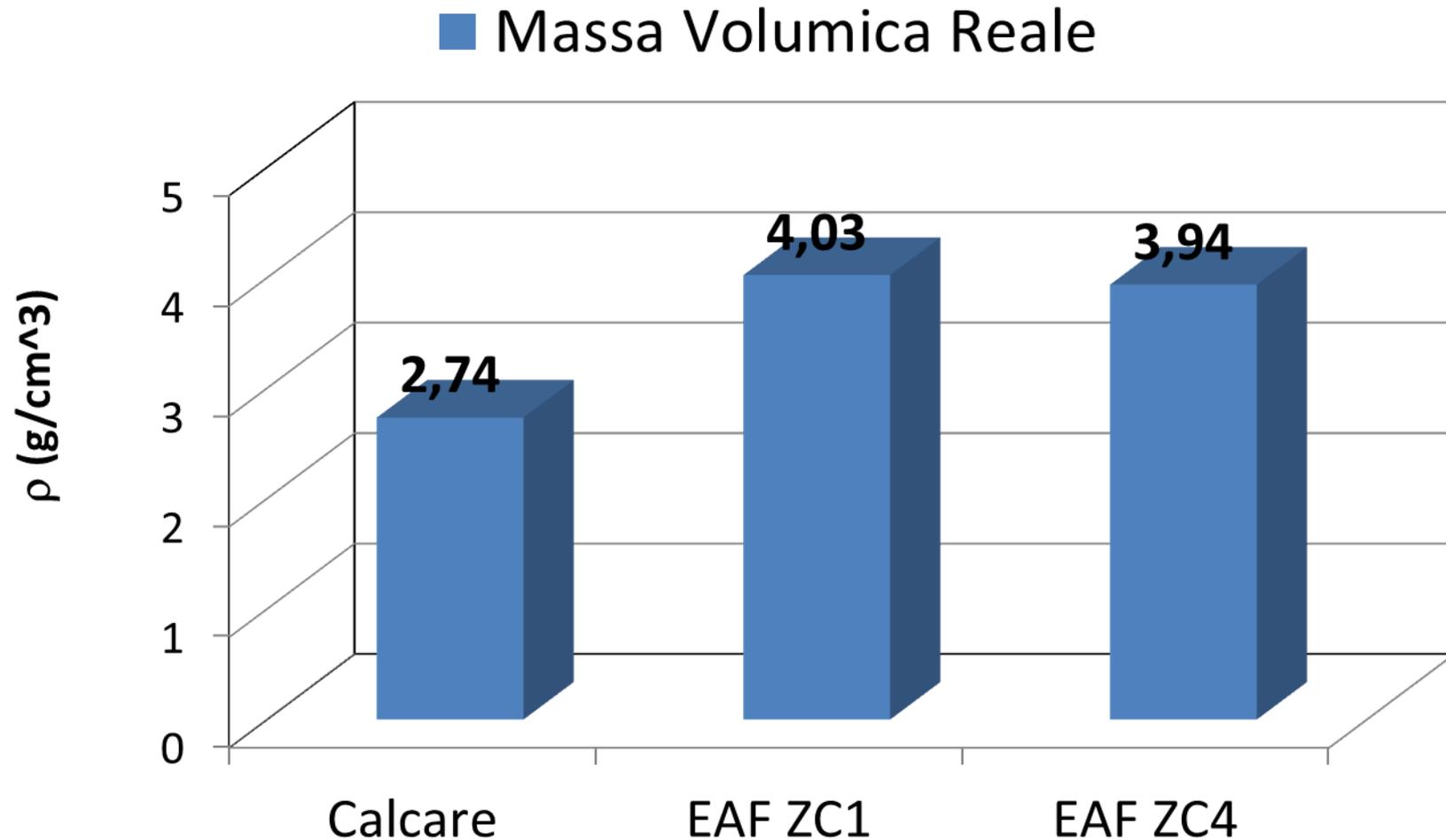
Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF



Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF

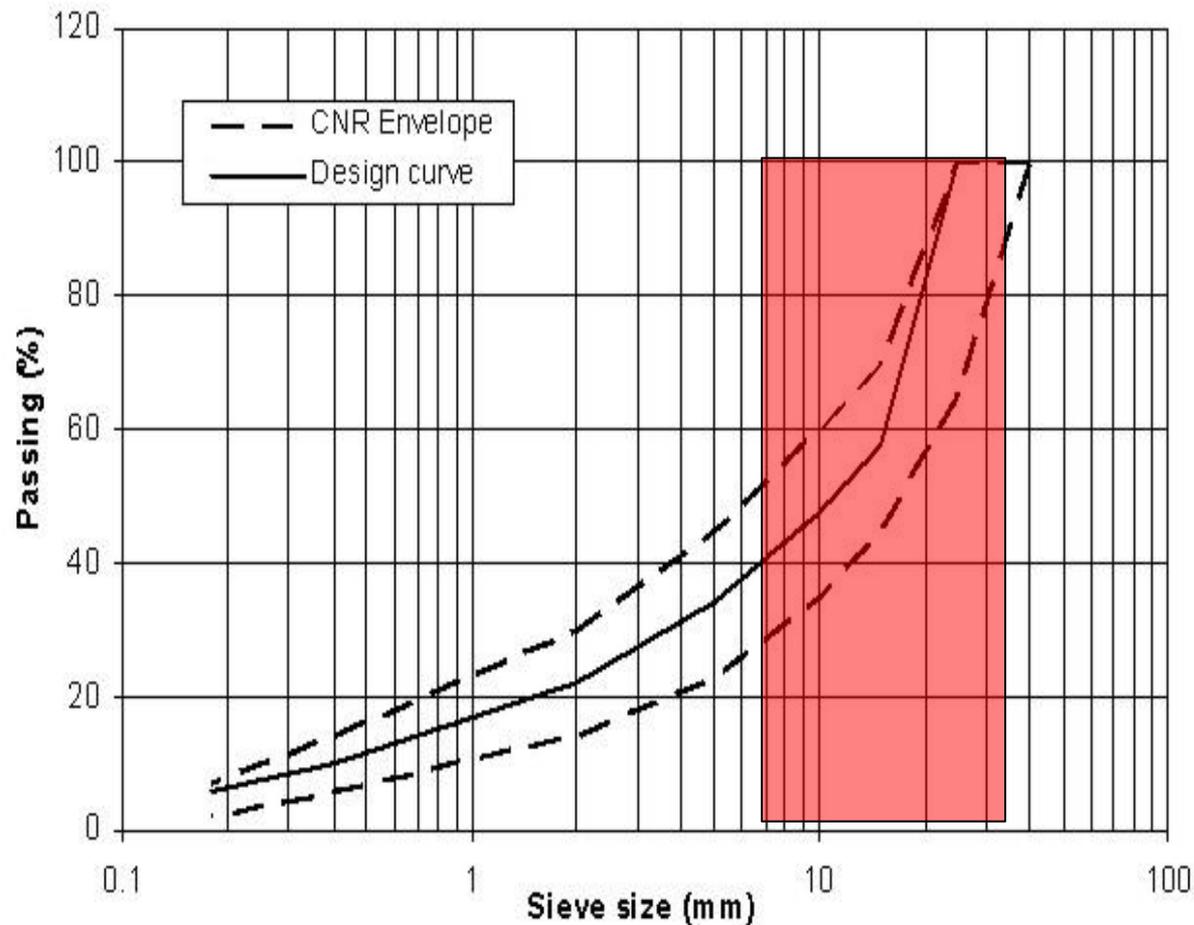


Caratteristiche Fisico-Meccaniche delle scorie EAF



Fuso di riferimento CNR e Curva di Progetto

Contenuto totale di scorie EAF: 63%



MIX DESIGN e Caratterizzazione meccanica

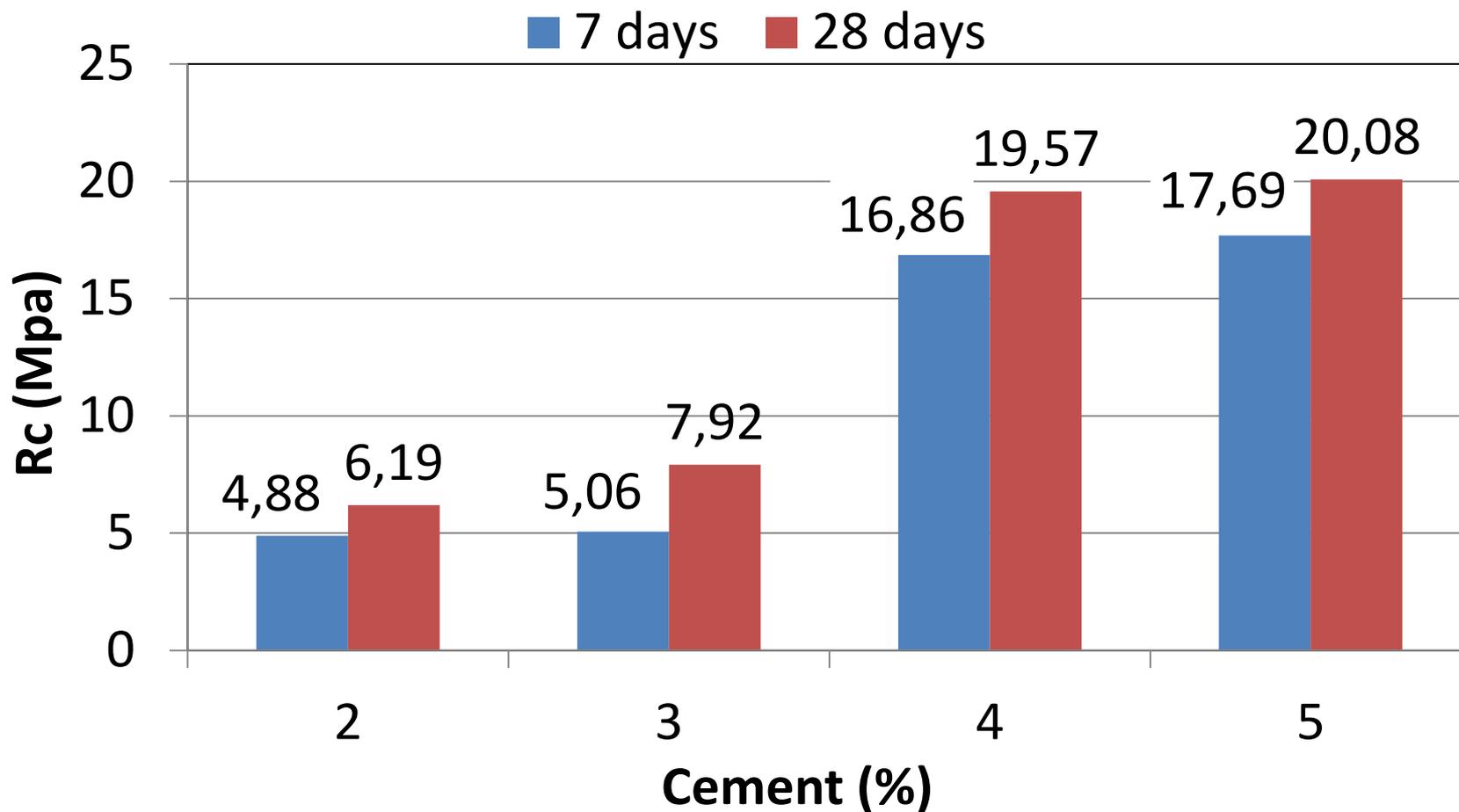
Compressione uniassiale



Apparecchiatura in dotazione presso il
Laboratorio Sperimentale Stradale
dell'Università di Padova

$$R_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \cdot r^2}$$

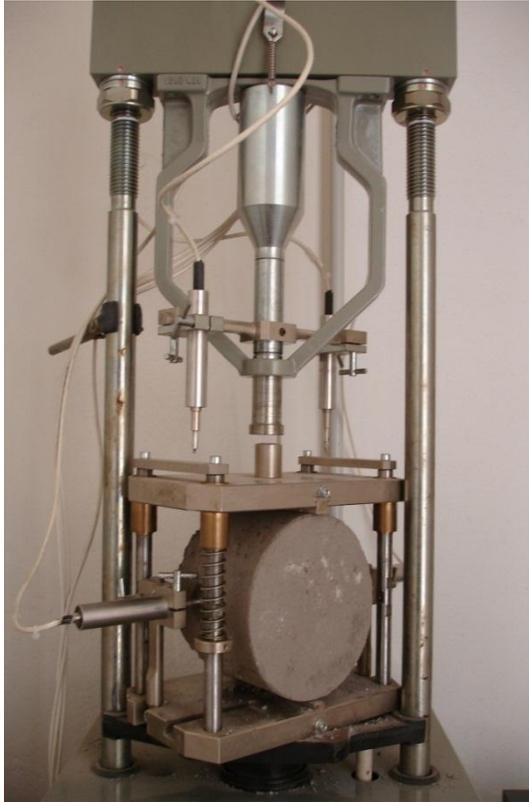
Risultati Prove di Compressione Uniassiale



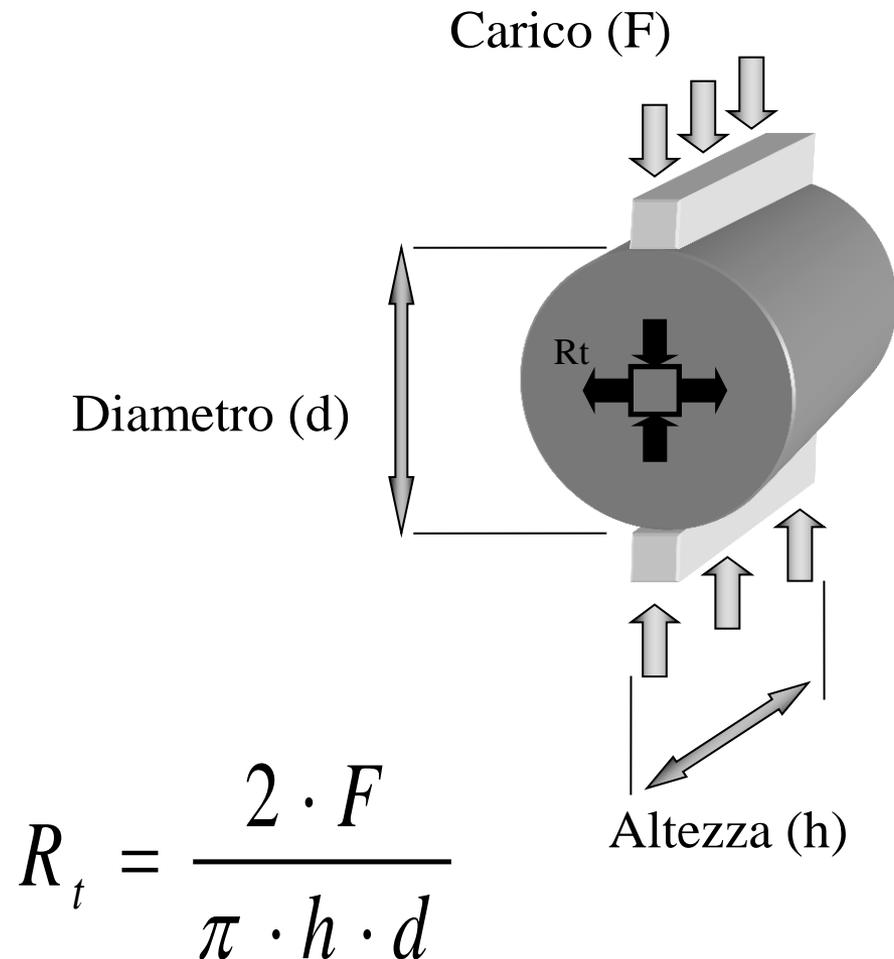
2.5 < Resistenza a Compressione @7 gg < 7.5 MPa

MIX DESIGN e Caratterizzazione meccanica

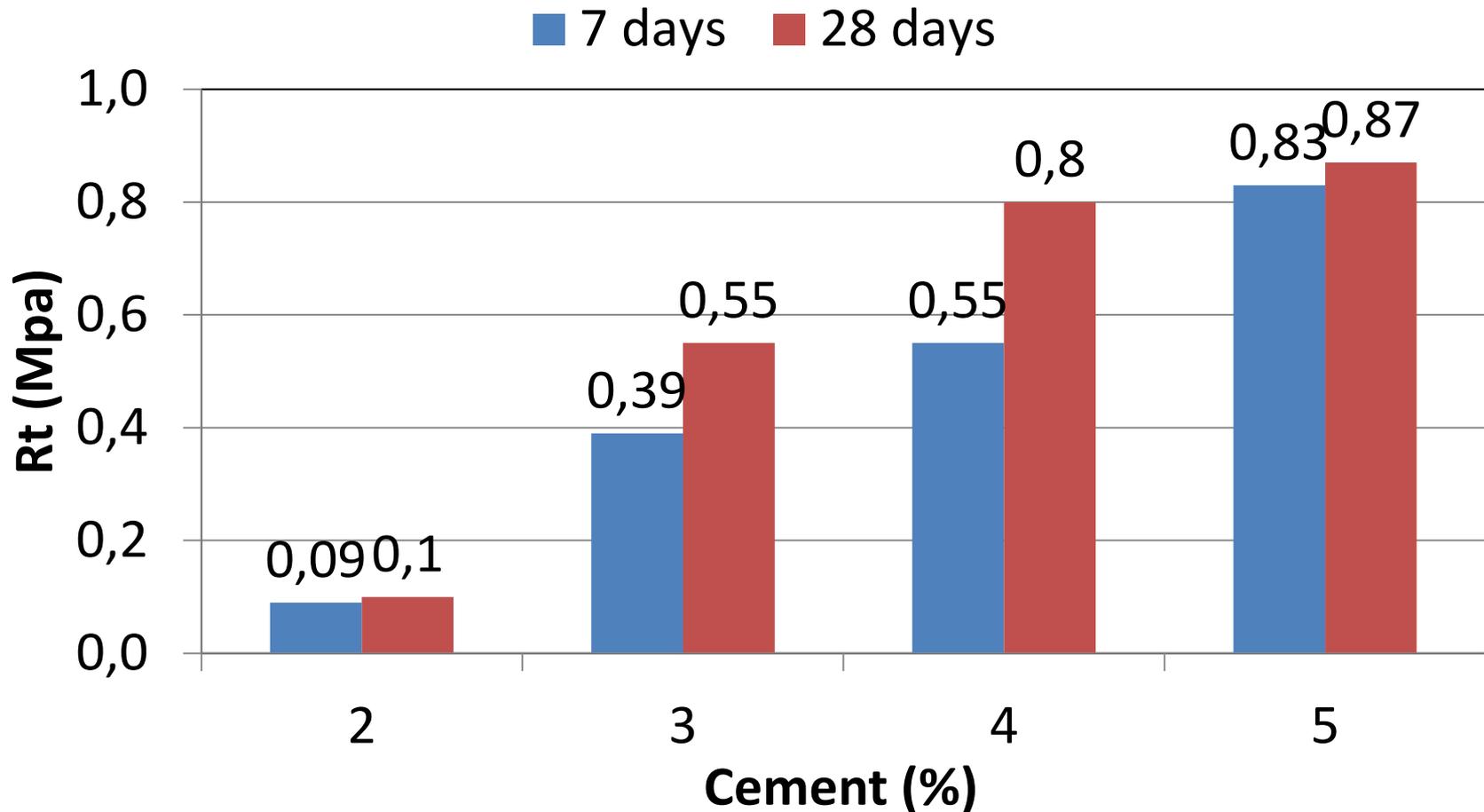
Trazione Indiretta a Rottura



Apparecchiatura in dotazione presso il
Laboratorio Sperimentale Stradale
dell'Università di Padova



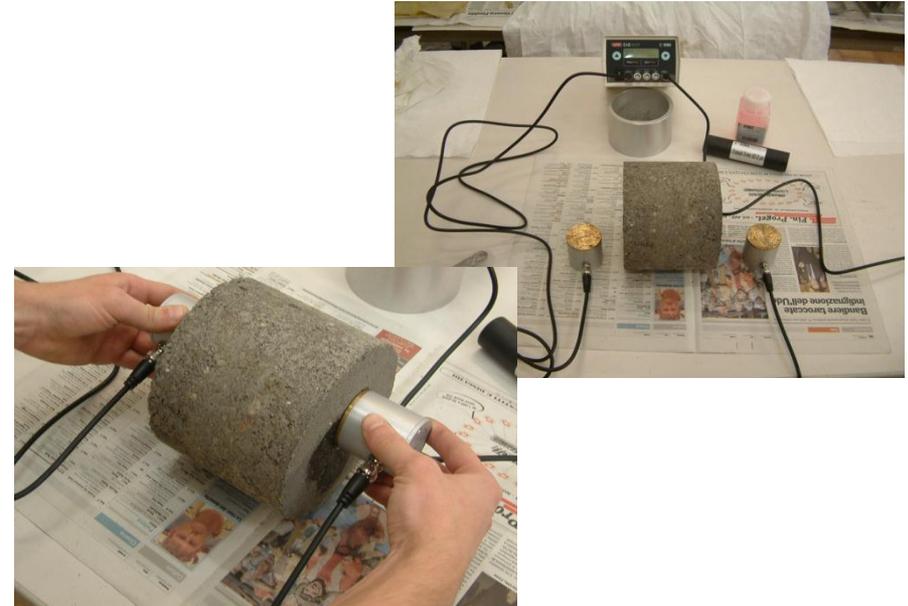
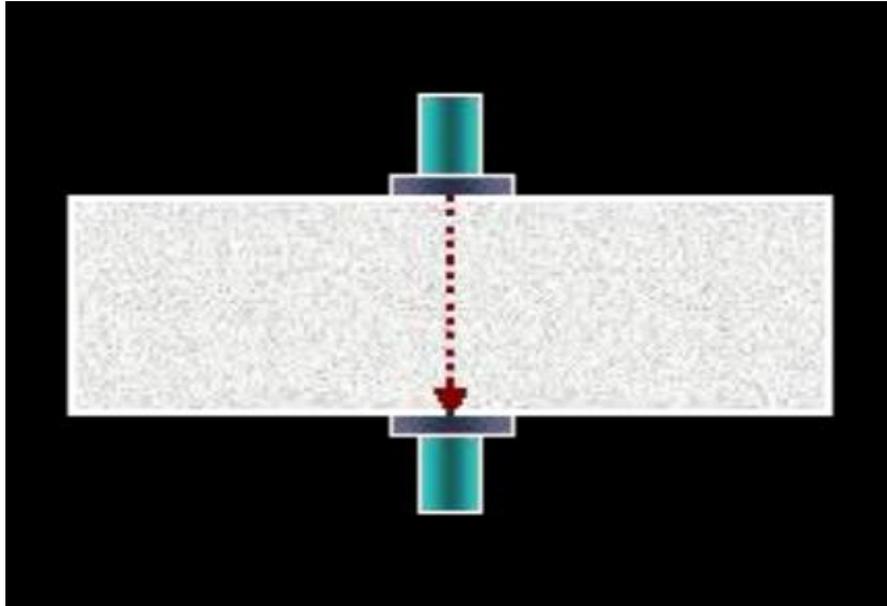
Risultati Prove di Trazione Indiretta



Resistenza a Trazione Indiretta @7 gg > 0.25 MPa

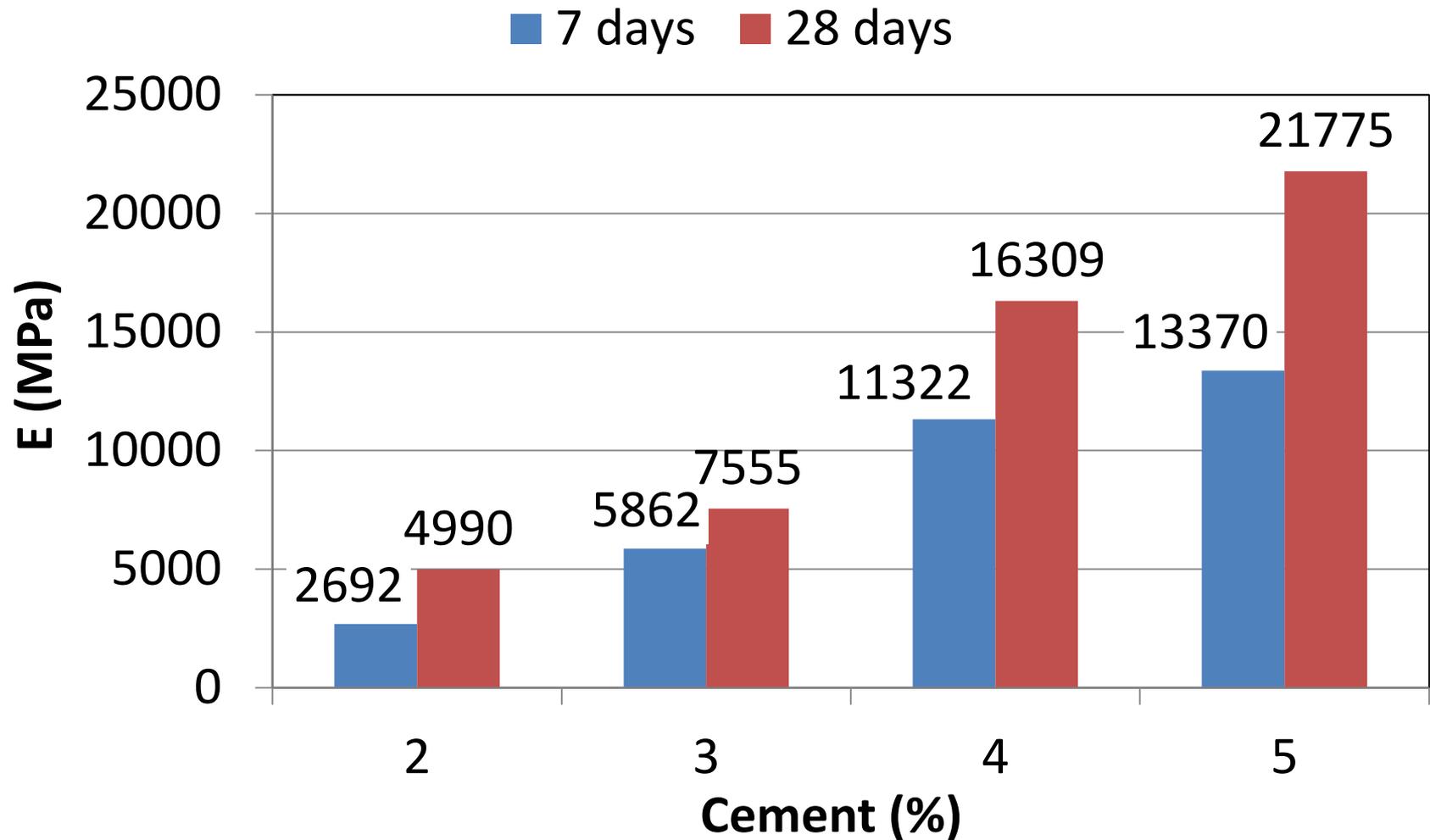
MIX DESIGN e Caratterizzazione meccanica

Modulo Elastico Dinamico – Prova ad Ultrasuoni



$$V = \frac{L}{T} \rightarrow E_D = V^2 \rho \frac{(1+n)(1-2n)}{1-n}$$

Risultati Modulo Elastico Dinamico



CONCLUSIONI

- ✓ Le scorie EAF studiate hanno presentato caratteristiche fisico-meccaniche sostanzialmente equivalenti o superiori a quelle degli aggregati lapiedi naturali convenzionalmente impiegati nelle infrastrutture viarie.
- ✓ Prestazioni complessivamente estremamente positive delle miscele bituminose per strati di base-binder con scorie EAF, in termini di rigidezza, vita a fatica, resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti e durabilità all'acqua .

CONCLUSIONI

- ✓ Elevate caratteristiche meccaniche (resistenze a compressione e trazione indiretta) delle miscele idrauliche per fondazioni stradali.
- ✓ Le scorie EAF possono essere impiegate con successo in parziale sostituzione dell'aggregato naturale sia nelle miscele idrauliche, che in quelle bituminose.

CONCLUSIONI

- ✓ L'approccio prestazionale consente di analizzare le proprietà ingegneristiche fondamentali che governano la risposta meccanica dei conglomerati bituminosi.
- ✓ Nello studio del comportamento meccanico delle miscele bituminose con materiali marginali, la caratterizzazione prestazionale permette di chiarire aspetti talvolta difficili da interpretare con le sole prove empiriche.
- ✓ Le prove prestazionali quantificano con maggiore attendibilità ed accuratezza il contributo dato dai materiali marginali alla risposta tenso-deformativa delle miscele bituminose.

Recenti indagini sperimentali sull'impiego delle scorie EAF condotte presso il Laboratorio Sperimentale Stradale dell'Università di Padova

Recenti pubblicazioni su Riviste Internazionali (ISI):

1. M. Pasetto, N. Baldo, “Experimental Evaluation of High Performance Base course and Road Base Asphalt Concrete with Electric Arc Furnace Steel Slags”. *Journal of Hazardous Materials* 181 (1-3) (2010) 938–948; DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.05.104
2. M. Pasetto, N. Baldo, “Recycling of steel slags in road foundations”. *Environmental Engineering and Management Journal* 9 (6) (2010) 773-777.
3. M. Pasetto, N. Baldo, “Mix design and Performance Analysis of Asphalt Concretes with Electric Arc Furnace Slag”. *Construction and Building Materials* 25 (8) (2011) 3458-3468; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037
4. M. Pasetto, N. Baldo, “Performance comparative analysis of Stone Mastic Asphalts with Electric Arc Furnace steel slag: a laboratory evaluation”. *Materials and Structures*, 2011, accepted, *in press*.





Corso SIIV 2011



di Alta Formazione alla Ricerca

Brescia, 8 Settembre 2011

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!!!

Ph.D. Ing. N. Baldo

nicola.baldo@uniud.it

Università di Udine

Dipartimento di Chimica, Fisica ed Ambiente