

# Prove statiche di aderenza tra intonaco e muratura

(Sperimentazione e analisi numerica)

## PARTE PRIMA

A. Alberto, P. Antonaci, P. Bocca, V. Di Vasto,

**A. Grazzini**, S. Valente,

Riunione di coordinamento del progetto Re-Frescos

29 Novembre 2012, Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Introduction

This experimental study is being carried out at the **Sacri Monti di Varallo UNESCO heritage site**. Situated at the top of the hill above the town of Varallo in Piedmont (Italy), Sacro Monte is an artistic-religious complex consisting of 45 chapels, which contain with frescoes and sculptures that tell the story of the life of Christ.



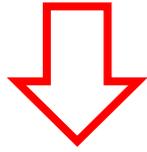
Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)

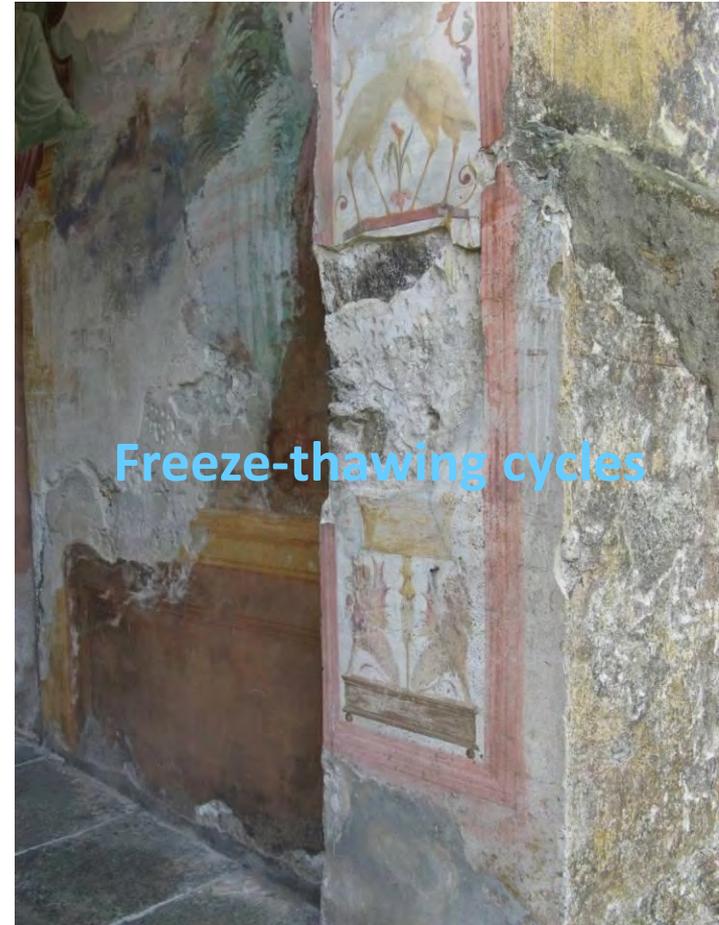


# Introduction

The historical plaster of the chapels has been subjected to **progressive material decay** over a long period of time.



## Decay and delamination of plasters



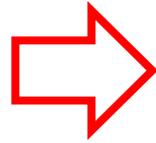
Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)

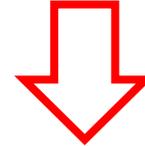


# Introduction

Some recent restoration work on decayed plasters have already shown their **poor durability**



the incompatibility of the employed repair mortars



**Decay and delamination of repair plasters**



**Preliminary pre-qualification of repair materials before their use**



**Maximum durability of the restoration work**

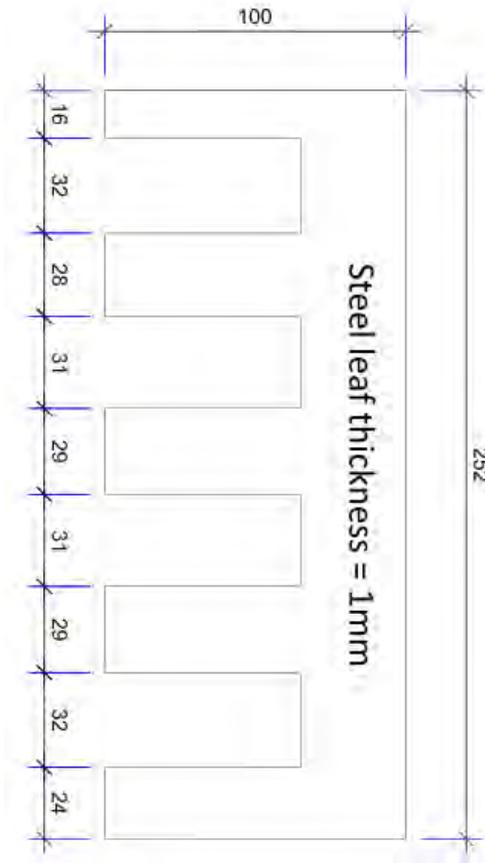
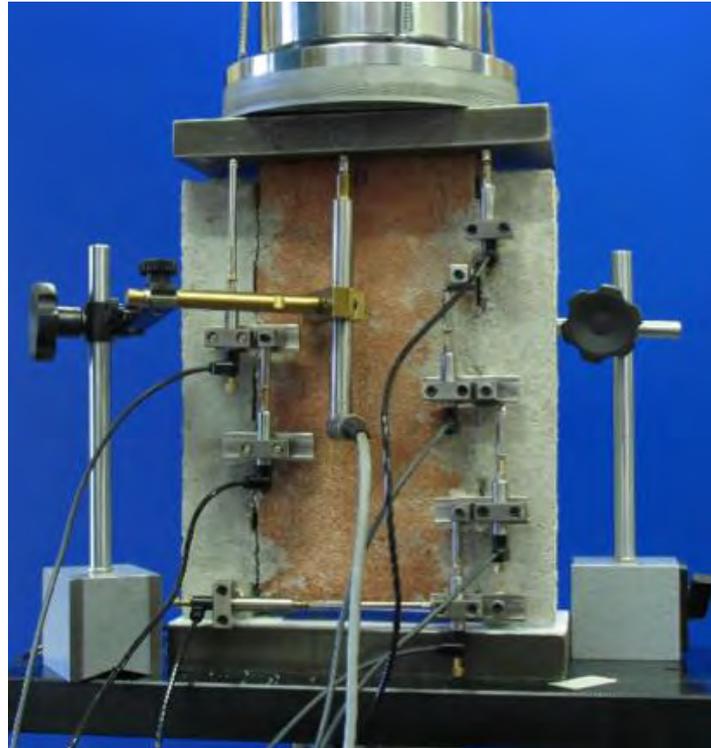
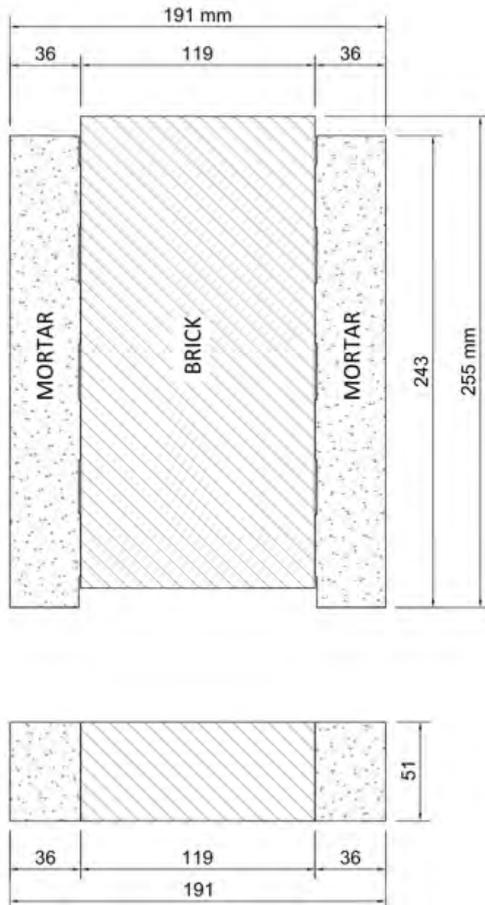


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Experimental research until 06/07/2011 (mortar – brick)



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



## Experimental research since 07/07/2011 (mortar – stone)

The research group of the **Laboratory of non Destructive Testing Materials at the Politecnico di Torino** has carried out particular **fatigue tests** on ad hoc mixed **stone block-mortar specimens** in order to evaluate **simulate the adherence capacity** of the new repair mortars to the masonry supports.

The restoration market offers a great number of dehumidified repair mortars, however **the mechanical characteristics have not been compared carefully with those of historical masonry supports.**

These **static tests** represent **the first step** of this experimental study **which is currently in progress.**

The next steps will concern the same type of mixed specimens subjected to cyclic tests.

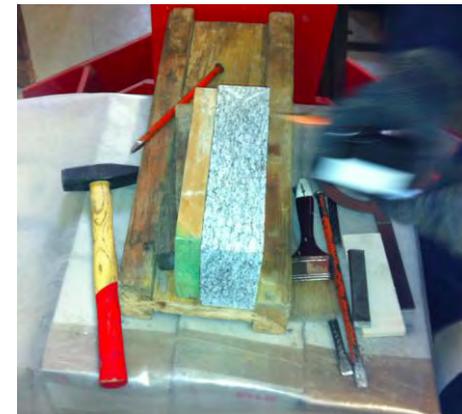
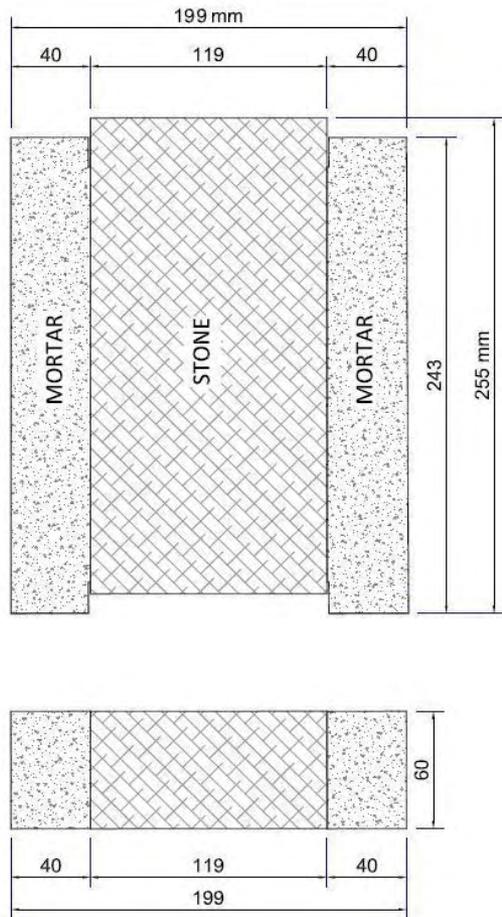


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Experimental research since 07/07/2011 (mortar – stone)



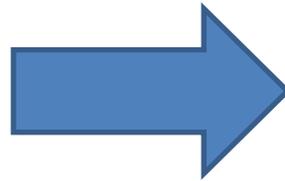
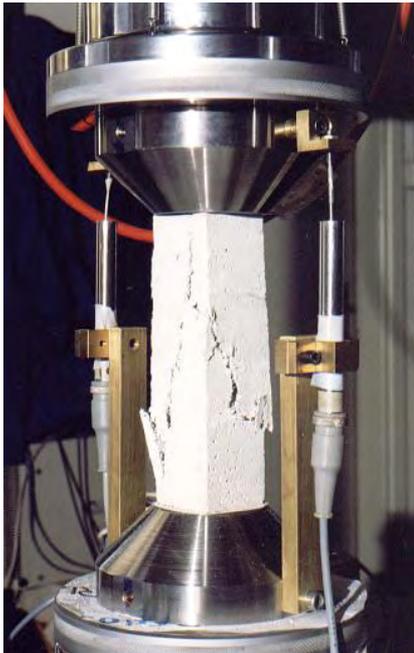
Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)

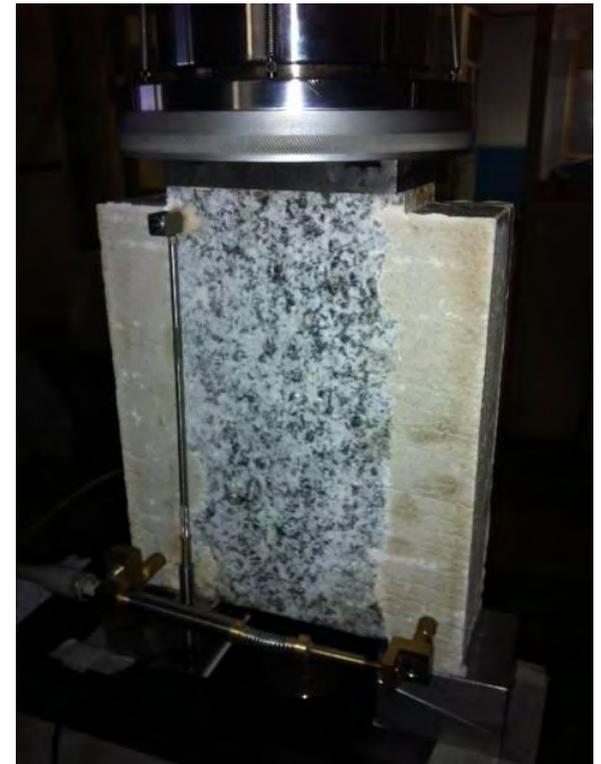


The pre-blended mortar, chosen from among the main ones on the market, is a transpirant base made from natural hydraulic lime and Eco-Pozzolan, which is suitable for the restoration of historical masonry damaged by rising capillary damp and sulphate salts.

**Young's modulus** of this repair mortar, evaluated according to UNI6556, was **4380 MPa**. The **compressive strength**, evaluated according to UNI6556, was **33,8 Mpa**.



Monotonous compression tests were carried out by the controlling the horizontal opening with a speed opening at 0,0001 mm /s.

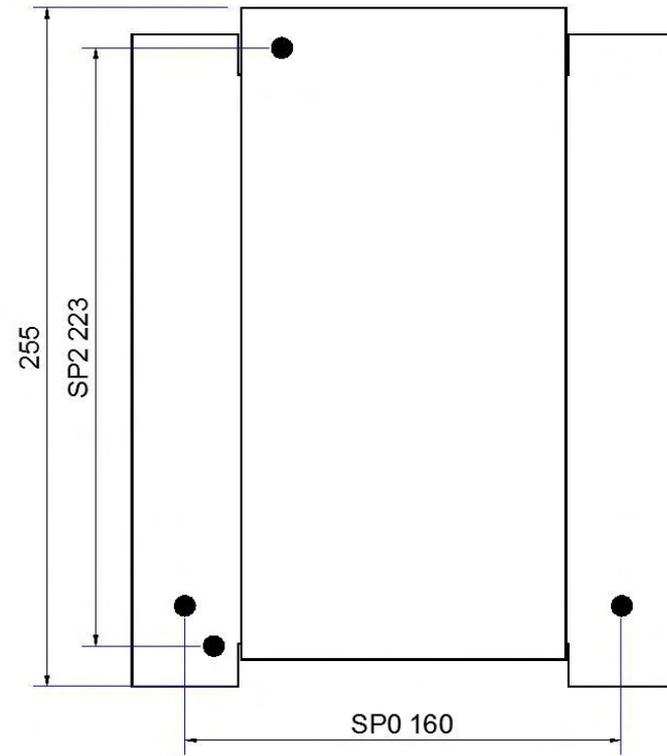


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Experimental setup

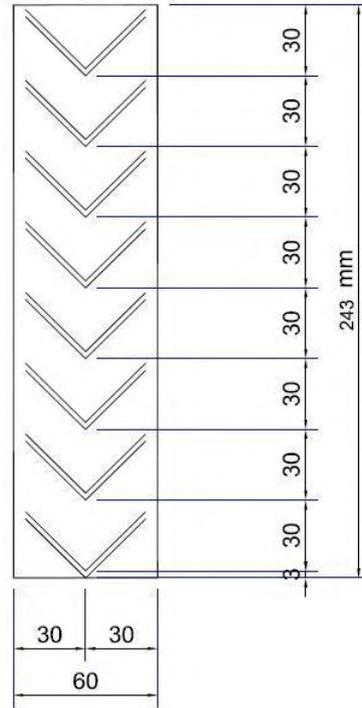
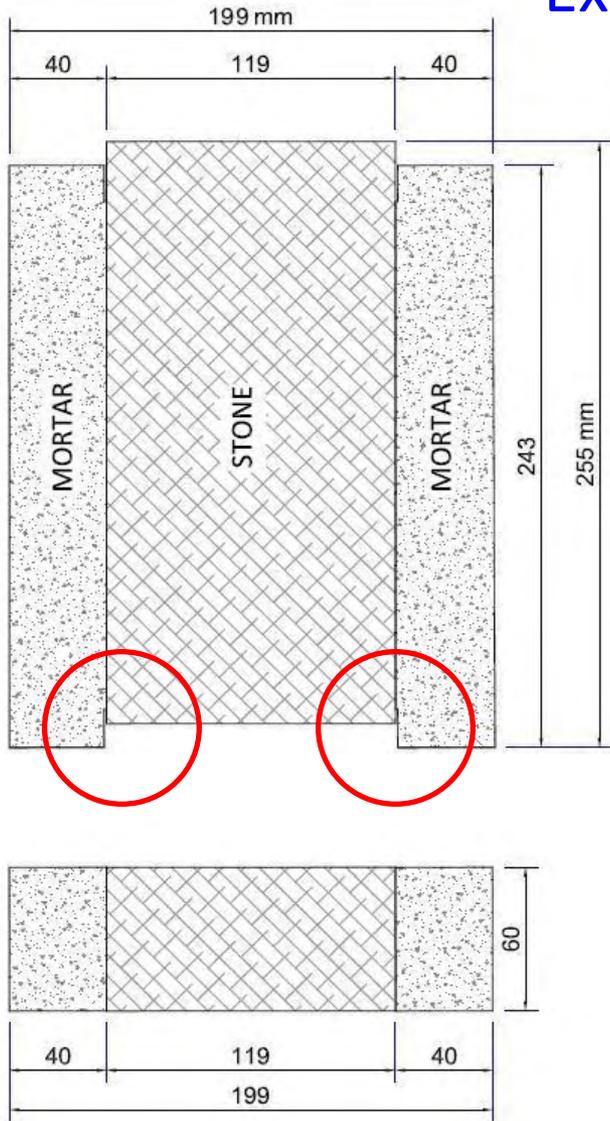


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Experimental setup



They were instead applied in symmetrical and regular discontinuity at the bottom and top of the specimen. These discontinuities behave like notches that which are able to trigger multiple crack propagation.

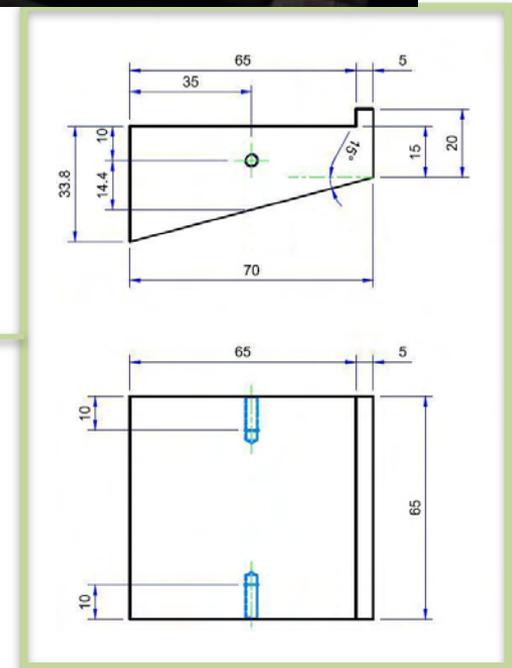
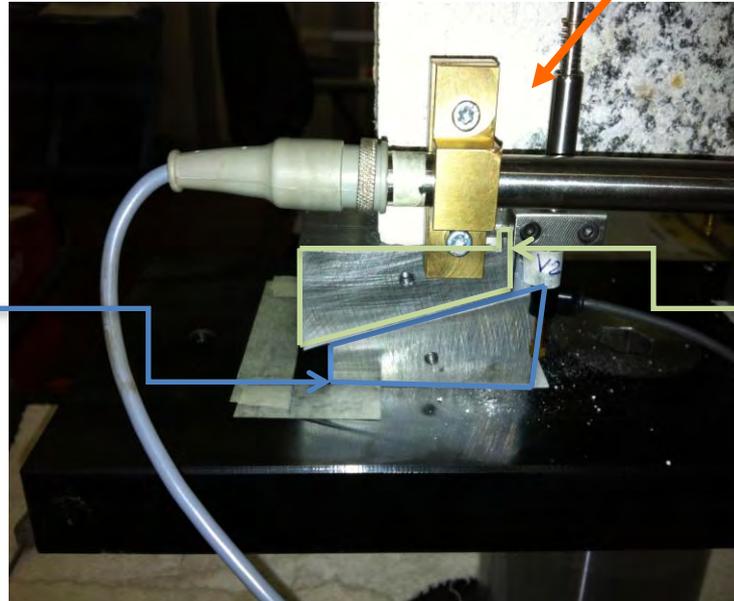
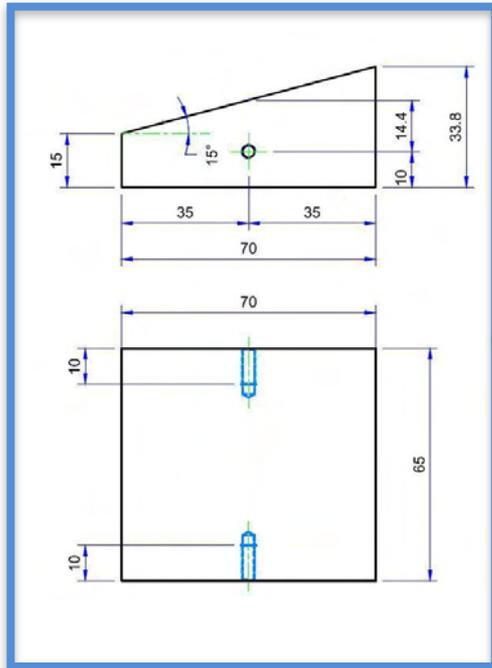


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Experimental setup



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Experimental results

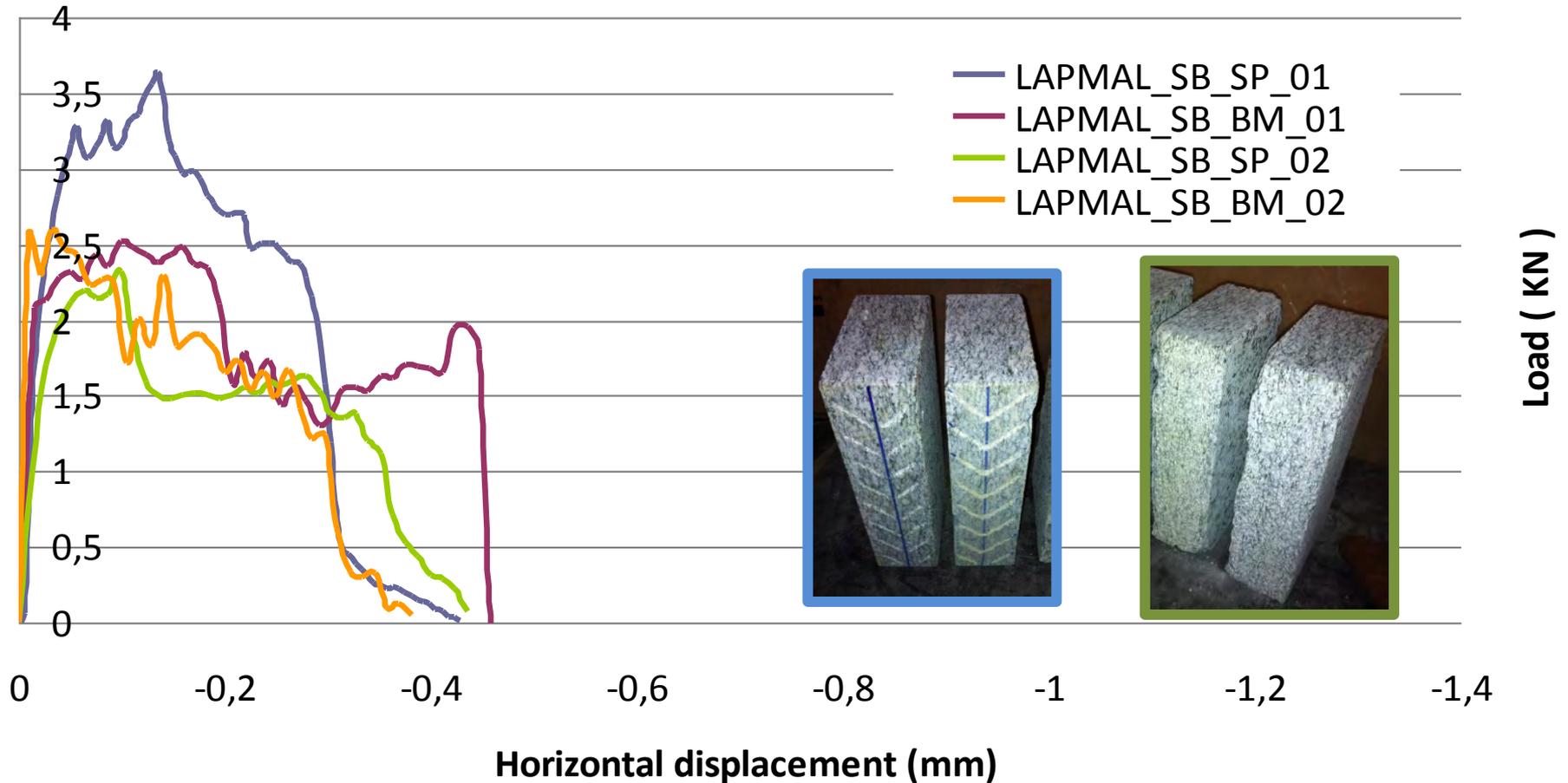


PROVINO	Max load (N)	Max horizontal displacement (mm)
LAPMAL_SB_BM_01(NoTeflon)	3660	0,4825
LAPMAL_SB_BM_02(Teflon)	2610	0,5416
LAPMAL_SB_SP_01(NoTeflon)	2320	0,4353
LAPMAL_SB_SP_02(Teflon)	2810	0,3817
LAPMAL_SB_BP_01 (Teflon)	2530	0,6077
LAPMAL_SB_BP_02 (Teflon)	1910	1,3218
LAPMAL_SB_BP_03 (Teflon)	2100	0,7695
LAPMAL_SB_BP_04 (Teflon)	1970	0,3629



# Experimental results

## Load - Horizontal displacement



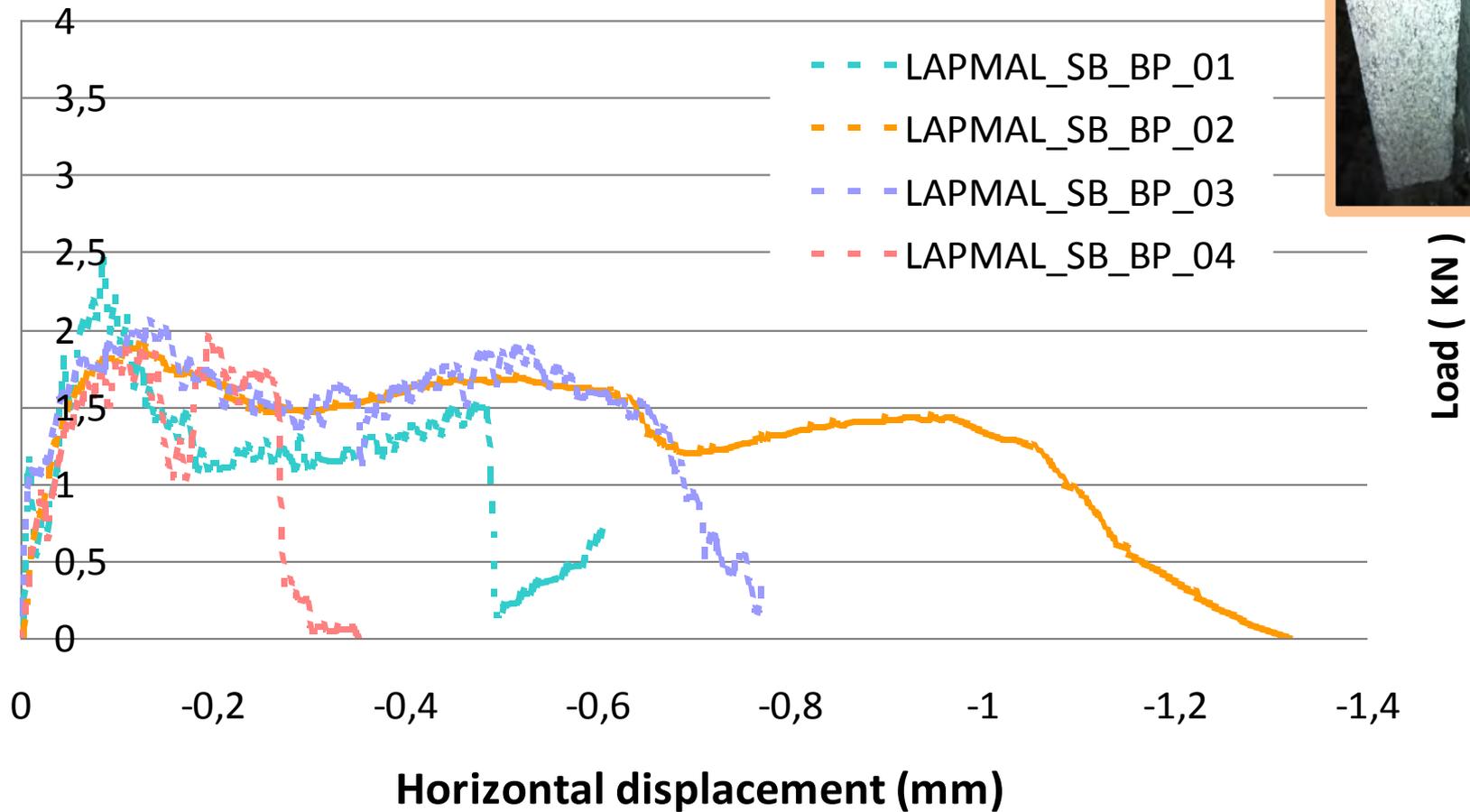
Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Experimental results

## Load - Horizontal displacement



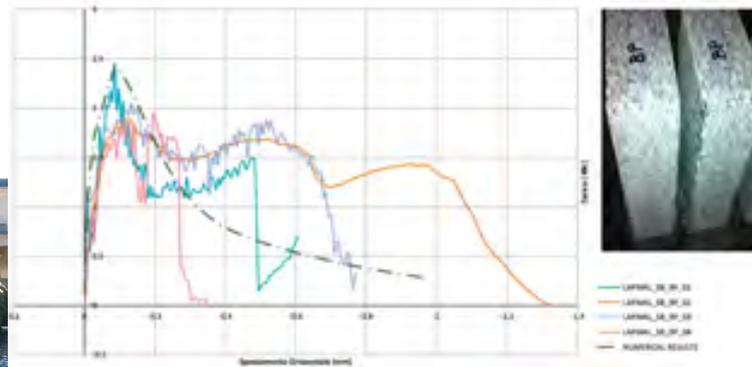
Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Conclusions

- Long-term plaster delamination frequently occurs as a consequence of the non compatible mechanical characteristics of mortar. Preventing this phenomenon is the main way of increasing the durability of repair work.



- An innovative preliminary design stage laboratory procedure for the pre-qualification of repair mortars applied to historical masonry buildings has been described.
- The evolutionary phenomena involved in the de-bonding process of mortar in a coupled stone block - mortar system have been accurately analyzed by means of the proposed experimental setup.



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Prove statiche di aderenza tra intonaco e muratura

(Sperimentazione e analisi numerica)

## PARTE SECONDA

**A. Alberto**, P. Antonaci, P. Bocca, V. Di Vasto,  
A. Grazzini, S. Valente,

Riunione di coordinamento del progetto Re-Frescos

29 Novembre 2012, Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Indice:

- Introduzione;
- Sperimentazione rendicontata al 06/07/2011;
- Sperimentazione successiva al 06/07/2011;
- Posizione della strumentazione;
- Instabilità della prova sperimentale;
- Il criterio di inizio della frattura;
- Il modello della fessura coesiva;
- Il criterio dell'evoluzione della fessura;
- Dati di ingresso;
- Risultati numerici;
- Risultati sperimentali;
- Confronto;
- Conclusioni.



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Introduzione

Poiche' l'intonaco e' uno strato sottile , a diretto contatto con l'aria, esso e' soggetto al ciclo termico giornaliero ed alle variazioni di umidita' relativa.

Se l'intonaco fosse libero, esso si dilaterrebbe in fase di riscaldamento e si contrarrebbe in fase di raffreddamento. La variazione di umidita' genera un fenomeno analogo.

La muratura, essendo protetta dall'intonaco, subisce il ciclo termigrometrico in misura ridotta. Essa rappresenta quindi un vincolo che riduce la dilatazione/contrazione dell'intonaco.

Questo vincolo genera delle tensioni tangenziali le quali, all'apice della fessura di distacco, sono molto elevate. Nasce quindi un fenomeno di cumulo del danno locale, che porta all'avanzamento dell'apice della fessura.

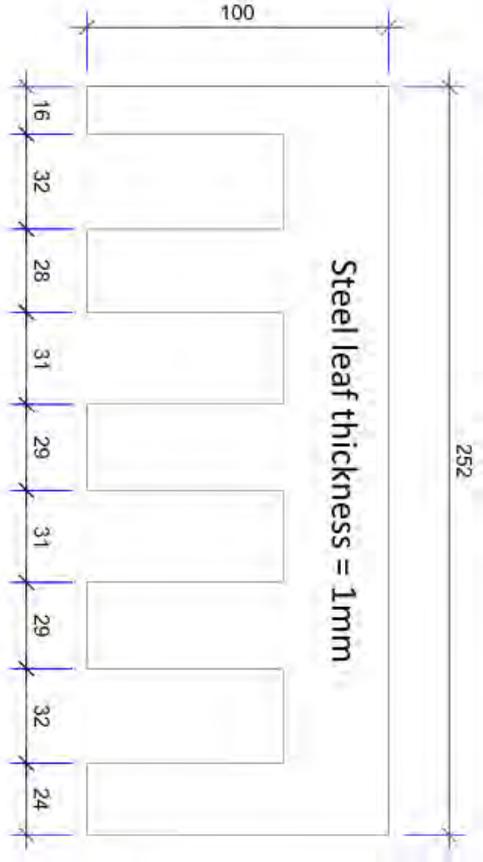
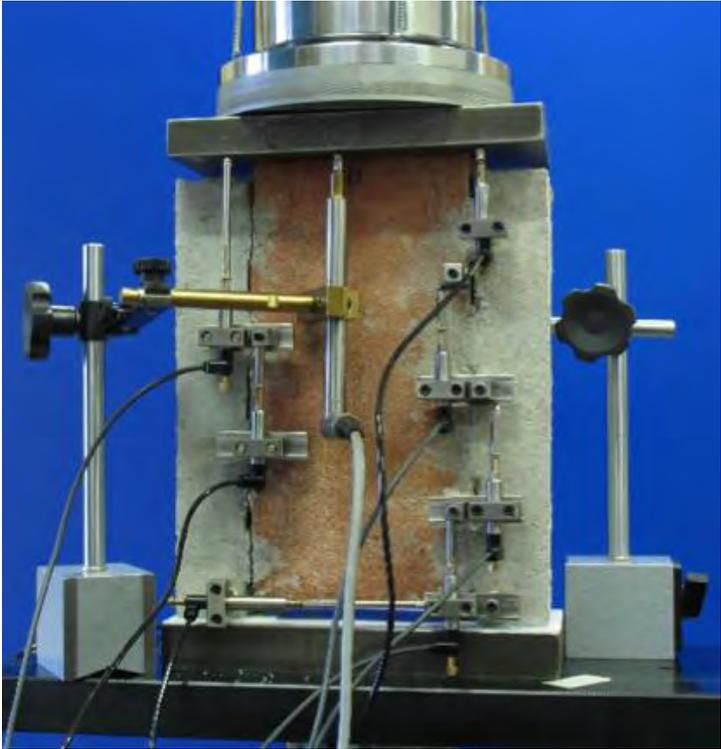
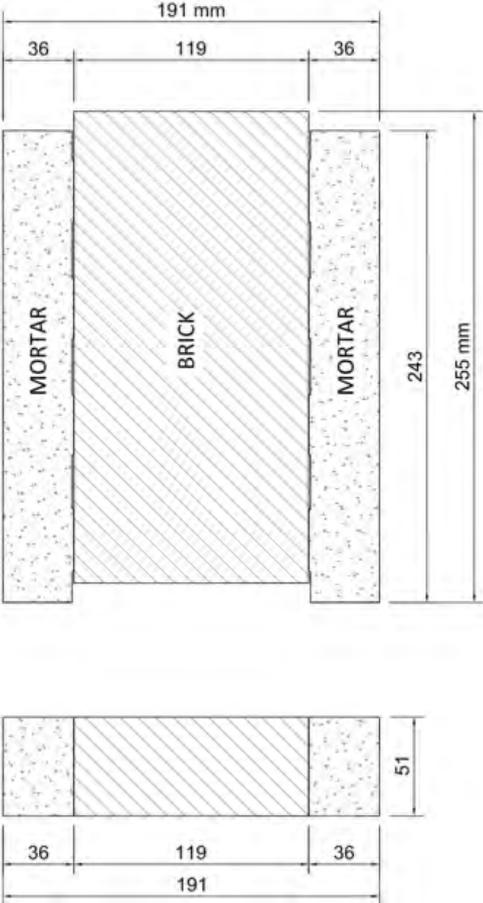


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Sperimentazione rendicontata al 06/07/2011 (malta – laterizio)



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



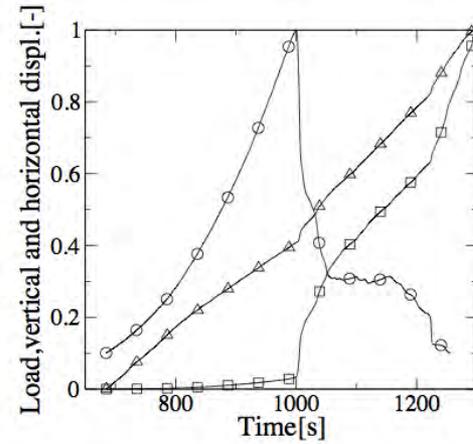
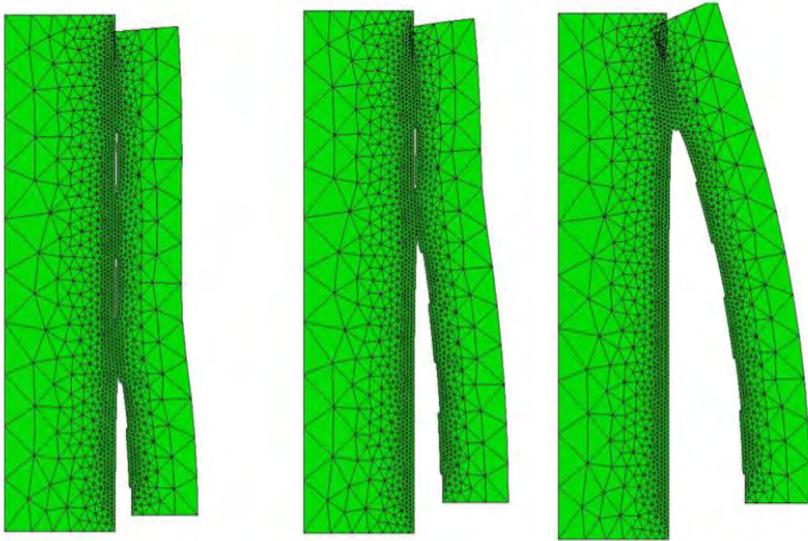


Figure: Risultati sperimentali adimensionali per il provino 1 (cerchio)carico, (quadrato)post.oriz., (triangolo)post.vert.

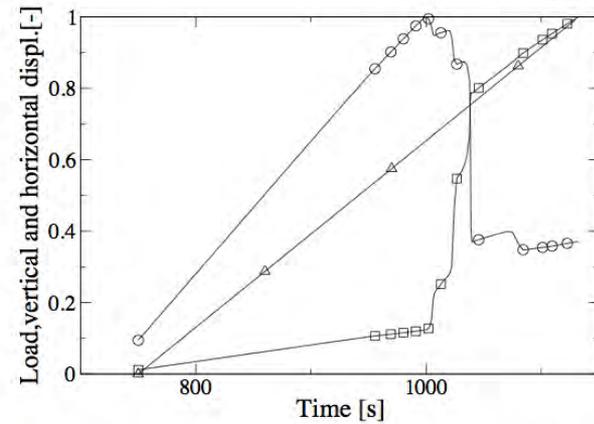
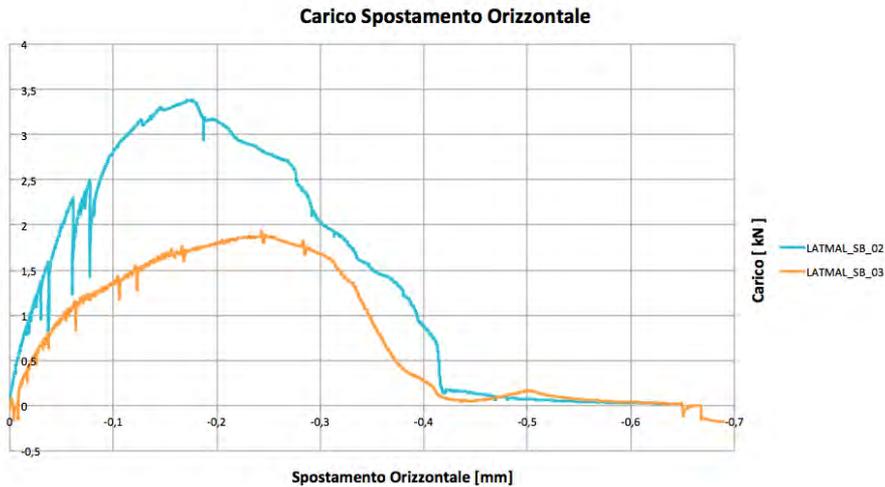
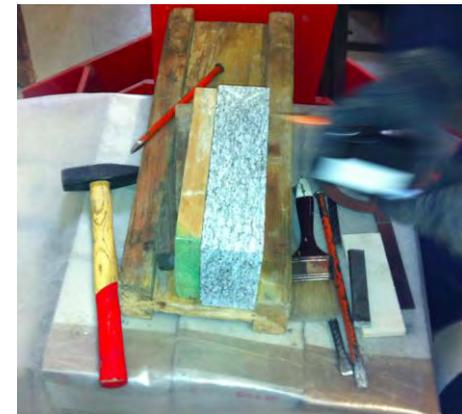
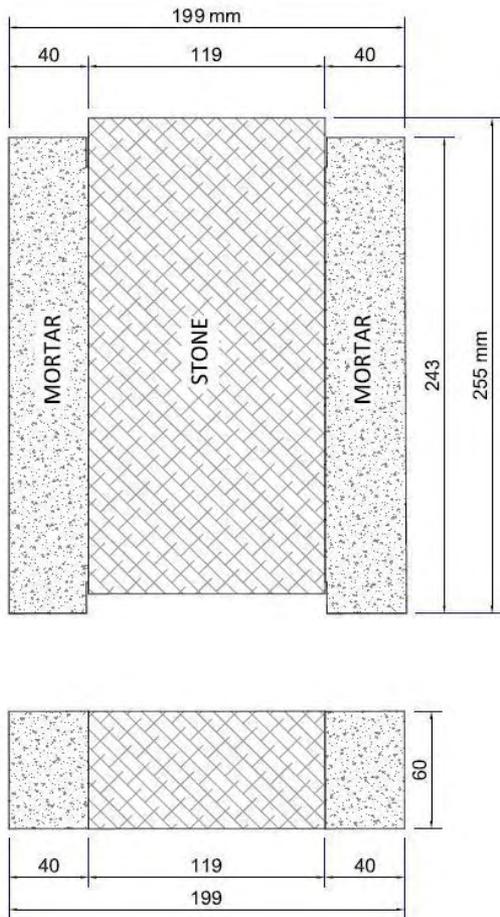


Figure: Risultati numerici adimensionali (cerchio)carico, (quadrato)post.oriz., (triangolo)post.vert.



# Sperimentazione successiva al 06/07/2011

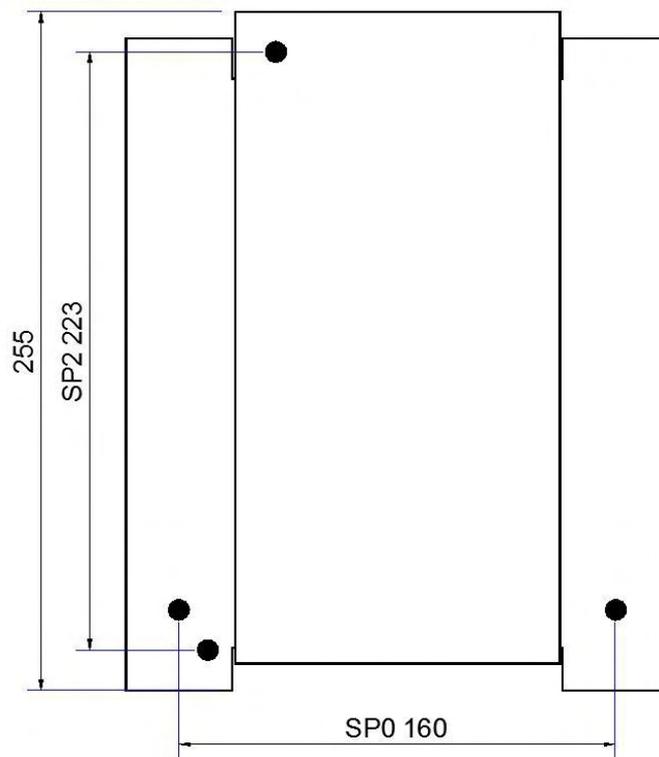


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Posizione della strumentazione



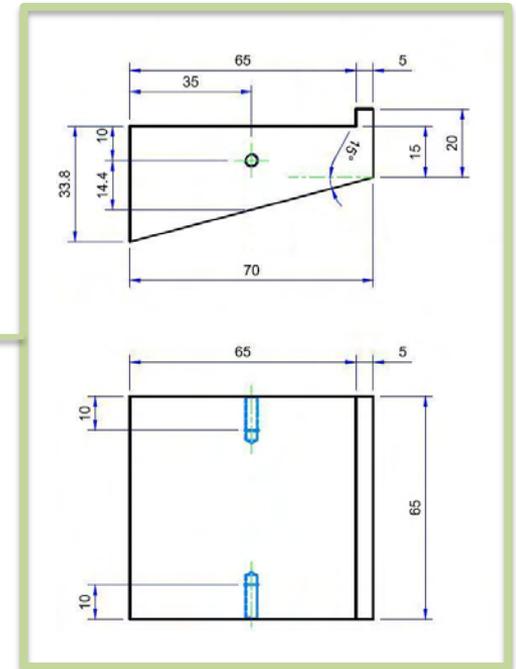
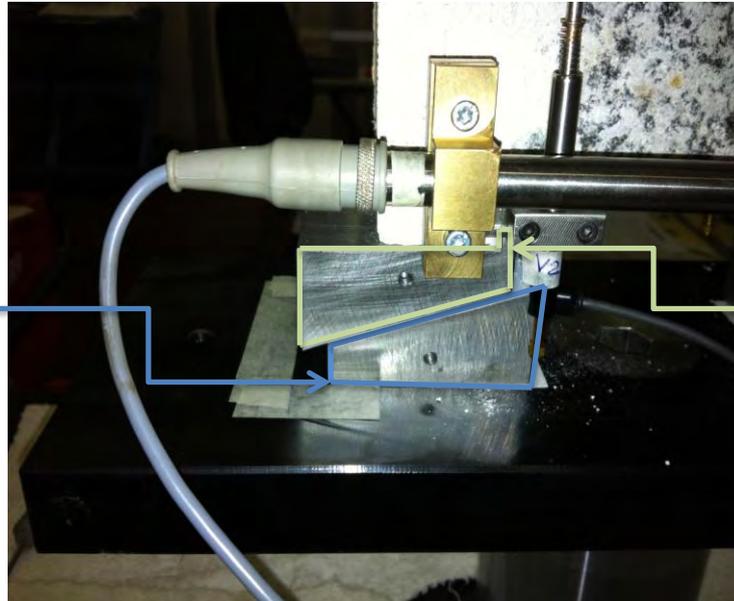
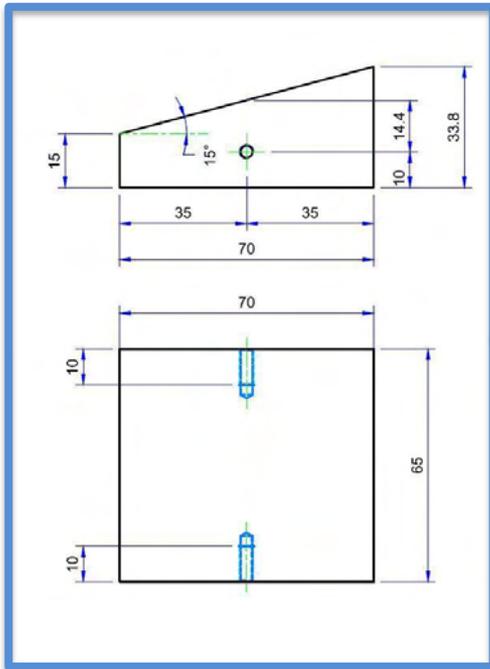
Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Instabilità della prova sperimentale

L'inserimento dei cunei e del teflon ha migliorato la stabilità della prova sperimentale.



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



## Il criterio di inizio della frattura

Il criterio di inizio della frattura e' stato assunto come segue:

$$\left(\frac{\sigma_0}{f_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_0}{f_s}\right)^2 = 1$$

Dove  $\sigma_0$  e  $\tau_0$  indicano rispettivamente le componenti di tensione ultima normale e tangenziale al giunto e  $f_t$  e  $f_s$  indicano le corrispondenti resistenze.



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)





## Il criterio di evoluzione della fessura

Le tensioni coesive sono assunte funzioni decrescenti della discontinuità di spostamento espressa da:

$$W_{eff} = \sqrt{\left(\frac{W_n}{W_{nc}}\right)^2 + \left(\frac{W_t}{W_{tc}}\right)^2}$$

Dove  $W_n$  rappresenta la componente normale della discontinuità di spostamento e  $W_t$  quella tangenziale.

$W_{nc}$  e  $W_{tc}$  sono i corrispondenti valori critici, assunti 0.5 mm.



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



## Il criterio di evoluzione della fessura

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\tau}{\tau_0} = \left[ 1 - \frac{1 - \exp(-\alpha \cdot w_{eff})}{1 - \exp(-\alpha)} \right]$$

	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$w_{nc}$ (mm)	$w_{tc}$ (mm)
Lato destro	0,2097	0,3159	0,5	0,5
Lato sinistro	0,2178	0,3249	0,5	0,5



## Dati di ingresso nella simulazione numerica

Le analisi numeriche sono state eseguite utilizzando il codice ABAQUS applicando una predefinita velocità verso il basso sulla faccia superiore del provino in pietra.

	Modulo di Young (N/mm <sup>2</sup> )	Rapporto di Poisson
Malta	3942	0,15
Pietra	21600	0,20

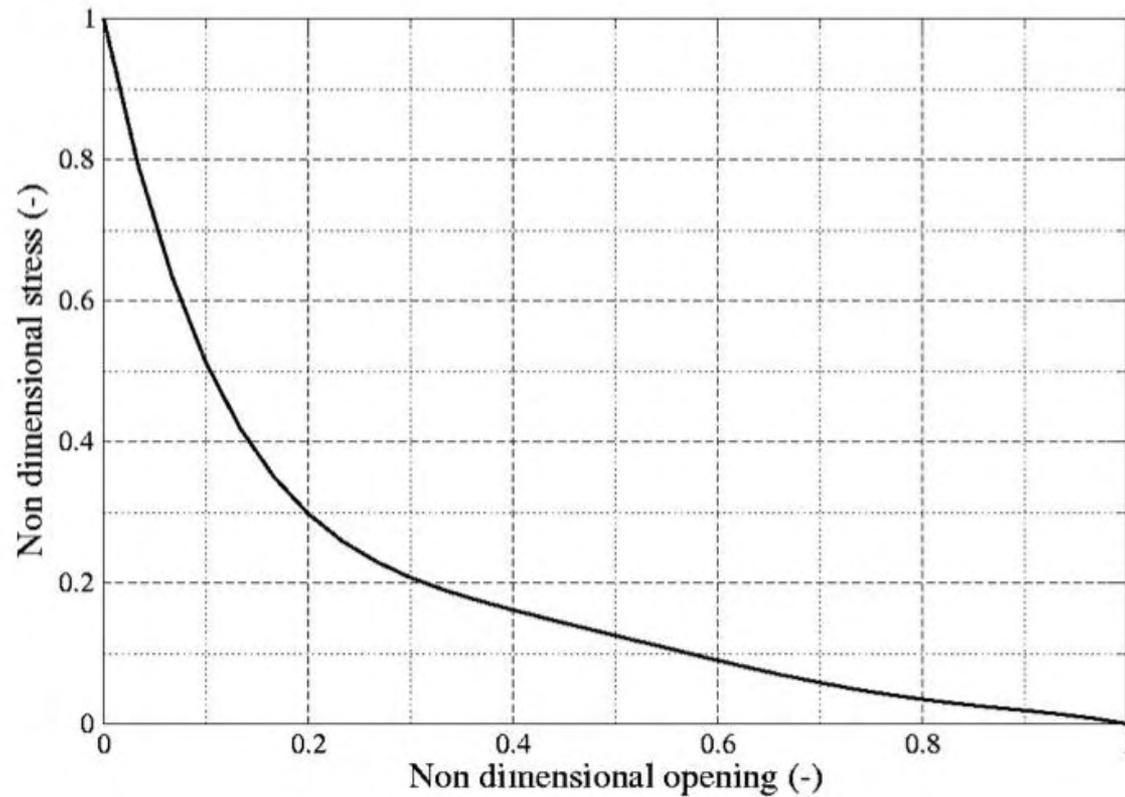


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# La legge coesiva

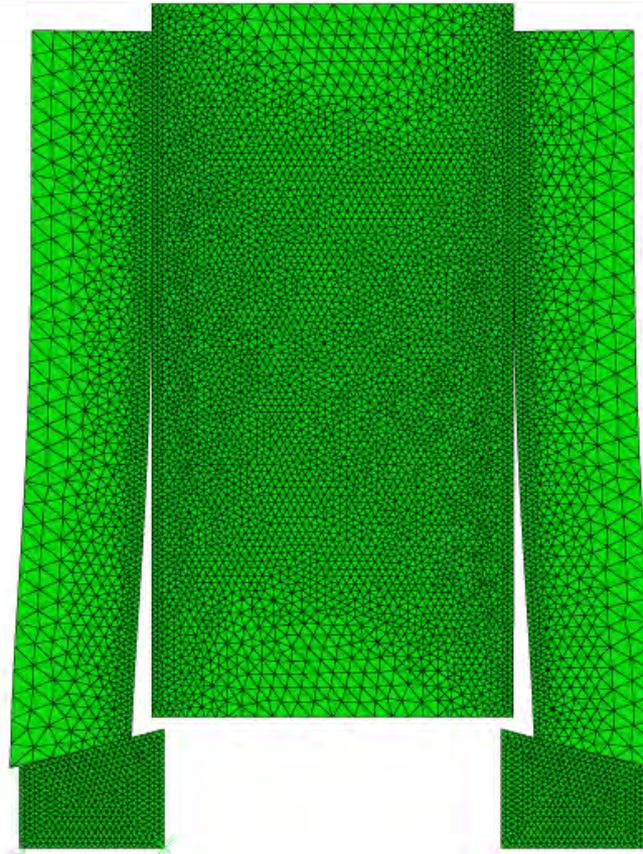


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Risultati numerici



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)

 **REGIONE  
PIEMONTE**



# Risultati sperimentali

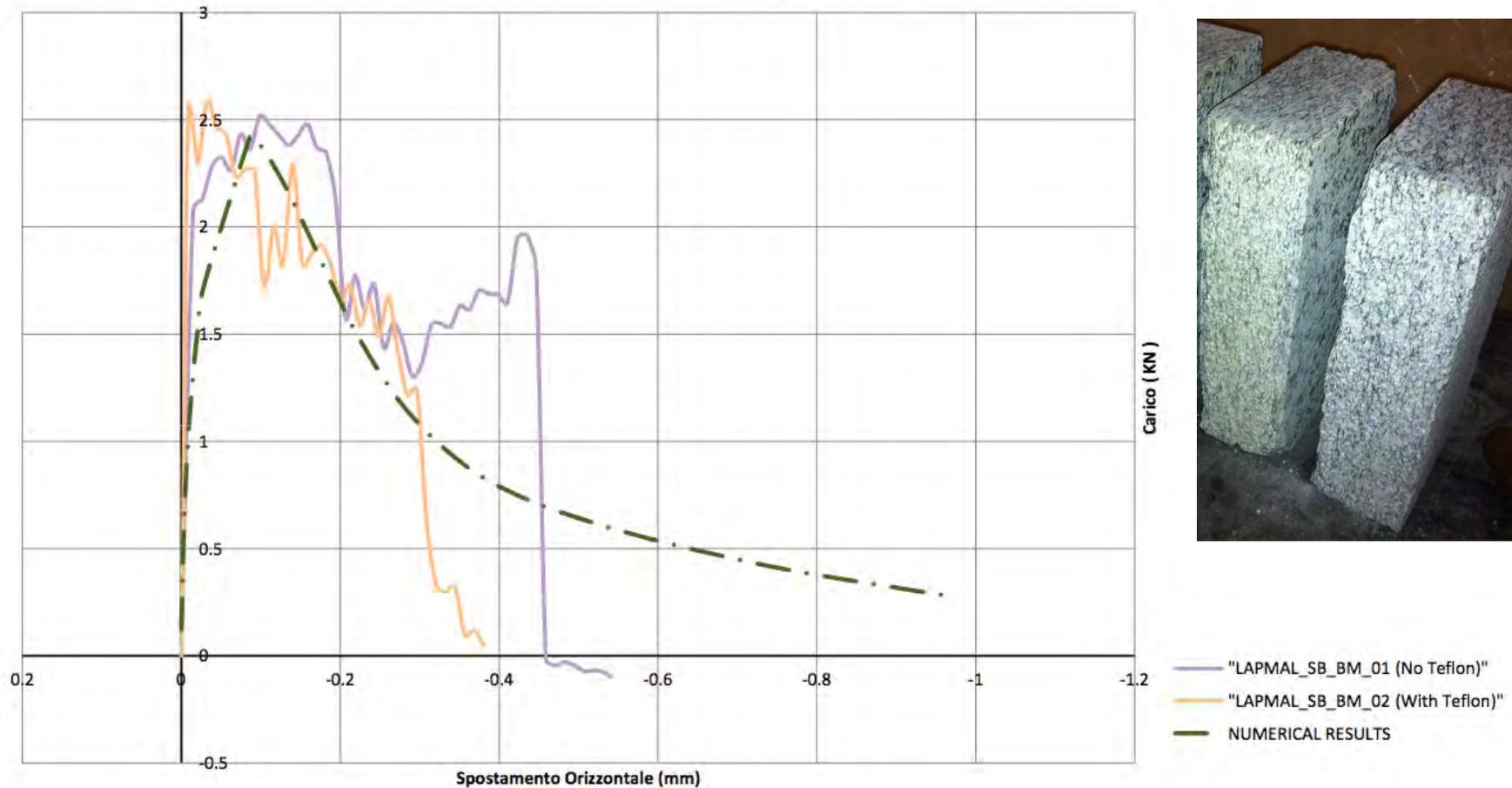


PROVINO	Max load (N)	Max horizontal displacement (mm)
LAPMAL_SB_BM_01(NoTeflon)	3660	0,4825
LAPMAL_SB_BM_02(Teflon)	2610	0,5416
LAPMAL_SB_SP_01(NoTeflon)	2320	0,4353
LAPMAL_SB_SP_02(Teflon)	2810	0,3817
LAPMAL_SB_BP_01 (Teflon)	2530	0,6077
LAPMAL_SB_BP_02 (Teflon)	1910	1,3218
LAPMAL_SB_BP_03 (Teflon)	2100	0,7695
LAPMAL_SB_BP_04 (Teflon)	1970	0,3629



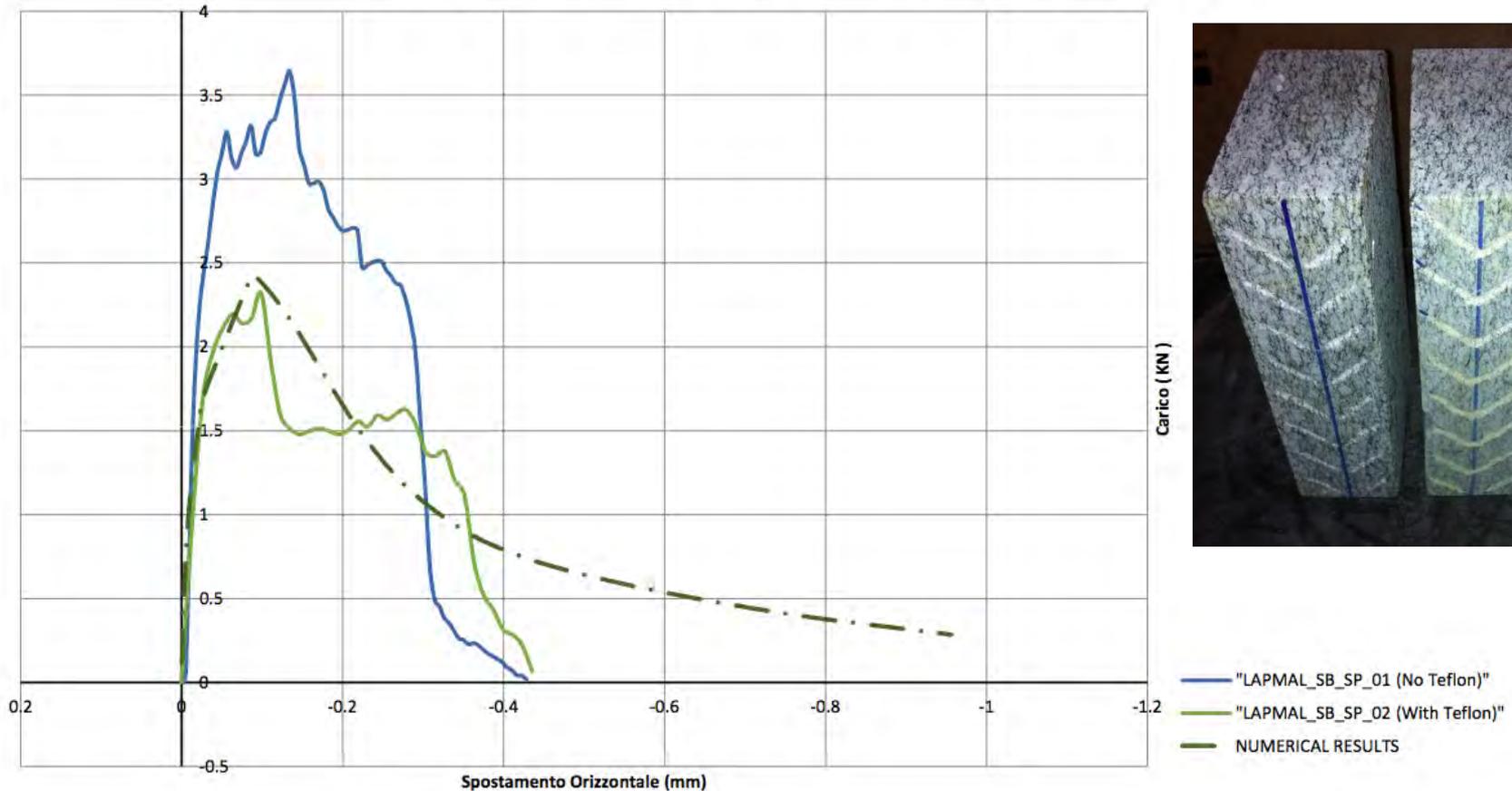
# Confronto risultati con interfaccia bocciardata a mano

## Carico Spostamento Orizzontale (Interfaccia Bocciardata a mano)



# Confronto risultati interfaccia a spina di pesce

Carico Spostamento Orizzontale (Interfaccia Spina di Pesce)



- "LAPMAL\_SB\_SP\_01 (No Teflon)"
- "LAPMAL\_SB\_SP\_02 (With Teflon)"
- · - NUMERICAL RESULTS



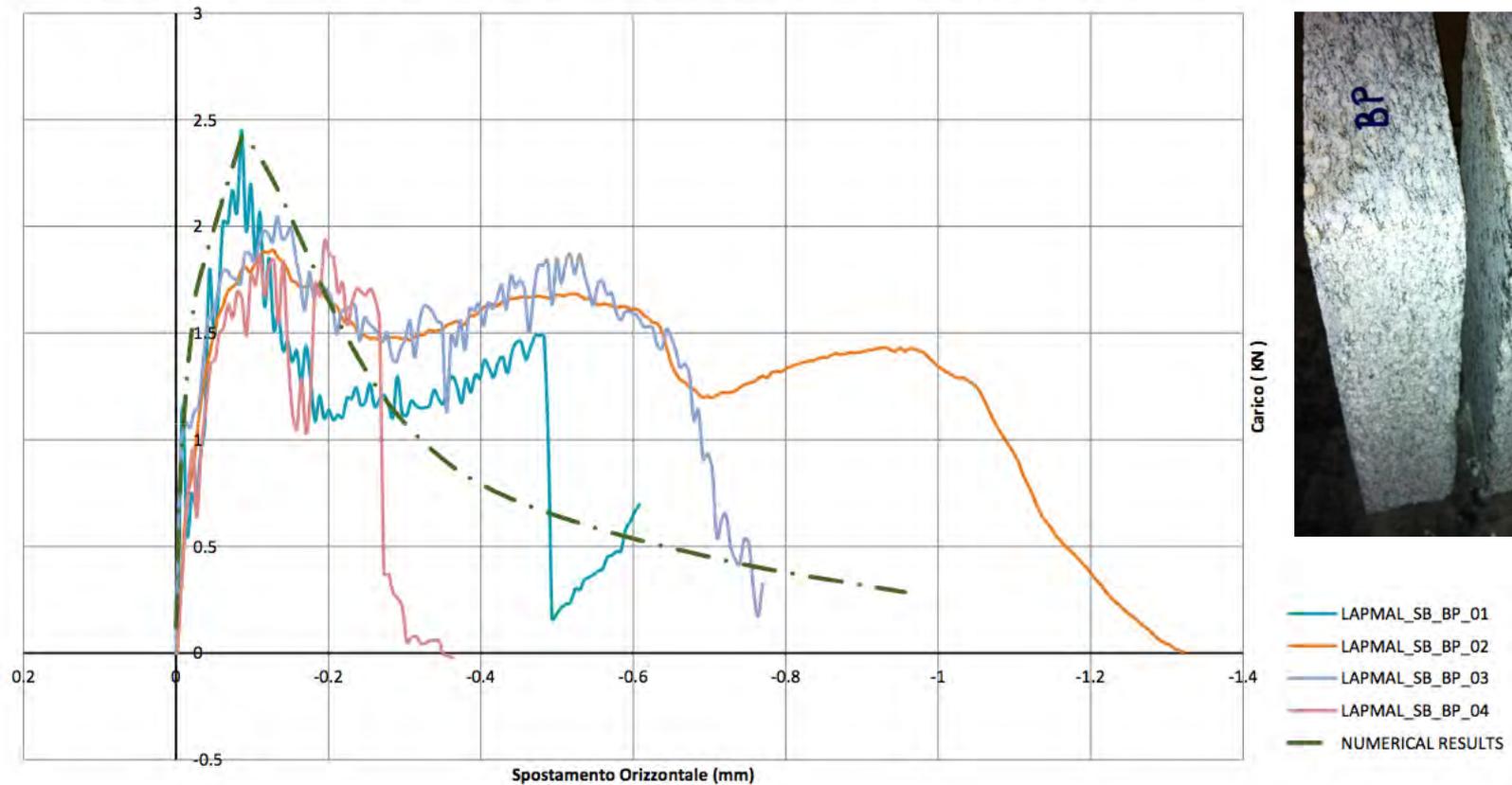
Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# Confronto risultati con bocciardatura pneumatica

**Carico Spostamento Orizzontale** (Interfaccia Bocciardatura Pneumatica Cunei con Teflon)



# Conclusioni

La modalita' sperimentale proposta e' in grado di controllare i fenomeni evolutivi responsabili del distacco dell'intonaco dalla muratura.

I risultati delle simulazioni numeriche sono in buon accordo con le rilevazioni sperimentali e quindi contribuiscono a chiarire il comportamento meccanico del provino.

Con questo protocollo di prova abbiamo confrontato diverse soluzioni di collegamento tra intonaco e muratura .



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



Grazie per l'Attenzione



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



# **DIAGNOSTIC APPLICATION OF NONLINEAR ULTRASONICS TO CHARACTERIZE DEGRADATION BY EXPANSIVE SALTS IN MASONRY SYSTEMS**

**P. Antonaci, P. Bocca, A. Formia**

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

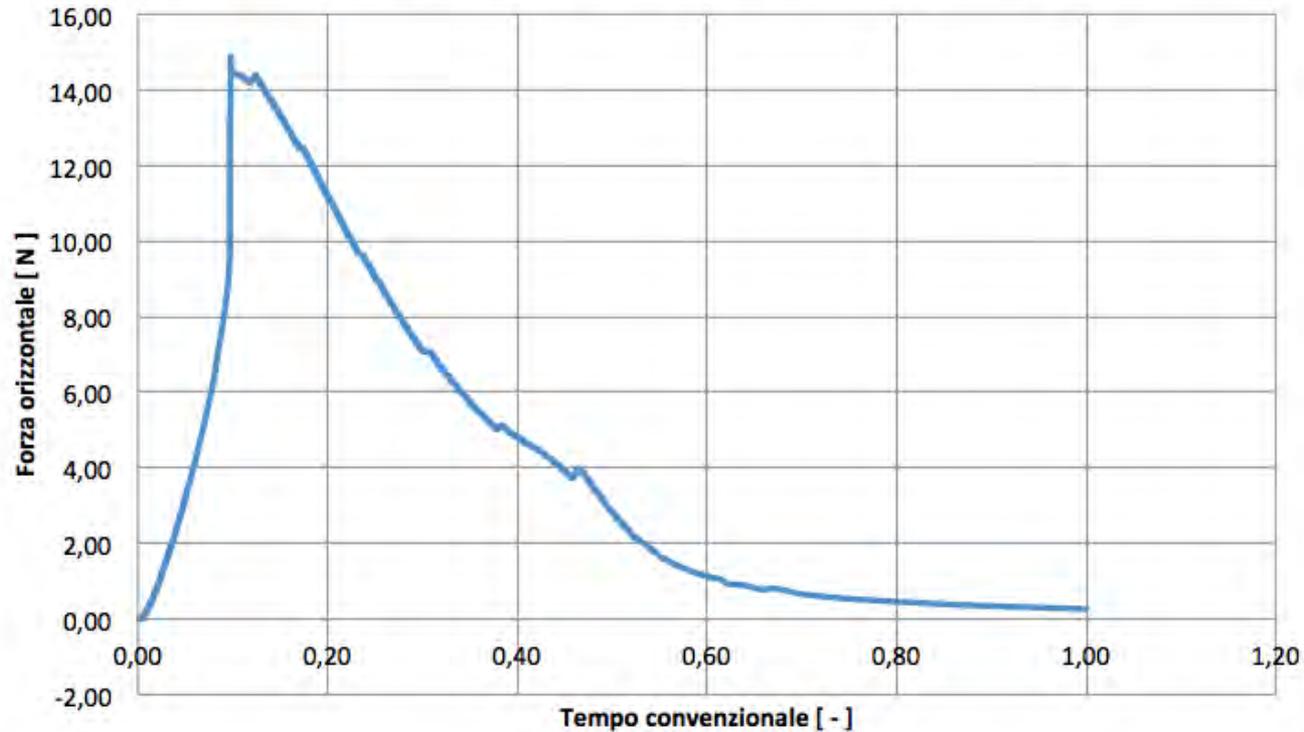
**J.M. Tulliani**

Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia



# Appendice (non simmetria della risposta)

Grafico rappresentativo della non simmetria di risposta

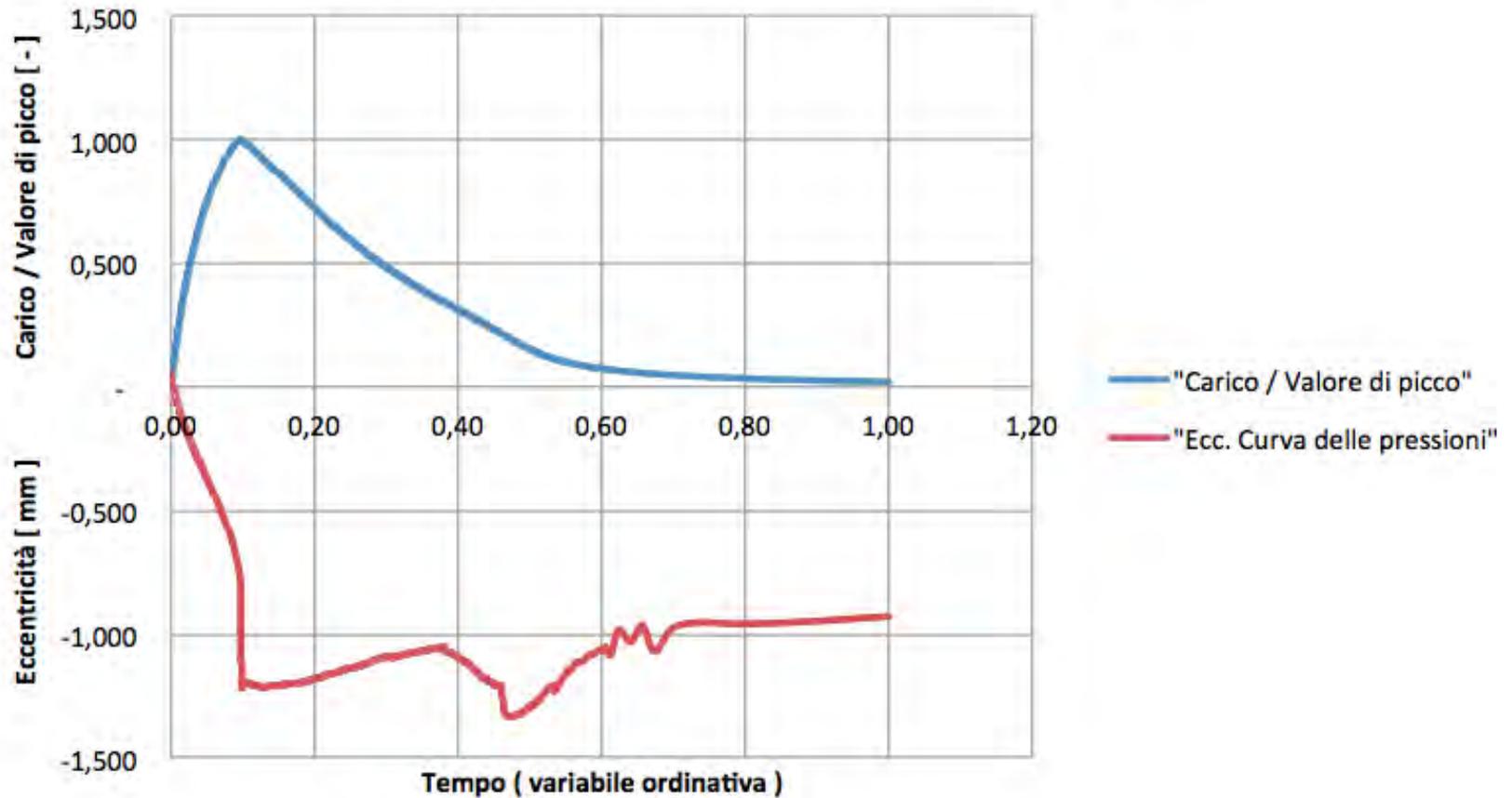


Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

**RE-FRESCOS project**  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)



## Grafici rappresentativi della non simmetria di risposta



Riserva Naturale Speciale  
del Sacro Monte di Varallo

RE-FRESCOS project  
[www.refrescos.polito.it](http://www.refrescos.polito.it)

