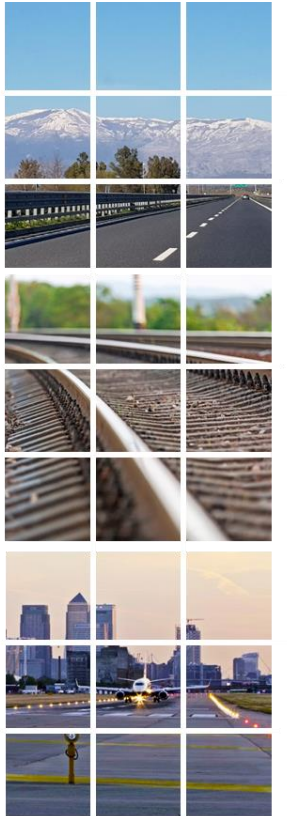


**Technical workshop**  
**LA TRANSIZIONE GREEN NELLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO**



**Utilizzo di cenere da biomasse per la stabilizzazione di terreni argillosi nei sottofondi stradali**

4

SETTEMBRE

.23

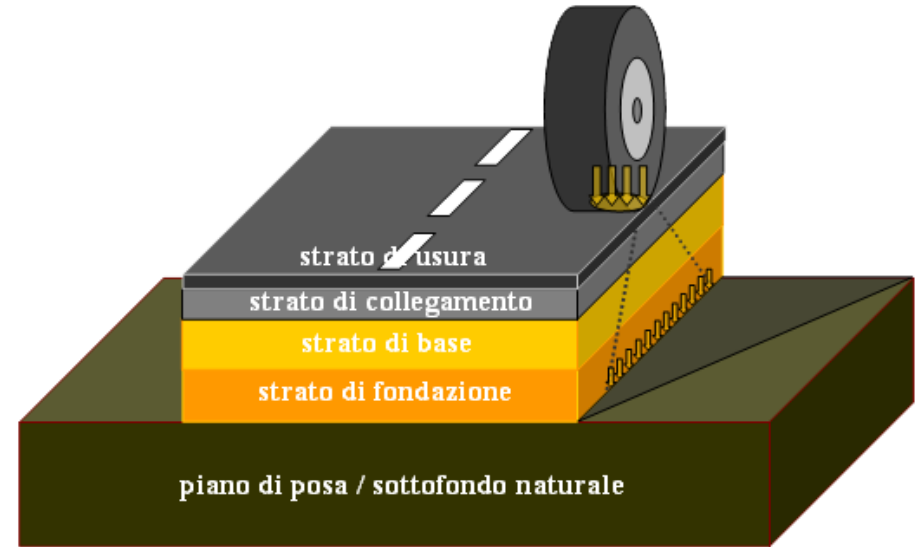


**Università degli Studi di Perugia**  
*Department of Civil and Environmental Engineering*

**Ing. Alessandro Corradini, PhD**  
*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*  
*Università degli Studi di Perugia*



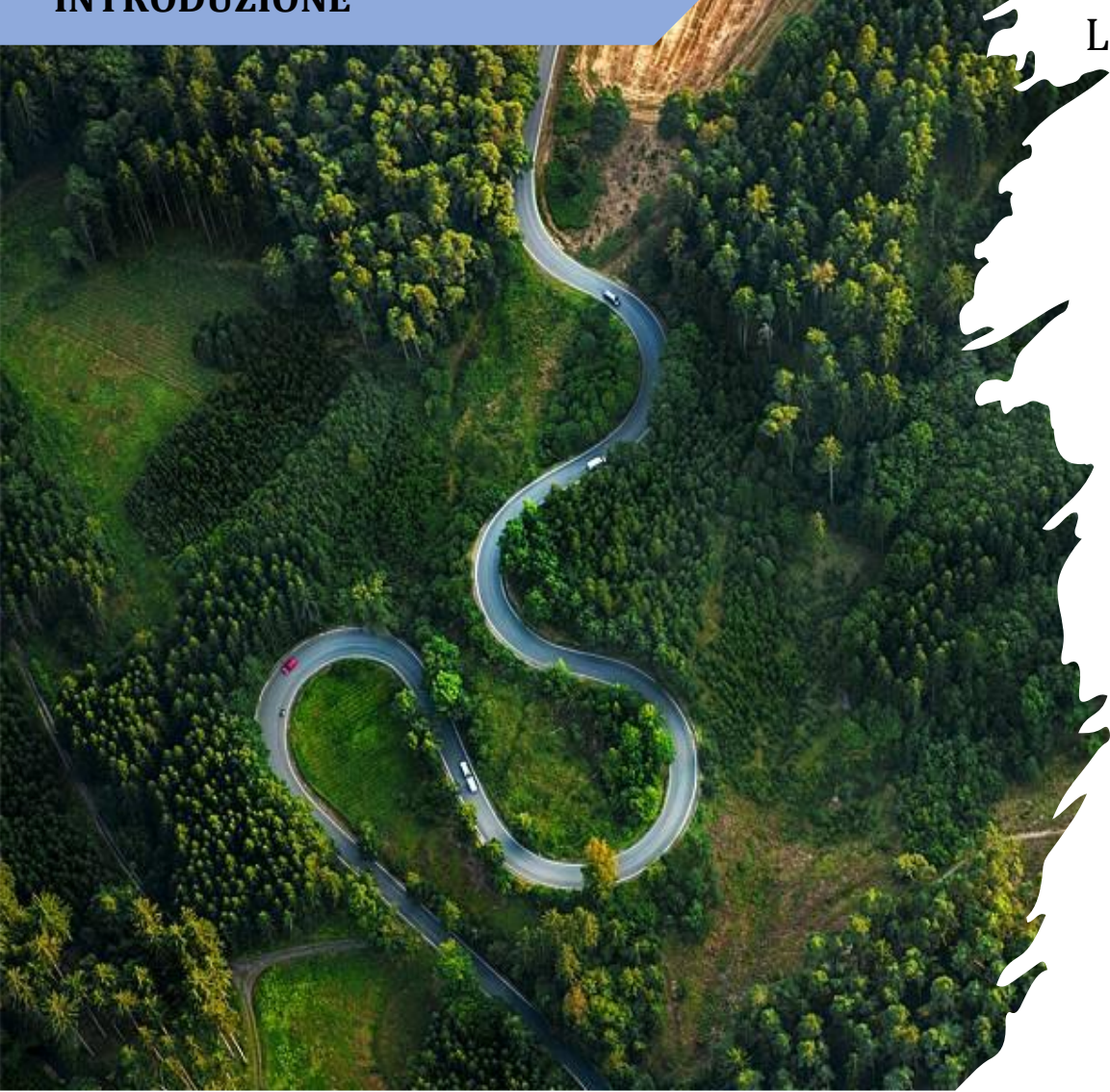
## SOVRASTRUTTURA STRADALE O PAVIMENTAZIONE



Molteplici strati caratterizzati da specifici:

- Materiali
- Spessori
- Caratteristiche
- Funzioni





La **PAVIMENTAZIONE STRADALE** deve assolvere nel corso dell'intera vita utile funzioni fondamentali:

- Garantire una superficie di scorrimento regolare per il traffico veicolare in condizioni di sicurezza e comfort
- Proteggere gli strati profondi dall'azione degradante degli agenti atmosferici
- **Ridurre e ripartire sul terreno di sottofondo le sollecitazioni** indotte dai carichi veicolari



**EVITANDO DI INCORRERE IN DEFORMAZIONI SIGNIFICATIVE PER L'INTERA STRUTTURA**

## INTRODUZIONE



La **DEFORMABILITÀ** della **PAVIMENTAZIONE STRADALE**

(dunque la durata della sua vita utile)



È direttamente condizionata dalla **CAPACITÀ PORTANTE DEL TERRENO DI SOTTOFONDO**



(Su cui agiscono sollecitazioni statiche e dinamiche)

**PORTANZA: CAPACITÀ DI INCAMERARE DEFORMAZIONI RIDOTTE SOTTO LE AZIONI DEI CARICHI AGENTI**







# INTRODUZIONE

Classificazione generale	Terre ghiaio-sabbiose Frazione passante allo staccio 0,063 mm ≤ 35%							Terre limo-argillose Frazione passante allo staccio 0,063 mm > 35%					Torbe e terre organiche palustri
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		
Gruppo													
Sottogruppo													
Frazione passante allo staccio 2 mm 0,4 mm 0,063 mm	≤ 50 ≤ 30 ≤ 15	- ≤ 50 ≤ 25	- > 50 ≤ 10	- ≤ 35	- ≤ 35	- ≤ 35	- ≤ 35	- > 35	- > 35	- > 35	- > 35	- > 35	- > 35
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0,4 mm $w_L$ (limite liquido) IP (indice di plasticità)	- ≤ 6	- ≤ 6	- N.P.	≤ 40 ≤ 10	> 40 ≤ 10	≤ 40 > 10	> 40 > 10	≤ 40 ≤ 10	> 40 ≤ 10	≤ 40 > 10	> 40 > 10 IP ≤ $w_L - 30$	> 40 > 10 IP > $w_L - 30$	
Indice di gruppo	0		0	0				≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20	
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia o sabbia limosa o argillosa				Limi poco compressibili	Limi molto compressibili	Argille poco compressibili	Argille molto compressibili e mediamente plastiche	Argille molto compressibili e molto plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	da eccellente a buon 			da mediocre a scadente 									Da scartare
Azione del gelo sulle qualità portanti	Nessuna o lieve		Media				Molto elevata	Media	Elevata	Media			
Ritiro e rigonfiamento	Nullo		Nullo o lieve				Lieve o medio	Elevato	Elevato	Molto elevato			
Permeabilità	Elevata		Media o scarsa				Scarsa o nulla						

N.P. = non plastico; - = non necessario per la classificazione

Classificazione dei terreni:  
normativa **UNI 11531-1/2014**

-  Distribuzione granulometrica
-  Suscettibilità all'acqua ( $w_L - IP$ )



Realizzazione o manutenzione straordinaria di infrastrutture stradali in presenza di terreni di sottofondo non idonei (limo/argillosi)



~~➤ Sostituzione con materiale di cava~~

➤ Aggiunta di calce o calce e cemento

➤ Stabilizzazione bituminosa

➤ Geotessili

➤ Stabilizzazione chimica (cloruro di calcio)

➤ Impiego di cenerei

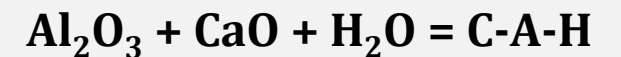
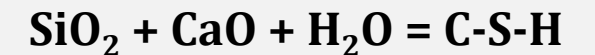
Processo di miscelazione tra terreno argilloso e calce → STABILIZZAZIONE

### AZIONI IMMEDIATE:

- Variazioni contenuto d'acqua qualora si impieghi «CALCE VIVA» →  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2 + 15.5 \text{ Kcal/mole di CaO}$
  - SCAMBIO IONICO con sostituzione degli ioni sodio ( $\text{Na}^+$ ) e potassio ( $\text{K}^+$ ) con lo ione calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (FLOCCULAZIONE).
- } • FLOCCULAZIONE  
• CAMBIO DEI LIMITI DI CONSISTENZA  
• **AUMENTO DEL pH**

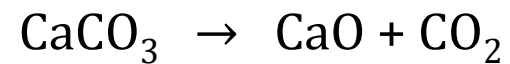
### AZIONI A LUNGO TERMINE:

I silicati e gli alluminati nel materiale amorfo in presenza di acqua si legano con gli ioni  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  formando silicati e alluminati di calcio idrati ovvero quelle fasi cementizie responsabili della crescita di resistenza (**REAZIONE POZZOLANICA**).





La calce come agente stabilizzante è ricavata dal processo di calcinazione ad alte temperature (superiori a 1000°) di rocce carbonatiche. L'effetto del calore è quello di trasformare il carbonato di calcio in ossido di calcio con perdita di anidride carbonica secondo la seguente reazione:





## BIOMASSE



Tecniche di stabilizzazione innovative e  
a basso impatto ambientale

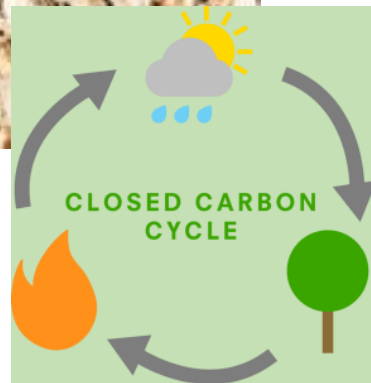


Utilizzo di sottoprodotti industriali  
e materiali di scarto  
dalla combustione di biomasse



**BIOMASSA:** SOSTANZA DI MATRICE ORGANICA  
(ANIMALE O VEGETALE) CHE NON HA SUBITO ALCUN  
PROCESSO DI FOSSILIZZAZIONE DA CUI È POSSIBILE  
RICAVARE ENERGIA

- ▶ Legno e Residui di legna
- ▶ Rifiuti organici urbani
- ▶ Scarti dell'industria agroalimentare
- ▶ Ramaglie verdi di attività forestale e agricola
- ▶ Lolla di riso
- ▶ Alghe marine
- ▶ Biomasse animali
- ▶ Biomassa microbica



➤ **Legna da ardere:** legna sottoposta ad un processo di essiccazione o stagionatura

➤ **Cippato:** legno ridotto in scaglie, con grandezze che variano da alcuni millimetri a circa 6 cm. È prodotto a partire da residui agricoli e forestali quali tronchi, stanghe, ramaglie, piante intere o da residui dell'industria del legno

➤ **Pellet:** biomasse legnose (segatura e trucioli di legno vergine non contaminato) sottoposte ad essiccazione e compattazione. Le pressioni e le temperature dovute al processo comportano il parziale rammollimento dei costituenti del legno, in modo specifico della lignina, che fondendosi funge da collante naturale.

# BIOMASSE

LEGNO

99% sul secco → CELLULOSA + EMICELLULOSA + LIGNINA

1% sul secco → COMPONENTI DI ORIGINE MINERALE

Nella loro forma ossidata costituiscono dall'85% al 95% delle ceneri. La restante parte è materia organica (ad es. cellulosa) con combustione parziale.

2019 → Legno grezzo: 4 miliardi di m<sup>3</sup> di cui 1.9 miliardi utilizzati come combustibile

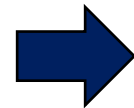
CENERE / LEGNO = 1.5 % circa  
Massa volumica = 0.425 kg/m<sup>3</sup>

Almeno 20 milioni di tonnellate di ceneri l'anno di cui:

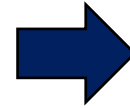
- 70% in discarica
- 20% ammendamento terreni
- 10% altri utilizzi

EFFETTI NOCIVI CENERI: polveri, contaminazione delle acque sotterranee, impregnazione di metalli pesanti.

MINOR UTILIZZO DI CARBONE



MAGGIOR IMPIEGO DI BIOMASSA



ECCESSO DI CENERI





**OBIETTIVO: VALUTARE L'EFFICACIA DEL PROCESSO DI STABILIZZAZIONE DI UN TERRENO LIMO-ARGILLOSO CON MARCATE CARATTERISTICHE DI PLASTICITÀ CONDOTTO TRAMITE L'IMPIEGO DI CENERI RESIDUE DALLA COMBUSTIONE DI CIPPATO DI LEGNO**

**ANALISI COMPARATIVA CON STABILIZZAZIONE ORDINARIA A CALCE**

- ▶ T: TERRENO NATURALE**
- ▶ MIX L: TERRENO NATURALE CON CALCE IDRATA**
- ▶ MIX C2: TERRENO NATURALE CON CENERE C2**
- ▶ MIX C4: TERRENO NATURALE CON CENERE C4**

## PROGRAMMA SPERIMENTALE

## APPROCCIO MULTIDISCIPLINARE

### ANALISI CHIMICO-MINERALOGICHE

### ANALISI TERMICHE

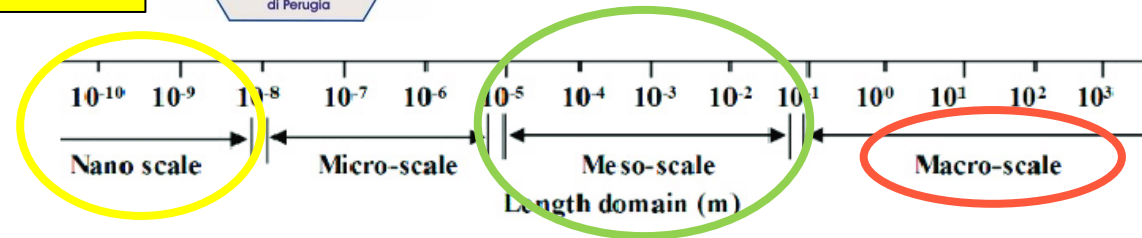
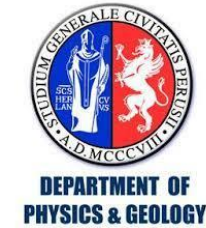
- XRPD → Diffrazione di polveri dei raggi X
- QPA → Analisi quantitativa delle fasi mediante raffinamento Rietveld
- FESEM-EDS → Microscopia a scansione elettronica a emissione di campo – analisi chimiche.

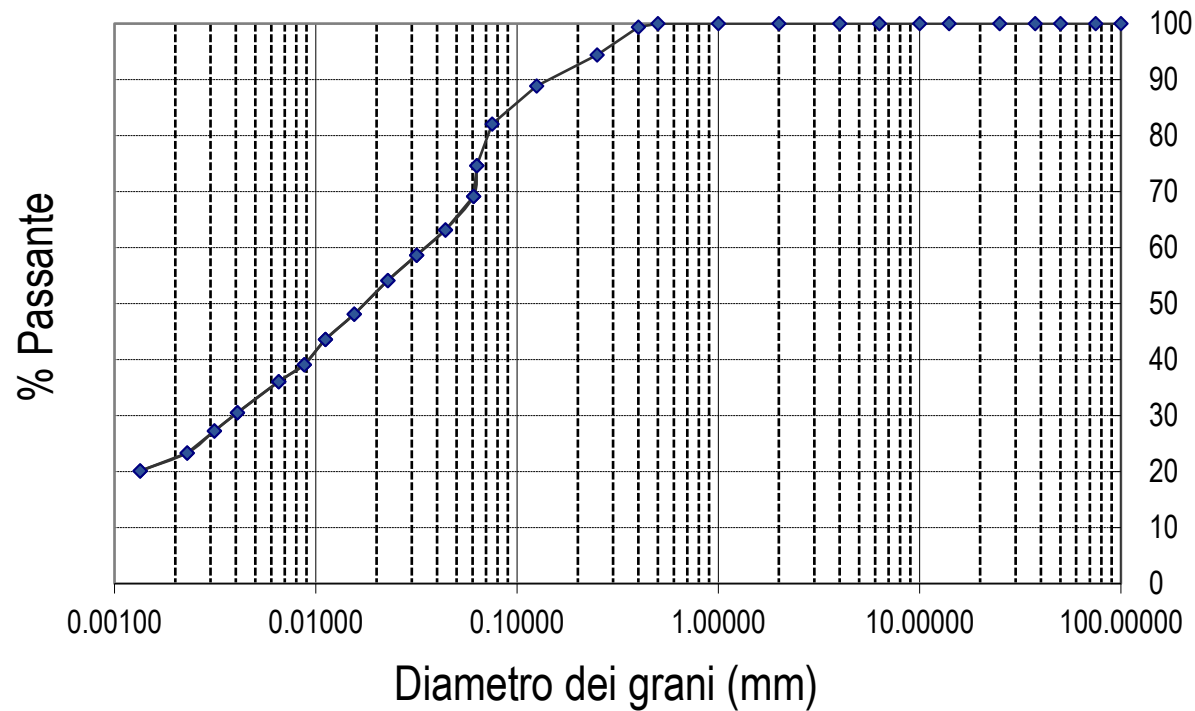
FTIR → Spettroscopia a infrarossi a trasformata di Fourier.

### ANALISI FISICO-MECCANICHE

- GRANULOMETRIA
- LIMITI ATTERBERG
- CIC (consumo iniziale di calce)
- COMPATTAZIONE PROCTOR
- UCS
- CBR
- GELO / DISGELO
- TEST IN CELLA TRIASSIALE

- VERIFICA IN CANTIERI STRADALI





**TERRENO di CLASSE A6**

## TERRENO T

### Distribuzione granulometrica

**26%** frazione a grana grossa (sabbia)

**74%** frazione a grana fine passante al setaccio  
limite 0.063 mm:

▀ **22%** argilla

▀ **52%** limo

### Limiti di Atterberg

**38.8%** limite liquido ( $W_L$ )

**24.7%** limite plastico ( $W_P$ )

**14.1%** Indice di Plasticità (IP)



# ANALISI PRELIMINARI

## TERRENO T

### XRPD e QPA

FASI MINERALOGICHE	Wt (%)
Quarzo	20
Feldspati	13
Pirosseni	3
<b>Fillosilicati</b>	<b>33</b>
Carbonati	10
Amorfo	21

FASE	% in PESO
Illite	76
Kaolinite	19
Chamosite	5

### FESEM-EDS

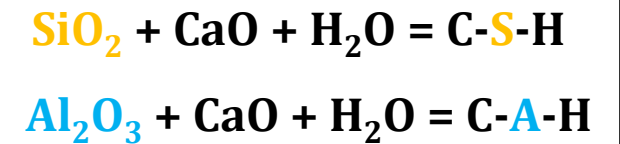
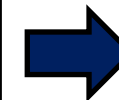
OSSIDI	Wt (%)
Na <sub>2</sub> O	0.17
MgO	3.19
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>16.3</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>56.6</b>
K <sub>2</sub> O	2.93
CaO	6.71
FeO	7.2

ALTE % DI FILLOSILICATI



PREVALENTI FASI ARGILLOSE

ALTE % DI SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



## SCHEDA TECNICA DI PRODOTTO

PRODOTTO : IDROSSIDO DI CALCIO

NOME COMMERCIALE: CALCE IDRATA CL 70-S

Caratteristiche Chimiche-Fisiche	Metodi/Strumenti d'analisi	Valori limite		
CO <sub>2</sub> residua	UNI EN 459-1:2010	10,00	%	MAX
Acqua libera	UNI EN 459-1:2010	0,05	%	MAX
SO <sub>3</sub>	UNI EN 459-1:2010	0,20	%	MAX
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UNI EN 459-1:2010	0,20	%	MAX
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UNI EN 459-1:2010	0,25	%	MAX
SiO <sub>2</sub>	UNI EN 459-1:2010	0,16	%	MAX
Ca(OH) <sub>2</sub>	UNI EN 459-1:2010	70,00	%	MIN
Contenuto di Mg(OH) <sub>2</sub>	UNI EN 459-1:2010	1,50	%	MAX
Granulometria	UNI EN 459-1:2010	su 200 µm	%	1,00
		su 90 µm	%	6,00
Densità in mucchio	UNI EN 459-1:2010	600 - 650		Kg/m <sup>3</sup>
PH	1gr.calce/100 ml H <sub>2</sub> O distillata		12,5	

CALCE IDRATA CL 70-S



**CIC** (Consumo Iniziale in Calce): **3%**

Dipartimento di Fisica e Geologia (UniPG)

**Questa percentuale garantisce il raggiungimento di un pH = 12.4 nel MIX L**

**CENERE C2 (MIX C2)**

**Tipologia:** cenere di fondo (Bottom Ash)

➤ **Derivazione:** impianto termico di un'attività commerciale a Perugia

➤ **CIC: 8%**

Campione	Fase	Peso (%)
C2	Vivianite	1.06
	Calcite	14.90
	<b>Calce</b>	<b>17.13</b>
	Periclasio	5.49
	<b>Portlandite</b>	<b>21.27</b>
	Cianite	1.17
	Gismondina	8.29
	Idrossiapatite	2.53
	Fairchildite	6.47
	Amorfo	21.6

**CENERE C4 (MIX C4)**

➤ **Tipologia:** cenere leggera (Fly Ash)

➤ **Derivazione:** impianto termico di unità abitative residenziali private a Perugia

➤ **CIC: 15%**

Campione	Fase	Peso (%)
C4	Albite	1.73
	Calcite	37.65
	<b>Calce</b>	<b>6.11</b>
	Periclasio	1.68
	<b>Portlandite</b>	<b>7.66</b>
	Quarzo	3.86
	Silvite	0.74
	Idrossiapatite	2.01
	Collinsite	4.74
	Amorfo	33.8

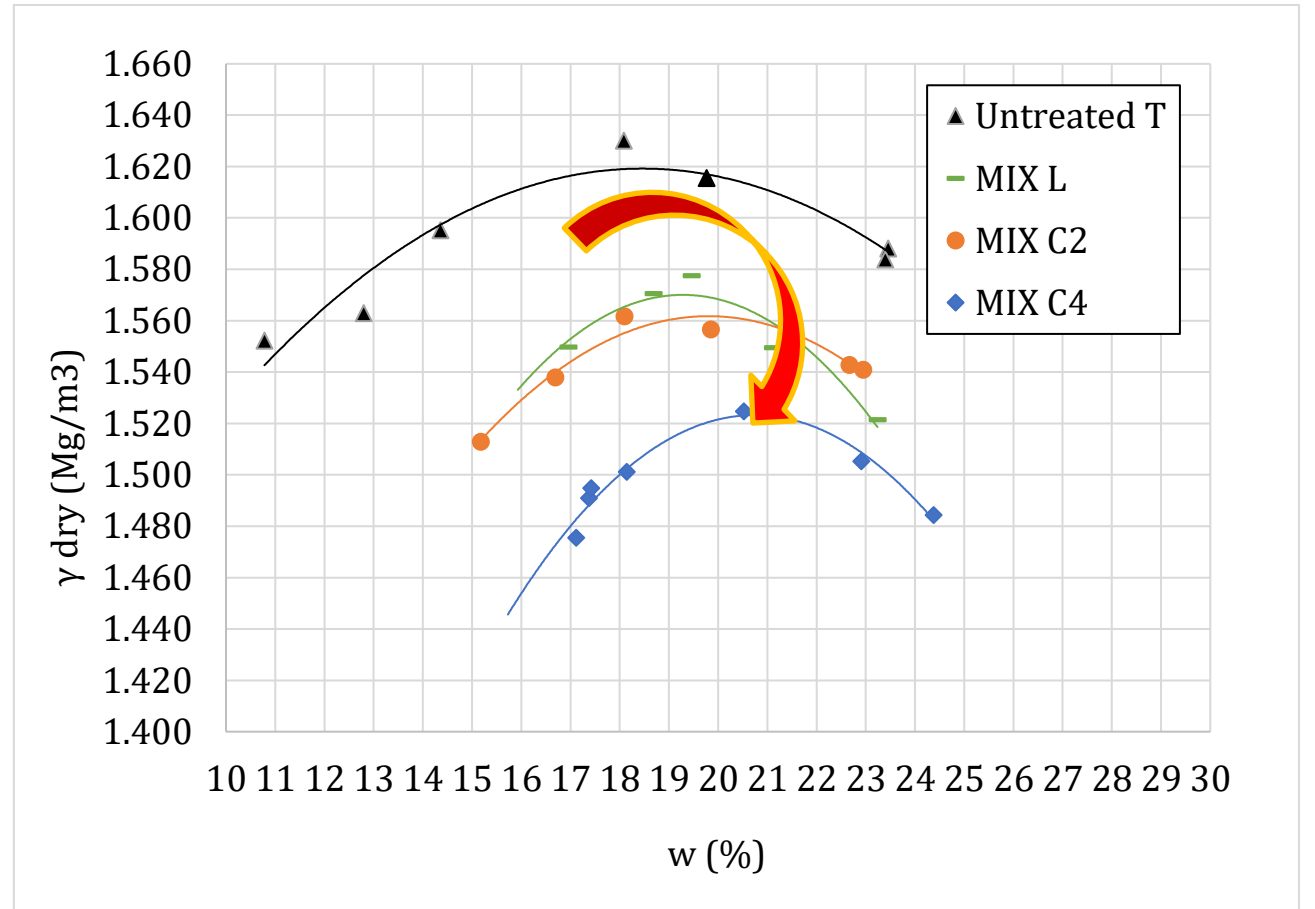


## RISULTATI SPERIMENTALI

### LIMITI DI CONSISTENZA

ID	WL (%)	WP (%)	PI (%)
T	38.8	24.7	14.1
MIX L	37.2	30.9	6.3
MIX C2	38.8	30.2	8.5
MIX C4	39.0	31.5	7.5

### CURVE DI COMPATTAZIONE



### COMPRESSIONE NON CONFINATA

#### PREPARAZIONE CAMPIONI

In fase di realizzazione dei provini è stata utilizzata la **PRESSA GIRATORIA** al fine di addensare il materiale in campioni cilindrici da 100 mm di altezza, 100 mm di diametro

#### MODALITÀ

Si è imposta la geometria finale e la massa del provino, quindi la densità ottima da prova Proctor Standard

#### MATURAZIONE

T=20°C e umidità elevata per 1, 7, 30 e 60 giorni  
(3 repliche per materiale e maturazione)



### COMPRESSIONE NON CONFINATA

#### METODOLOGIA DI PROVA

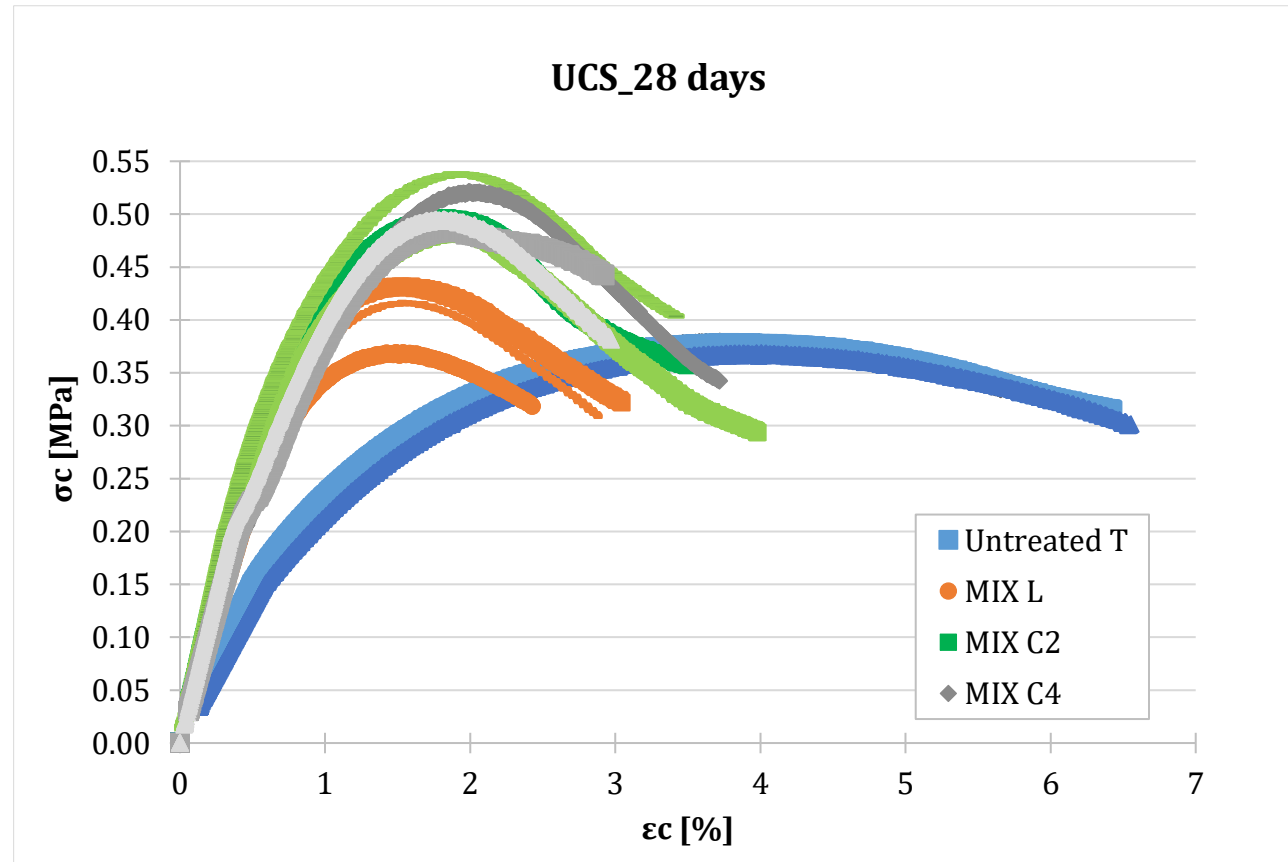
Si è utilizzata l'unità servo-idraulica con software ADVANTEST 9 e telaio con carico massimo di 15 kN

È stato imposto il controllo di deformazione pari al 1% dell'altezza iniziale dei provini al minuto

Sono stati utilizzati tre trasduttori LVDT per monitorare lo spostamento del piatto inferiore durante la prova

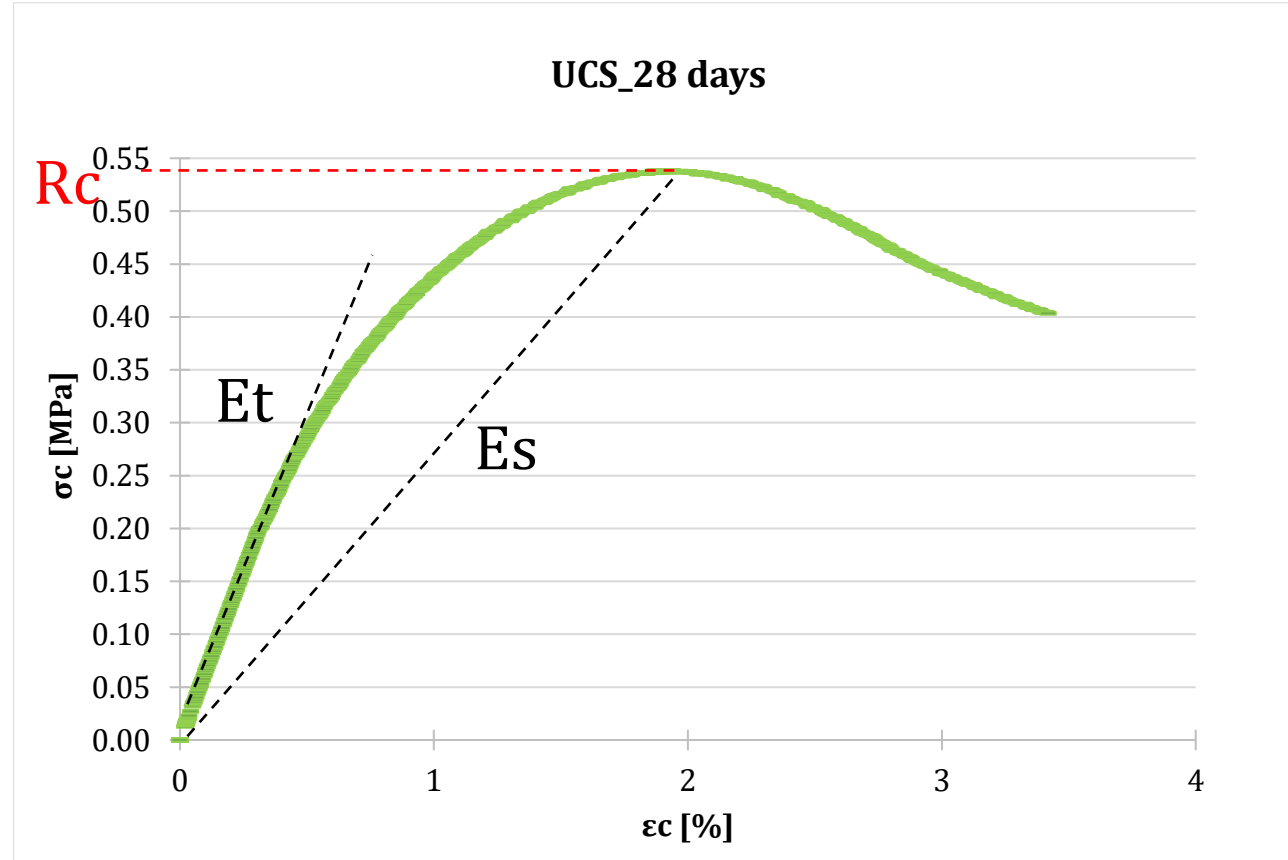


## COMPRESSIONE NON CONFINATA – Curve sforzo deformazione

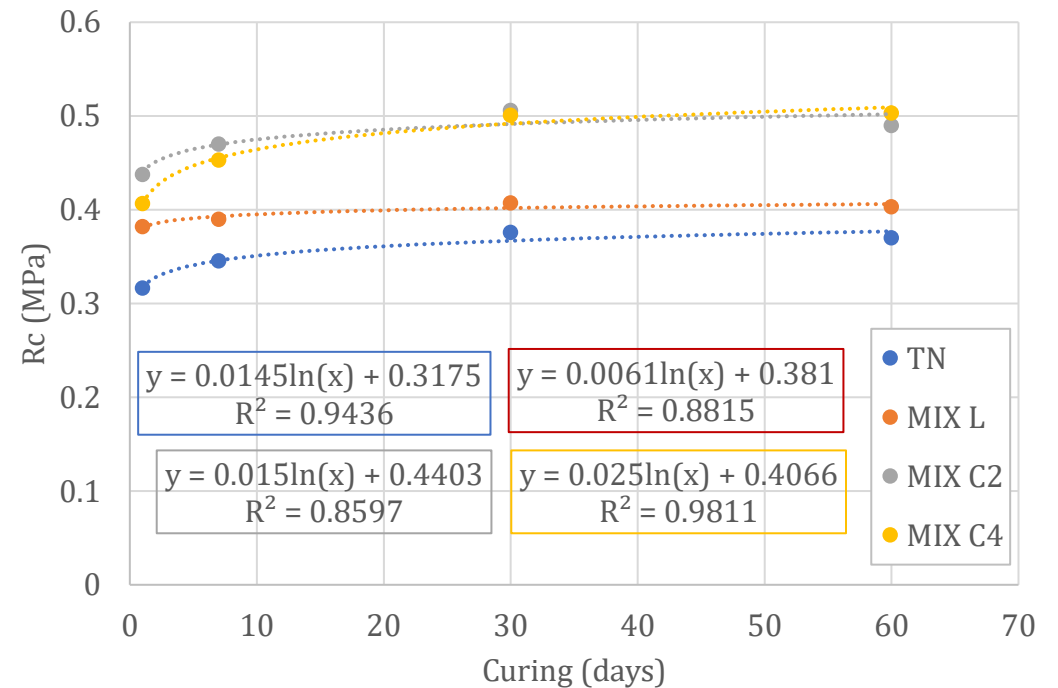
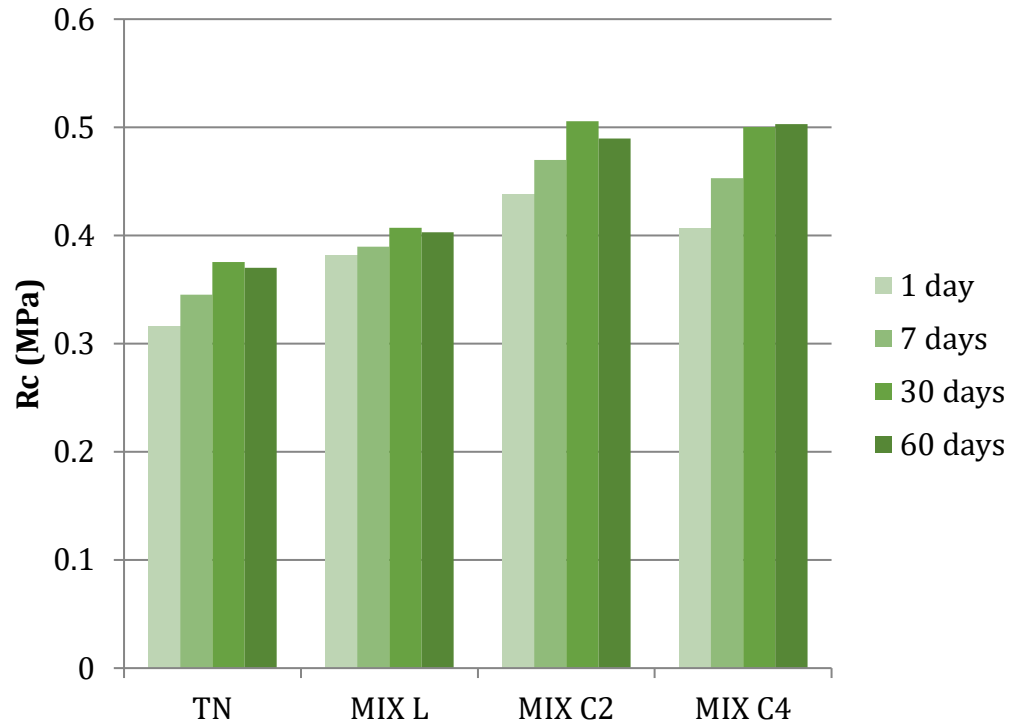




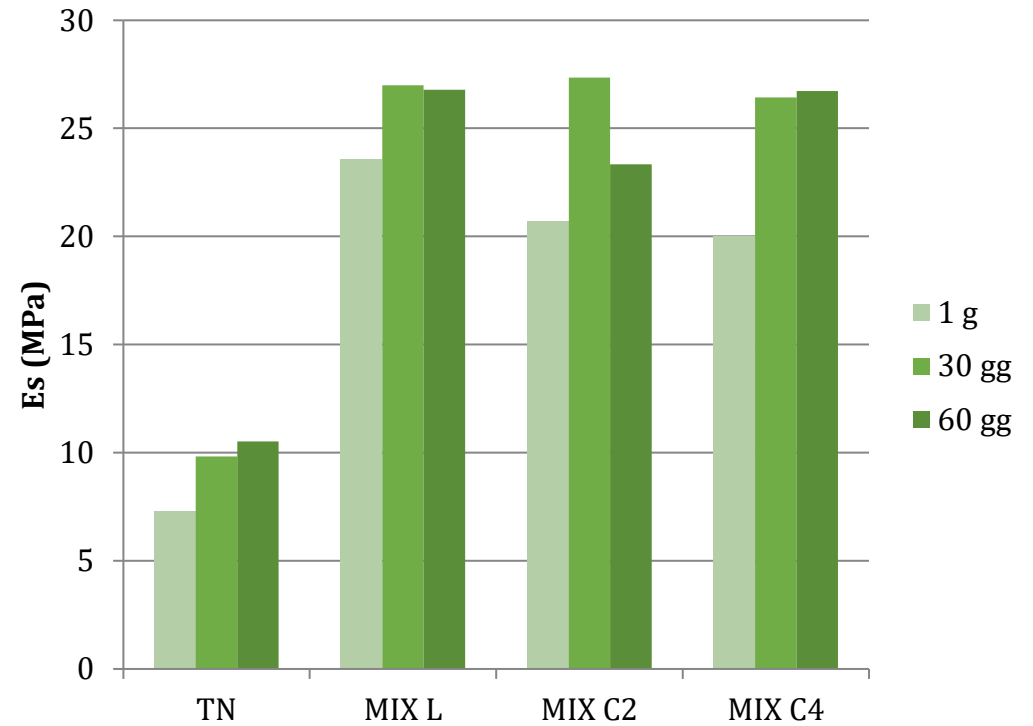
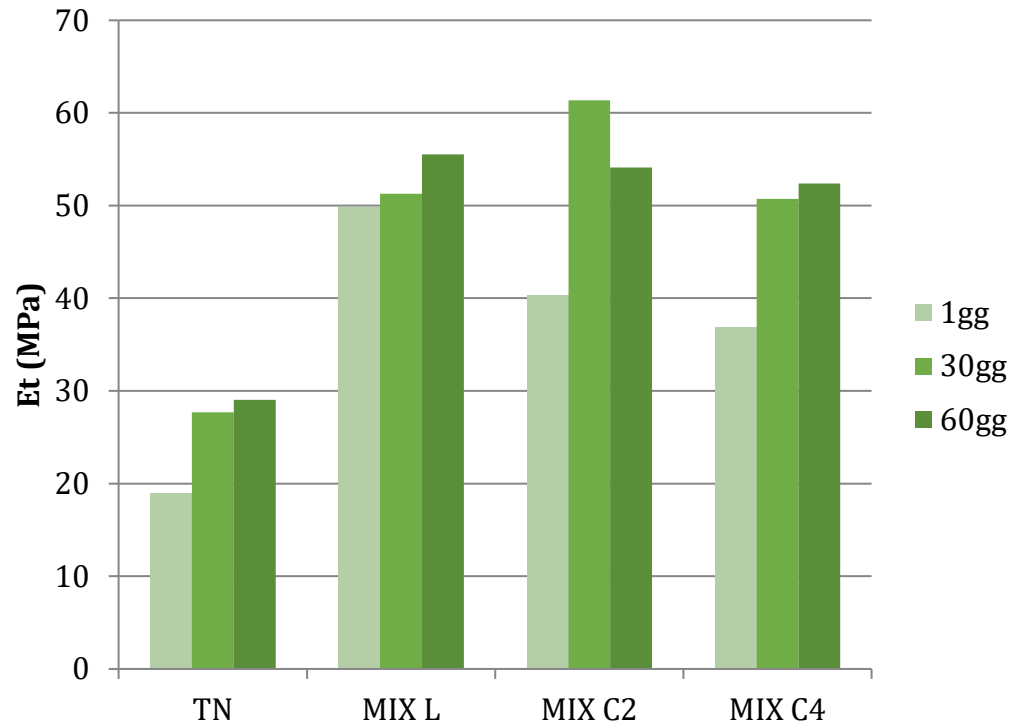
## COMPRESSIONE NON CONFINATA – Curve sforzo deformazione



## COMPRESSIONE NON CONFINATA – Resistenza a compressione

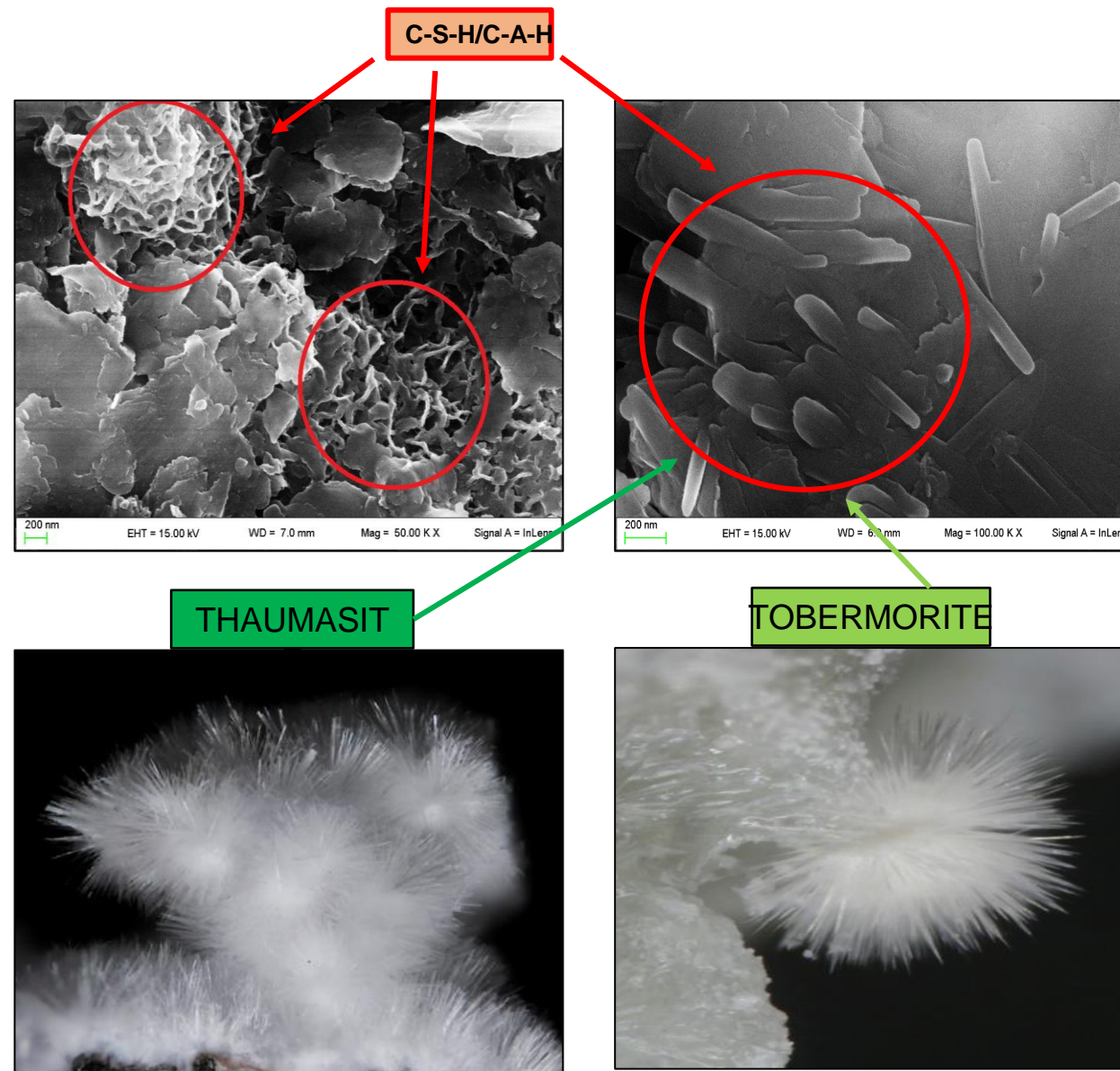


## COMPRESSIONE NON CONFINATA – Rigidezza



## RISULTATI SPERIMENTALI

► XRPD e QPA a 60 giorni





## CONCLUSIONI

Le analisi chimico-mineralogiche sono fondamentali in fase di valutazione della possibilità d'intervento e nella scelta della miglior soluzione tecnologica. Le stesse forniscono un utile supporto anche nella messa a punto dei mix di progetto.

L'impiego di ceneri da combustione di cippato di legno evidenzia risultati significativi in termini di:

- Riduzione dell'indice di plasticità;
- Aumento dell'umidità ottima e riduzione della massa volumica massima per effetto dei fenomeni di flocculazione;
- Incremento della resistenza a compressione ( $R_c$ ). L'effetto è più marcato di quanto osservato nel mix con il 3% di calce;
- In riferimento alla reale applicazione dei terreni in strati di sottofondo della pavimentazione stradale, è evidente che ci sia un favorevole aumento della rigidità nei terreni additivati. In questo caso l'effetto della calce e delle ceneri è simile.
- Le ceneri necessitano di tempi di maturazione prolungati per raggiungere prestazioni stabili.

IN CONCLUSIONE È EMERSO COME L'IMPIEGO DI CENERI DA BIOMASSE LEGNOSE SIA PROMETTENTE: È AUSPICABILE PERTANTO ESTENDERE LA RICERCA A DOSAGGI DIFFERENTI DI TALI ADDITIVI STABILIZZANTI, DA SOTTOPORRE AD UN PIÙ AMPIO VENTAGLIO DI PROVE PRESTAZIONALI





A. D. 1308  
**unipg**

DEPARTMENT OF CIVIL  
AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

**SAIV**

Società Italiana Infrastrutture Viarie



**Grazie per l'attenzione**

- *CHIARIMENTI*
- *RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI*
- *DATI SPERIMENTALI*

*alessandro.corradini@unipg.it*



**Università degli Studi di Perugia**  
*Department of Civil and Environmental Engineering*

**Ing. Alessandro Corradini, PhD**  
**Università degli Studi di Perugia**

**XIX International SIIV Summer School**  
*Perugia 4<sup>th</sup> - 8<sup>th</sup> September 2023*

