

# **Progetto RE-FRESCOS**

Atti della Giornata Seminariale  
Mercoledì 6° Luglio, 2011, Aula Albenga (DISTR)

Coordinatore: Prof. Alberto Carpinteri

# **Giornata Seminariale Progetto RE-FRESCOS**

**Mercoledì 6 Luglio, 2011, ore 9:30**

**Aula Albenga (DISTR)**

## **Programma della Giornata**

<b>Orario</b>	<b>Relatore</b>	<b>Titolo dell'intervento</b>
<b>10:00-10:20</b>	<b>Dr. M. Zerbinatti</b>	<b>Classificazione di problemi ricorrenti, riconoscimento di materiali, ipotesi di modi di intervento. L'esempio dell' "intonaco nero"</b>
<b>10:20-10:40</b>	<b>Prof. G. Lacidogna</b>	<b>Cappella XVII del Sacro Monte di Varallo - Indagine sulla stabilità degli intonaci affrescati e delle lesioni murarie con la tecnica EA, Analisi delle proprietà elettriche delle statue in terracotta</b>
<b>10:40- 11:00</b>	<b>Dr. A. Grazzini Prof. S. Valente</b>	<b>Valutazione sperimentale della durabilità dell'interfaccia malta consolidante - muratura storica</b>
<b>11:00- 11:20</b>	<b>Dr. A. Schiavi Dr. P. Tarizzo</b>	<b>SONOSCOPIA ENDOSUPERFICIALE: La realizzazione dell'apparato sperimentale per la diagnosi sugli affreschi del Sacro Monte di Varallo</b>
<b>11:20- 11:40</b>	<b>Prof. G. P. Scarzella</b>	<b>Dissemination and diffusion of the results</b>

**Intervento conclusivo da parte della dott.ssa Elena De Filippis**

**TAVOLA ROTONDA (ore12:00)**

# Progetto di ricerca *REFRESCOS*

*RESPONSABILE: PROF. ING. ALBERTO CARPINTERI*

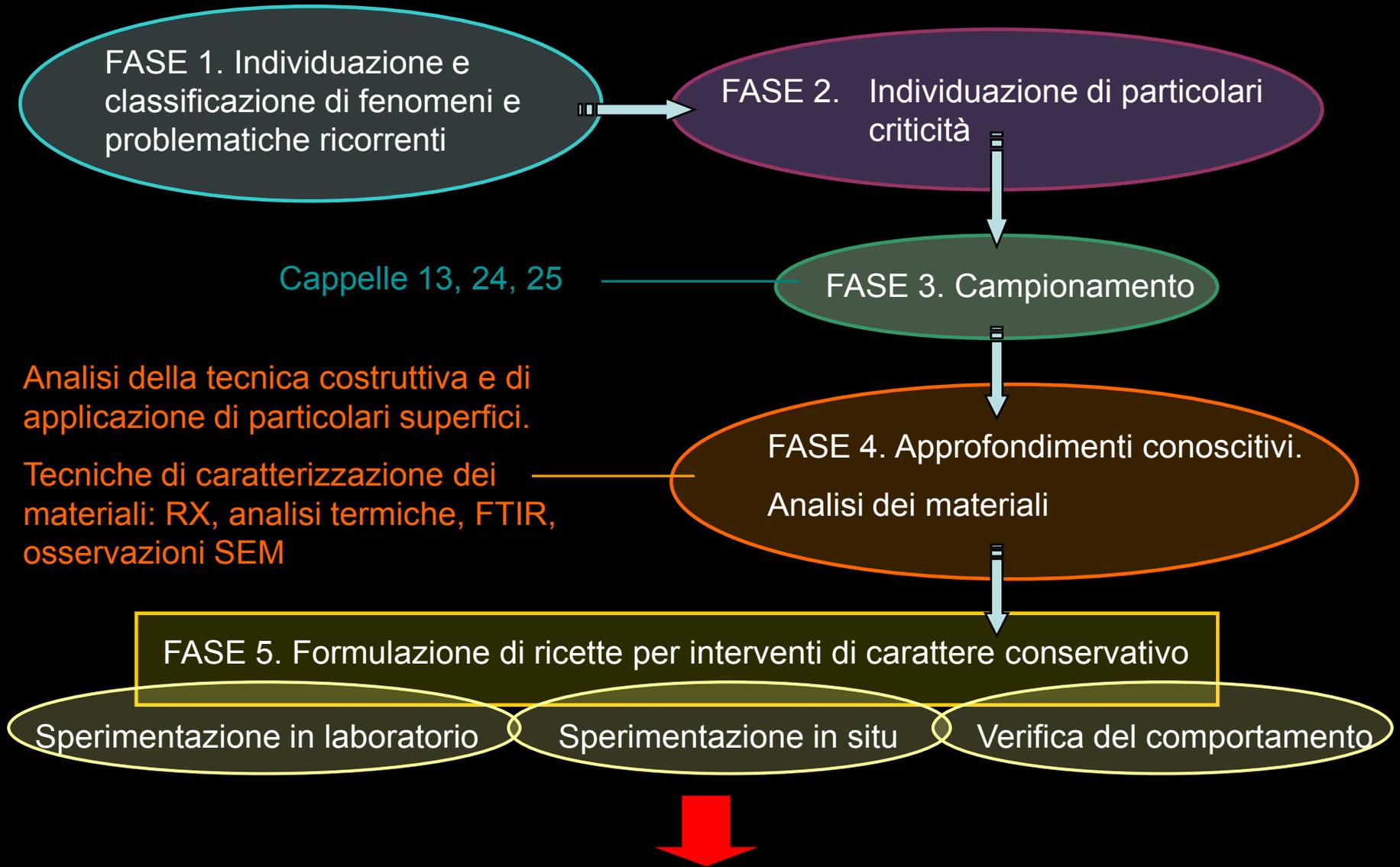
**ATTIVITÀ SEMINARIALE**  
**7 LUGLIO 2011**

**PRESENTAZIONE WP 1**

**ARGOMENTO:**

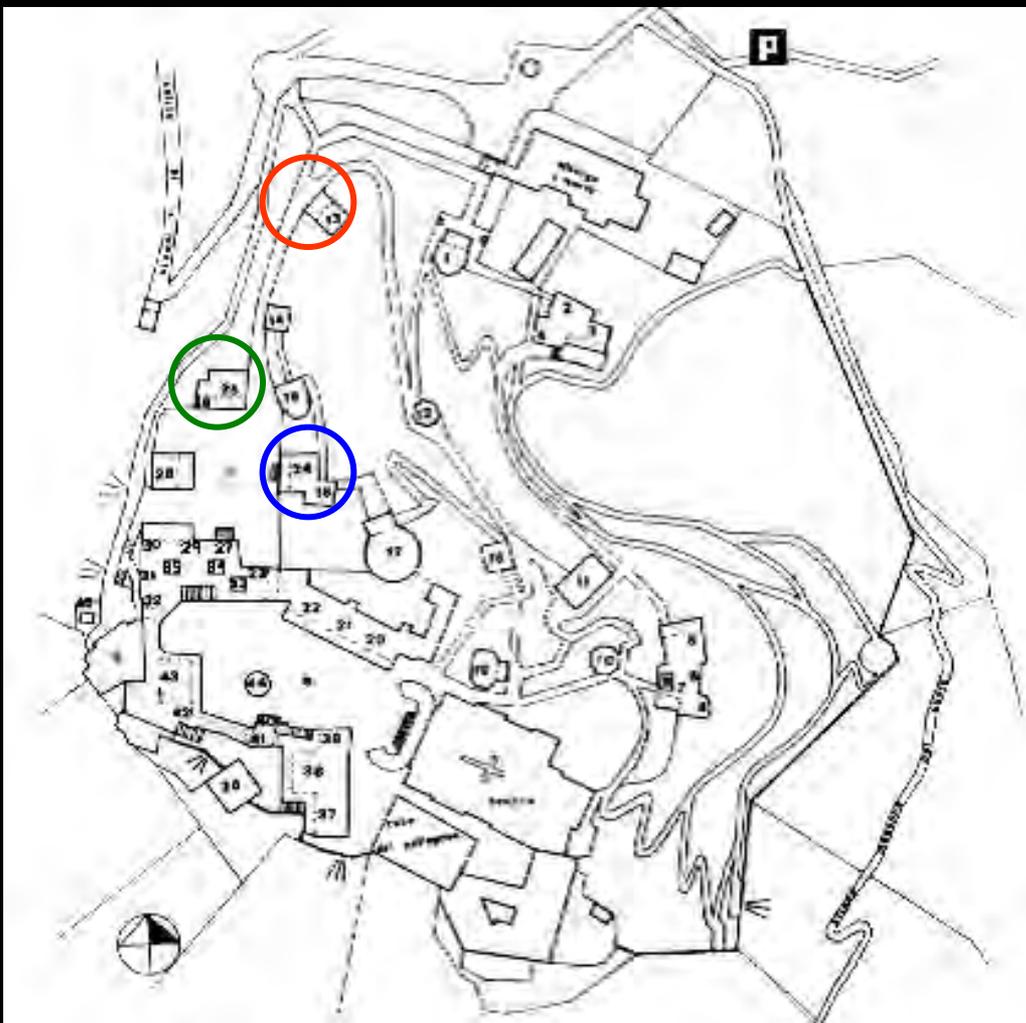
*Classificazione di problemi ricorrenti, riconoscimento di materiali, ipotesi di modi di intervento. L'esempio dell'"intonaco nero"*

## GLI STEP DELLA RICERCA FINO AD ORA CONDOTTA



**OBIETTIVO:** fornire agli operatori delle formulazioni e/o delle miscele di materiali adatte per interventi conservativi, nonché “modi” adeguati di applicazione.

## FASE 3: PIANO DI CAMPIONAMENTO



Totale campioni prelevati sulle cappelle evidenziate:



Cappella 13, 8 campioni



Cappella 25, 1 campione



Cappella 24, 3 campioni

## FASE 3: PIANO DI CAMPIONAMENTO

In questa prima fase, l'attenzione è stata rivolta ai campioni di intonaco delle pareti esposte a Nord delle cappelle 13 e 25 caratterizzate da:

- una superficie estremamente liscia e compatta,
- il colore grigio bluastrò (da toni più scuri prossimi al nero a toni sensibilmente più chiari),
- la capacità di durare nel tempo (su di un arco temporale di secoli) nonostante le difficili condizioni climatiche e ambientali e l'esposizione dei fronti all'azione dilavante dell'acqua di "stravento".



Particolare dell'intonaco della cappella 25



Particolare dell'intonaco della cappella 13

## FASE 3: PIANO DI CAMPIONAMENTO

- Le murature del Sacro Monte di Varallo sono state costruite con pietre locali di varia origine geologica, con prevalenza di graniti.
- Per migliorare la presa dell'intonaco sulla superficie, sono presenti uno strato di **rinzaffo** (cm 1,5 circa di spessore), **l'arriccio** (cm 2÷3 di spessore) e la **finitura**.
- I campioni prelevati sono comprensivi della **finitura e dell'arriccio**.

Per effettuare le analisi, lo strato di colore è stato separato dalla malta sottostante. Tale malta è stata macinata per separare gli aggregati dal legante. È stato analizzato come aggregato il materiale trattenuto dal setaccio con diametro di 600  $\mu\text{m}$ . La frazione passante, è stata ulteriormente macinata, setacciata con una rete metallica avente aperture da 40  $\mu\text{m}$  e analizzata come “legante”.



Campione 10C13

Strato di corpo+finitura di colorazione grigio-nera.



Campione 10C25

Strato di corpo+finitura di colorazione grigia

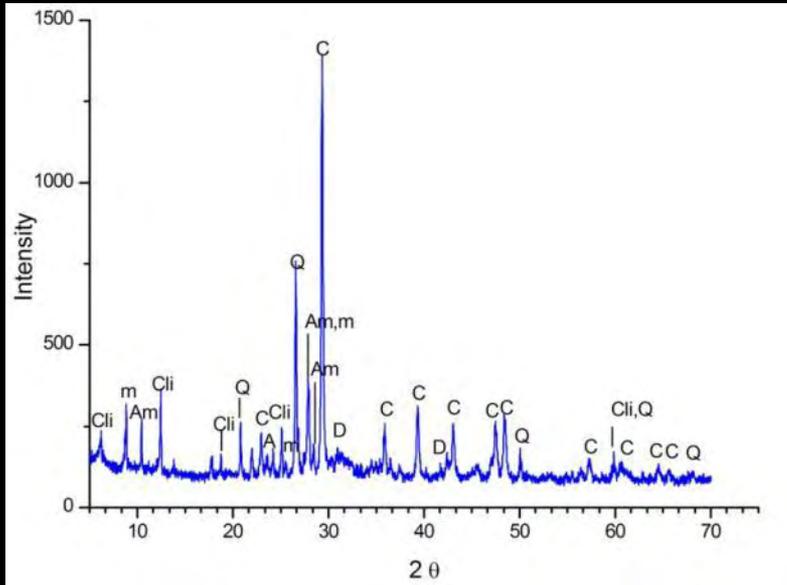
## FASE 4: ANALISI DEGLI INTONACI\_ GLI AGGREGATI

- La matrice del legante compatta, omogenea e priva di aggregati di grosse dimensioni.
- E' stato osservato che il legante ha una struttura microcristallina, l'addensamento è elevato (circa 60%) e il rapporto carica/legante è pari a 3:2
- Gli aggregati risultano costituiti da clasti derivanti da un processo naturale, con granulometria compresa nel campo della sabbia media grossolana (0,2-2 mm) e frazione fine (0,06-0,2 mm)
- I clasti si presentano prevalentemente subangolosi e subarrotondati e la composizione mineralogico-petrografica è omogenea e riferibile alle **alluvioni del fiume Sesia**.
- Le litologie più rappresentate sono le rocce silicee (gneiss, micascisti, quarziti), i minerali principali sono quarzo+albite±K-feldspato+clinozoisite+mica bianca±biotite.

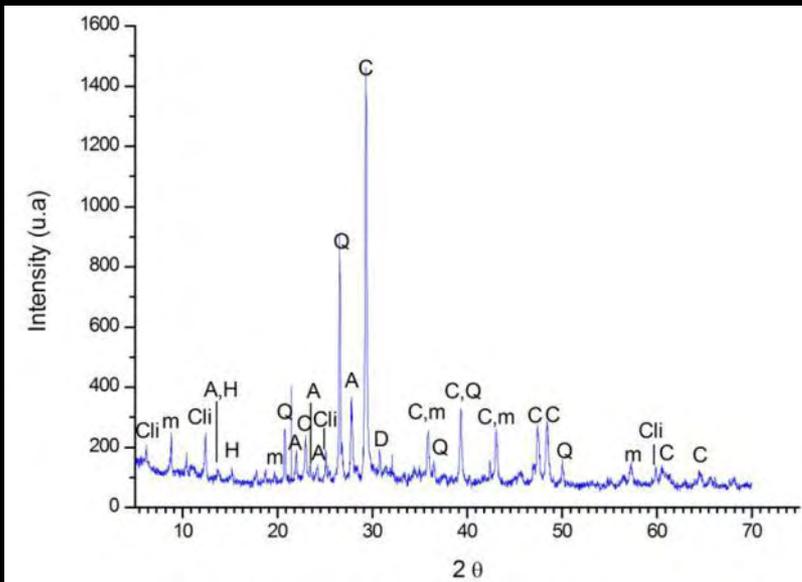
***Nota:** per tale ragione sono state prelevate sabbie sia dal fiume Sesia prima della confluenza con il torrente Mastallone, sia dal torrente Mastallone stesso.*

*Saranno prodotti campioni dello strato di corpo e di finitura con tali sabbie.*

## FASE 4: ANALISI DEGLI INTONACI \_ IL LEGANTE



Diffrazione a rx del legante del campione 10C13



Diffrazione a rx del legante del campione 10C25

Elemento	Intonaco 10C13 (% in peso)	Intonaco 10C25 (% in peso)
Ca	70.07	48.09
Si	5.62	25.91
Mg	17.29	22.12
Fe	7.02	3.87

Analisi EDS degli elementi rintracciati negli intonaci delle cappelle 13 e 25

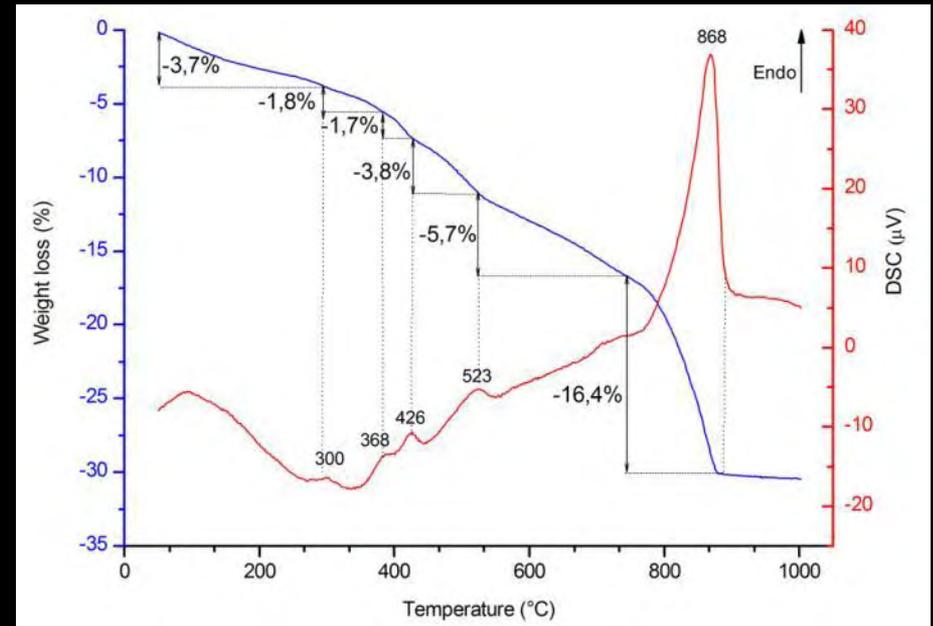
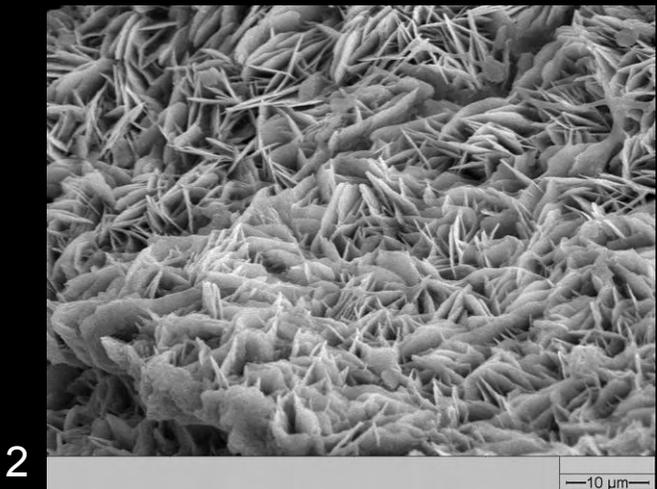
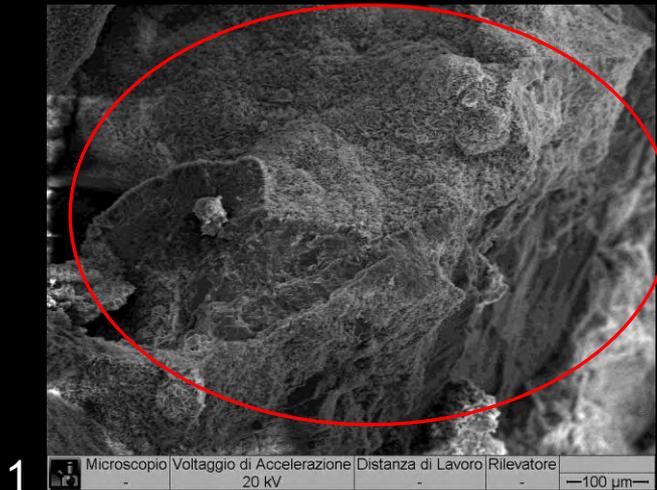


**IMPIEGO DI CALCE  
MAGNESIACA PROVENIENTE  
DAL MONTE FENERA**

## FASE 4: ANALISI DEGLI INTONACI \_ IL LEGANTE

Nelle osservazioni al SEM sui campioni 10C13 e 10C25, sono stati rintracciati dei depositi di cristalli lamellari simili a rosette, riconducibili a **idromagnesite**, un carbonato basico di magnesio che si forma in presenza di particolari condizioni di acidità dell'ambiente.

Diversi studi dimostrano che, anche grazie a questa particolare struttura lamellare che contribuisce a garantire una maggiore omogeneità tra legante e aggregato, le malte hanno una migliore resistenza meccanica.

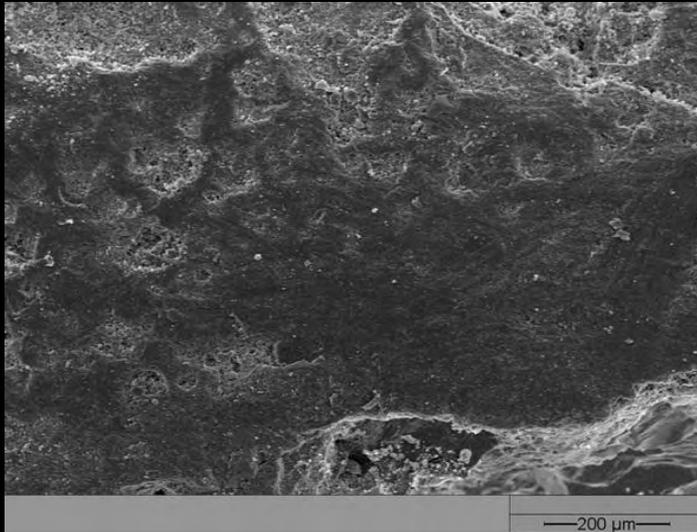


Curva TG-DTA del legante del campione 10C25. La successione di picchi endotermici è ricollagabile alla presenza di idromagnesite

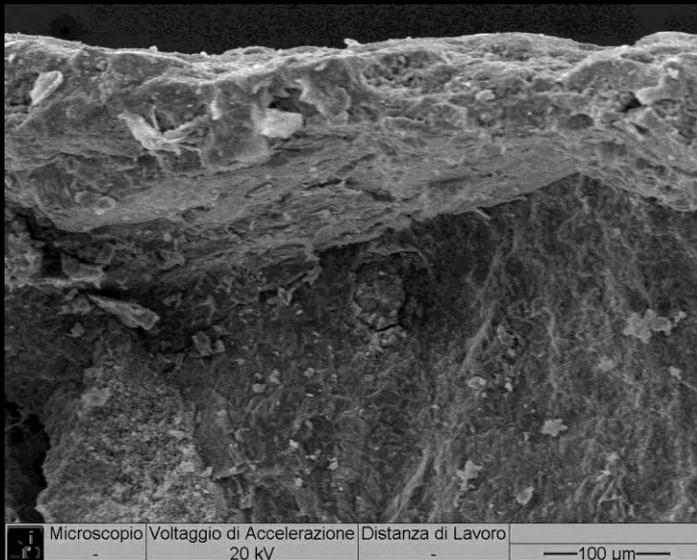
Microfotografie cristalli di idromagnesite.

1. Osservazione in sezione X150
2. Osservazione dei cristalli X 1500

## FASE 4: ANALISI DEGLI STRATI DI FINITURA



Sezione sottile della finitura dell'intonaco della cappella 13 con indicazione del relativo spessore



Dal comportamento termico osservato e per la mancanza di ossidi di Fe e Mn tipici delle terre nere, è stata supposta l'origine carboniosa del pigmento nero utilizzato.

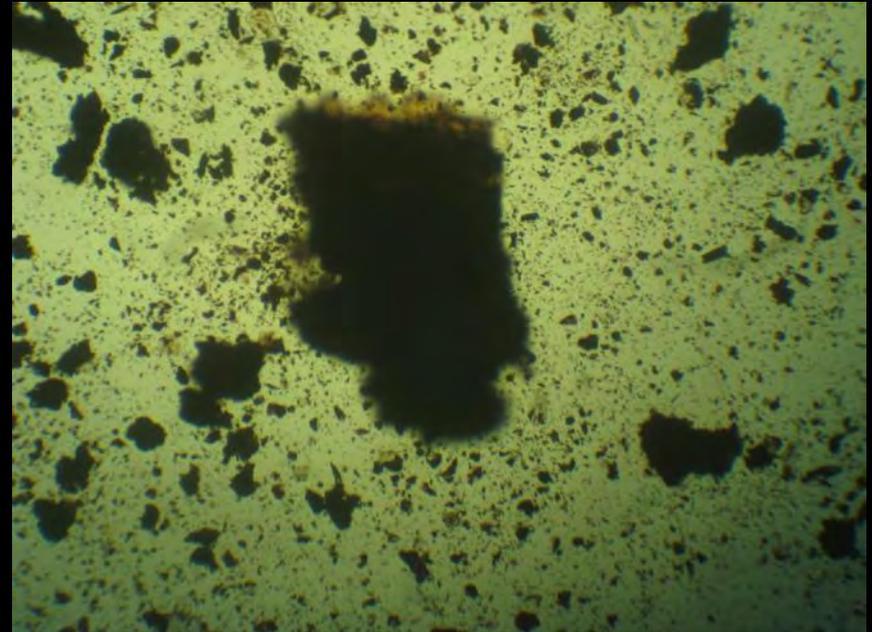
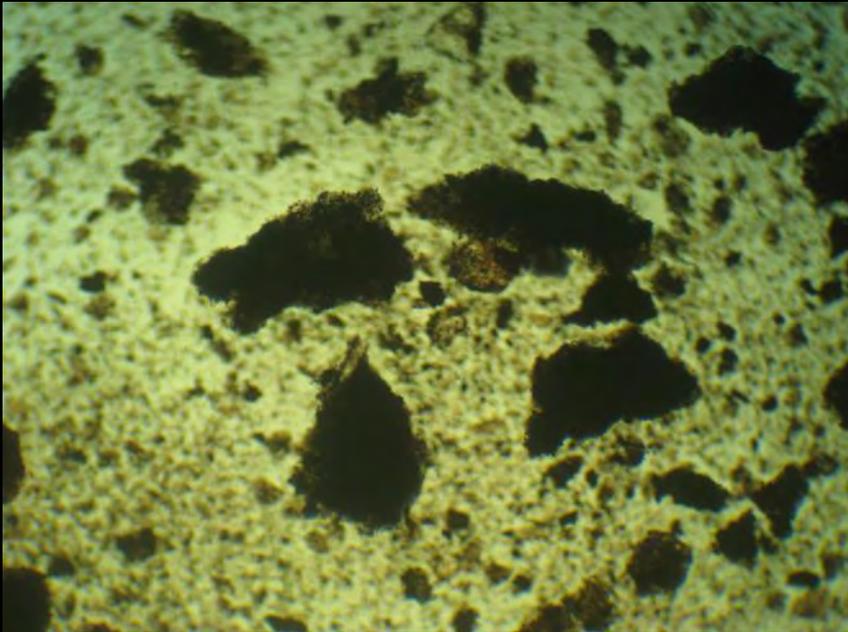
Micrografie SEM. Finitura dell'intonaco della cappella 13. Osservazione in superficie e in sezione.

## FASE 4: ANALISI DEGLI STRATI DI FINITURA

Analizzando le materie prime reperibili in prossimità del sito, è stata considerata probabile l'ipotesi che il pigmento nero sia legato all'impiego delle **TERRE NERE DI BOCA**

Nella zona del Novarese, a Boca, a circa 40 km da Varallo, sono presenti dei giacimenti di lignite, così come descritto da Barelli, da cui dipende la colorazione nera di queste terre.

La terra di Boca è presente in due tipologie, entrambe analizzate tramite analisi degli elementi: una è più polverosa (secca), ed è costituita quasi totalmente da silice, l'altra è argillosa, (plastica), costituita anche da una percentuale rilevante di alluminio.



Osservazione al microscopio petrografico dei granuli di silice coperti da frammenti di lignite.

## FASE 5: PRIME SPERIMENTAZIONI DI INTONACI CON FINITURA LISCIA



Sull'intonaco dello strato di corpo in fase di carbonatazione sono state stese diverse miscele di finitura, con uno spessore variabile tra 100 e 200  $\mu\text{m}$  circa

**ACCORGIMENTI TECNICI BASATI SULL'ESPERIENZA IN LABORATORIO E SUL CONFRONTO CON UNA RESTAURATRICE:**

- abbondante bagnatura del supporto
- stesura della malta per la finitura con spatole metalliche flessibili da restauro di spessore ridotto (circa 1 mm)
- non deve superare i 15 minuti per campitura, onde evitare che l'impasto cominci a fare presa
- eccedere i 200  $\mu\text{m}$  di spessore significa facilitare la formazione di *craquelure* superficiali estese, vanificando di fatto l'utilità stessa della finitura
- una schiacciatura prolungata e reiterata, tende a fare "risalire" verso la superficie maggiori quantità di legante e aggregati finissimi, rendendo più "magra" la parte sottostante di miscela (con possibili problemi di adesione al supporto in fase di carbonatazione).
- per questo motivo è necessario stendere la finitura in due strati



## FASE 5: PRIME SPERIMENTAZIONI DI INTONACI CON FINITURA LISCIA



Campione di intonaco prodotto in laboratorio accostato all'intonaco in opera sul lato est della cappella 13 (sotto la striscia di riferimento cromatico è visibile una data incisa: 1508).



Campione di intonaco prodotto in laboratorio accostato all'intonaco in opera sul lato nord della cappella 25 (presso il punto di prelievo dei campioni analizzati).

## FUTURI SVILUPPI DELLA RICERCA

Dovranno essere ancora approfonditi alcuni aspetti nodali tra cui:

- ▣ Individuare esattamente la provenienza del/dei pigmento/i ed i rapporti quantitativi nella miscela di tali finiture lisce di colore grigio scuro, in modo da approssimare in modo più soddisfacente il colore medio rilevabile presso le diverse cappelle,
- ▣ la disponibilità attuale di materiali adatti per preparare miscele per malte da restauro compatibili con i manufatti esistenti ed in grado di offrire prestazioni adeguate,
- ▣ approfondire ancora taluni aspetti di posa in opera con l'aiuto di restauratori e di riquadratori esperti,
- ▣ predisporre manufatti in scala reale sia in laboratorio sia al Sacro Monte di Varallo (qui, le prove saranno condotte in *corpore vili*, non sulle cappelle), anche per testare i campioni prodotti nel loro reale ambiente di applicazione per i prossimi 24-36 mesi,
- ▣ effettuare prove per la caratterizzazione fisica delle malte (in situ ed in laboratorio) secondo le raccomandazioni NorMaL o le Norme UNI- NorMaL in vigore, ed ulteriori prove per la caratterizzazione fisica, mineralogica, petrografica e chimica di altre malte in opera.

# **Giornata Seminariale Progetto RE-FRESCOS**

*Mercoledì 6 Luglio, 2011, Aula Albenga (DISTR)*



## **Work Package (WP) 2**

**Damage analysis of decorated surface structural support by the Acoustic Emission technique**

---

### **Cappella XVII del Sacro Monte di Varallo**

- (a) Indagine sulla stabilità degli intonaci affrescati e delle lesioni murarie con la tecnica EA**
- (b) Analisi delle proprietà elettriche delle statue in terracotta**

# **Cappella XVII del Sacro Monte di Varallo**

**(a) Indagine sulla stabilità degli intonaci affrescati e delle lesioni murarie con la tecnica EA**

# Sacro Monte di Varallo

**Il Sacro Monte di Varallo è un complesso artistico-religioso composto da quarantacinque Cappelle e una Basilica, decorate da affreschi e sculture che raccontano la vita di Cristo, e realizzate fra la fine del XV e il XVIII secolo dai maggiori artisti piemontesi e lombardi.**

**Il Sacro Monte è anche un bell'esempio di parco-giardino, organizzato secondo i modelli del giardino all'italiana, con siepi, viottoli, zone boschive, ed architetture volte a rappresentare il concetto della "Città Ideale".**



**Visione prospettica della Piazza dei Tribunali**

# Cappella XVII - Trasfigurazione di Cristo sul Monte Tabor

Come primo oggetto di indagine con la tecnica delle emissioni acustiche è stata scelta la Cappella XVII.

Questa cappella fu costruita nell'ambito del progetto generale di rinnovamento del Sacro Monte voluto dal finanziere milanese Giacomo D'Adda e redatto dall'architetto perugino Galeazzo Alessi dopo la prima metà del 1500.

Risultava già iniziata, per la parte relativa alle fondazioni, nel 1572, ma venne ultimata soltanto negli anni sessanta del Seicento.



**Gli affreschi (1666-1675 circa) sono opera dei fratelli Montaldo detti “i Danedi”, artefici anche della decorazione della cupola della Basilica del Sacro Monte.**



**Mentre le statue, attribuite a Pietro Francesco Petera di Varallo e a Giovanni Soldo da Camasco, furono ultimate negli anni Settanta del XVII secolo.**



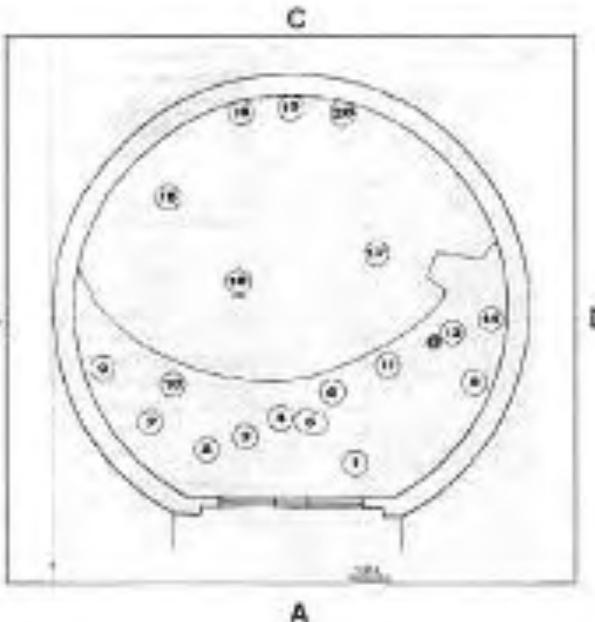
# Condizioni strutturali della Cappella XVII

Lo stato di conservazione della Cappella XVII è sintetizzato nella seguente scheda, contenuta nella “Relazione di verifica ed indagine statica”, redatta nell’Aprile del 2009 dall’Ing. Emanuele Giletti.

	A	B	C	D	Pronao
25) LESIONI muratura esterna					
25) LESIONI muratura interna		*		*	
27) LESIONI volte					*
28) LESIONI voltini finestre ecc.	*				
29) CORNICIONI		***	***	***	***

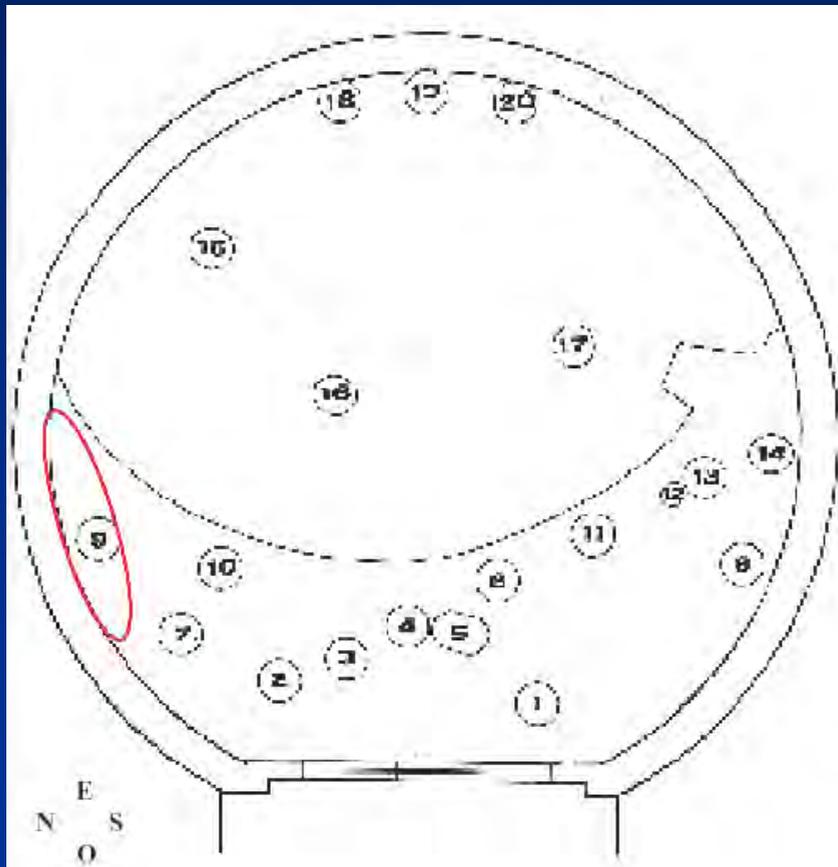
\*\*\* urgente  
 \*\* indispensabile  
 \* tenere sotto controllo  
 non preoccupante

[Ing. E. GILETTI]  
 Buono stato di conservazione generale come nel 2001-2004-2007; Nel 2003 restauro della copertura e lanternino  
 -Gradinata e pavimento pronao da sistemare  
 -Sigillatura frontone pronao e basi colonne  
 -Piccole lesioni volta pronao (come 2001-2007)  
 -Distacchi di intonaco lato A e piccola lesione voltino (come 2001-2007)  
 -Vecchia lesione muro lato B interno, passante verticalmente tra la figura nudo a metà di braccio e la testa ed il braccio manica verde, delle figure sottostanti, (come 2001-2007)  
 -Lato D: lesione: lesione su apertura tamponata (come 2001-2007)  
 - impalcato in legno "Monte" in buono stato  
 Si dispone di aggiungere 2 fessurimetri per monitorare la lesione lato B  
 Sopralluogo 09.04.2009

# Monitoraggio con la tecnica EA

**Nell'ambito delle proposte formulate per il progetto RE-FRESCOS per il monitoraggio con la tecnica EA, il giorno 30 Marzo 2011 è stato effettuato, con la Dr. Elena De Filippis, un sopralluogo nella Cappella XVII.**



**Lo scopo era quello di posizionare i sensori EA per il rilievo dei segnali provenienti da una lesione nella muratura della parete Nord della Cappella, e da un distacco dell'intonaco affrescato.**

**È anche stato analizzato lo stato di conservazione di alcune delle statue in terracotta presenti nella Cappella.**

**Successivamente sono state effettuate da abili restauratori le operazioni necessarie all'incollaggio dei sensori EA.**

**In particolare, il giorno 6 Aprile nelle zone da monitorare sono state predisposte delle pellicole di carta giapponese, sulla cui superficie è stata poi stesa una leggera mano di "Paraloid".**



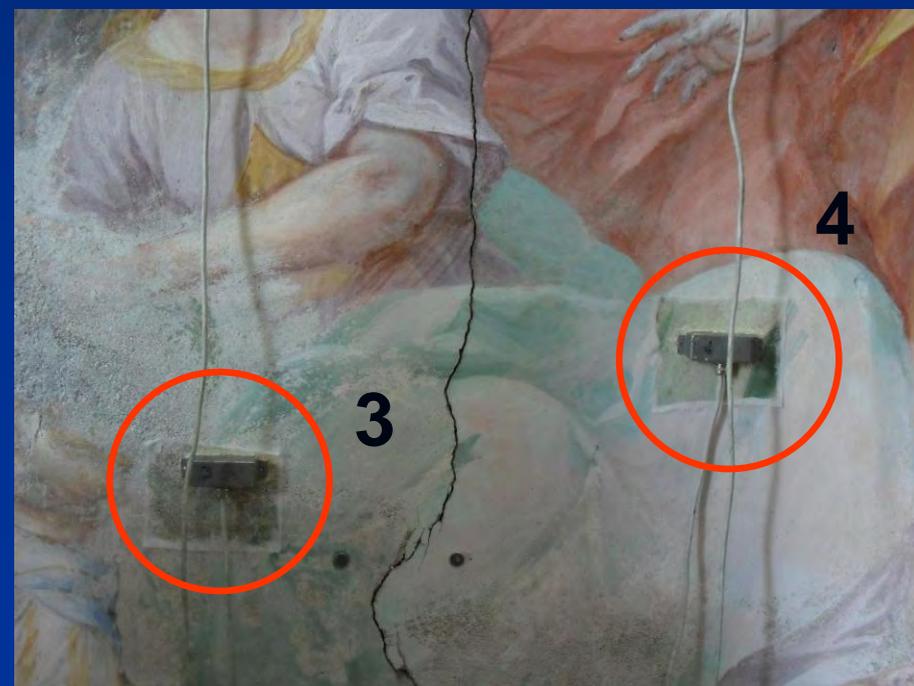
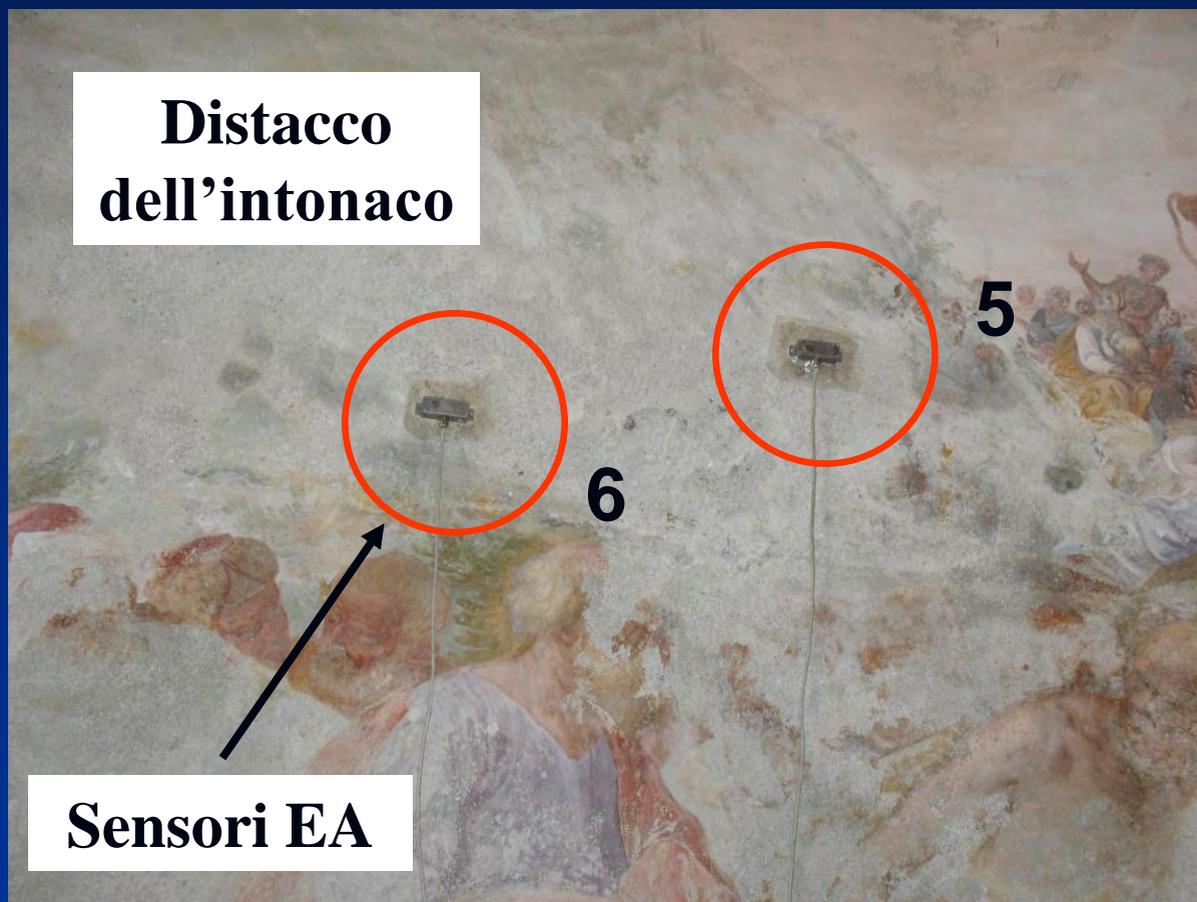
**Si tratta di una resina acrilica che viene utilizzata nel campo del restauro come consolidante a basse concentrazioni (2-4%), o come collante in concentrazioni maggiori.**

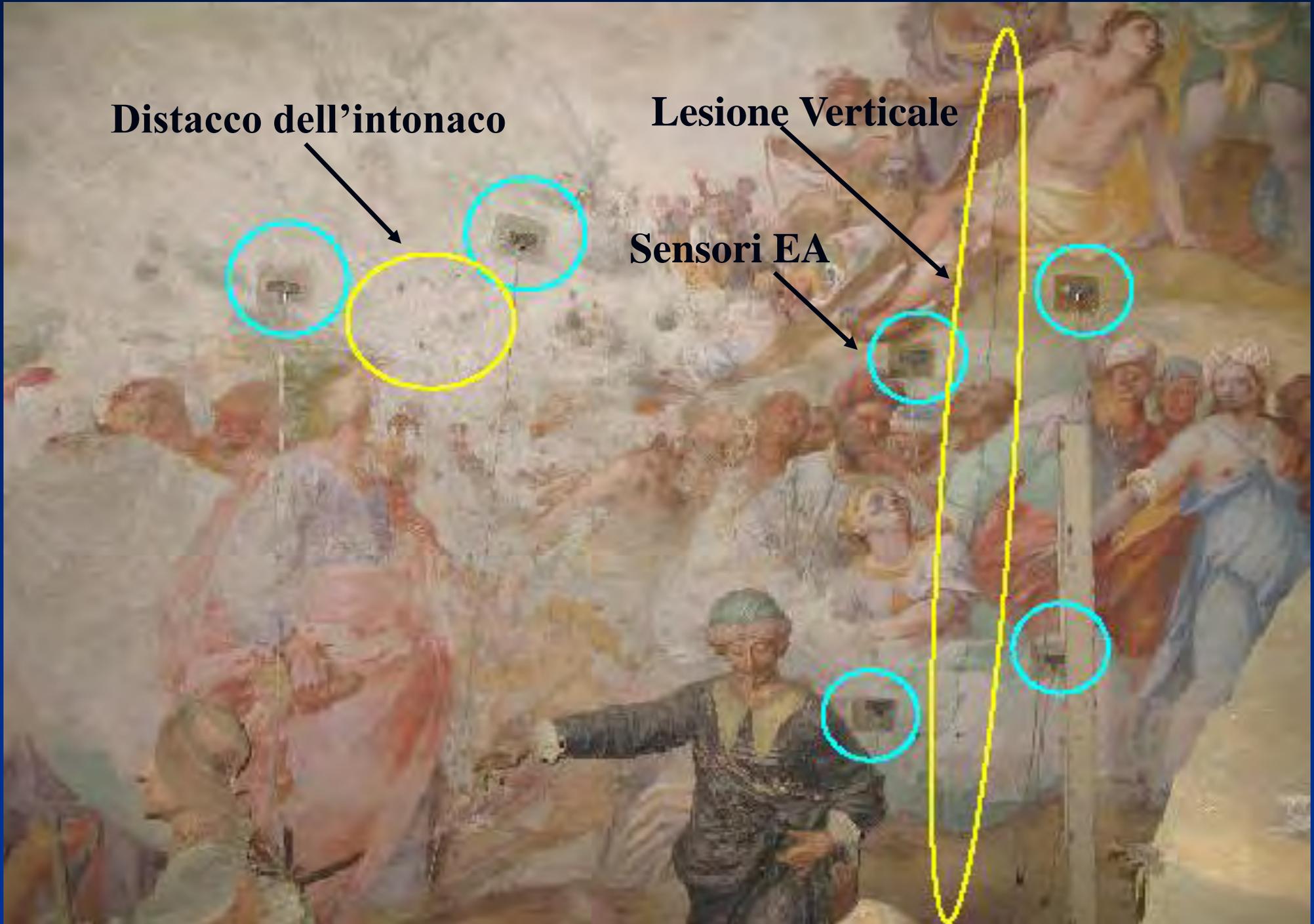
**Il Paraloid ha la funzione di formare una ottima base protettiva per il successivo incollaggio dei sensori EA.**

**Sulle pellicole di carta giapponese sono quindi stati fissati i sensori EA mediante colla siliconica.**



**I sensori sono stati applicati in zone utili a monitorare contemporaneamente sia l'avanzamento della lesione che il distacco dell'intonaco.**





**Distacco dell'intonaco**



**Lesione Verticale**



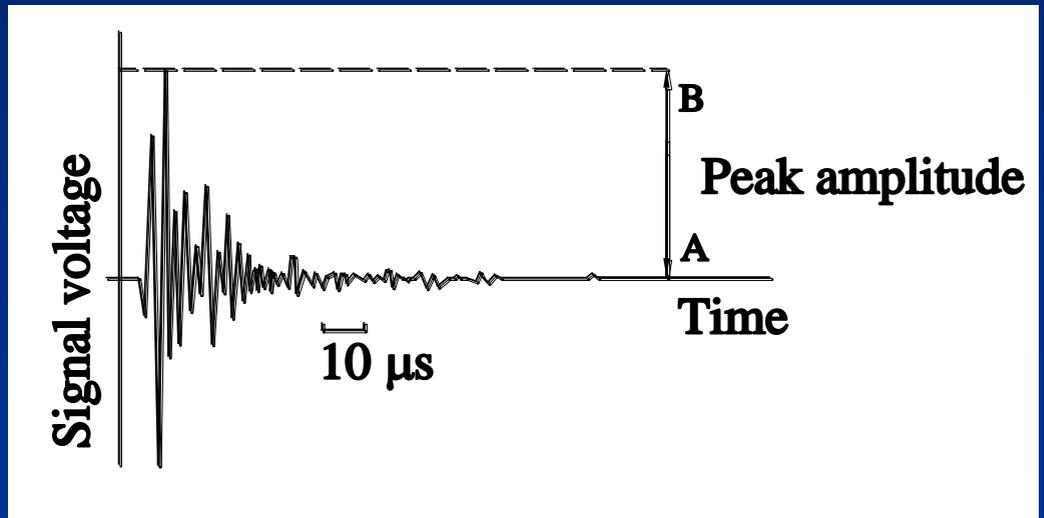
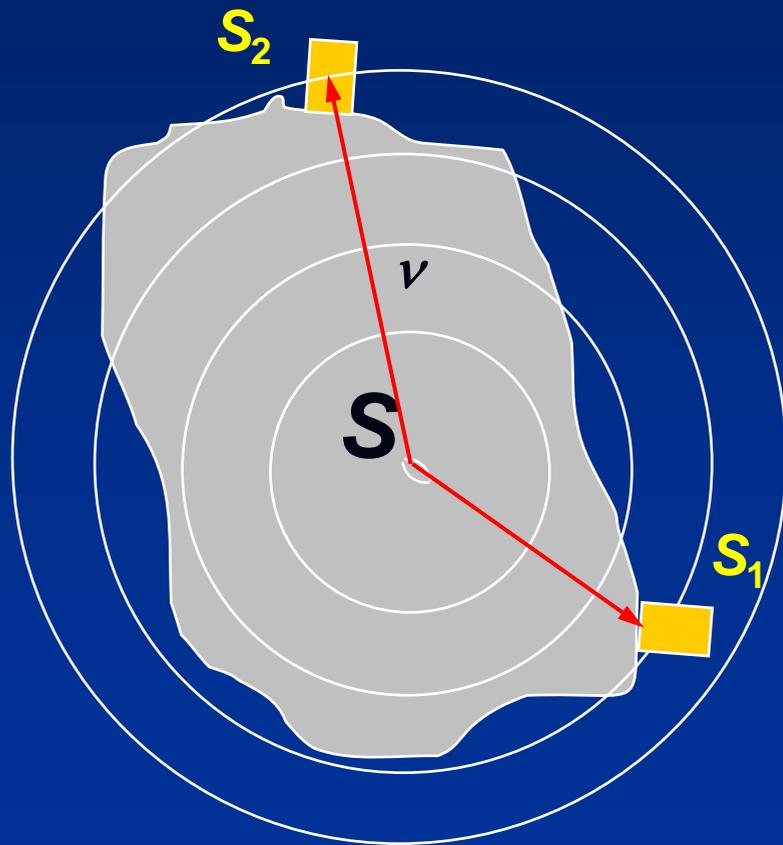
**Sensori EA**



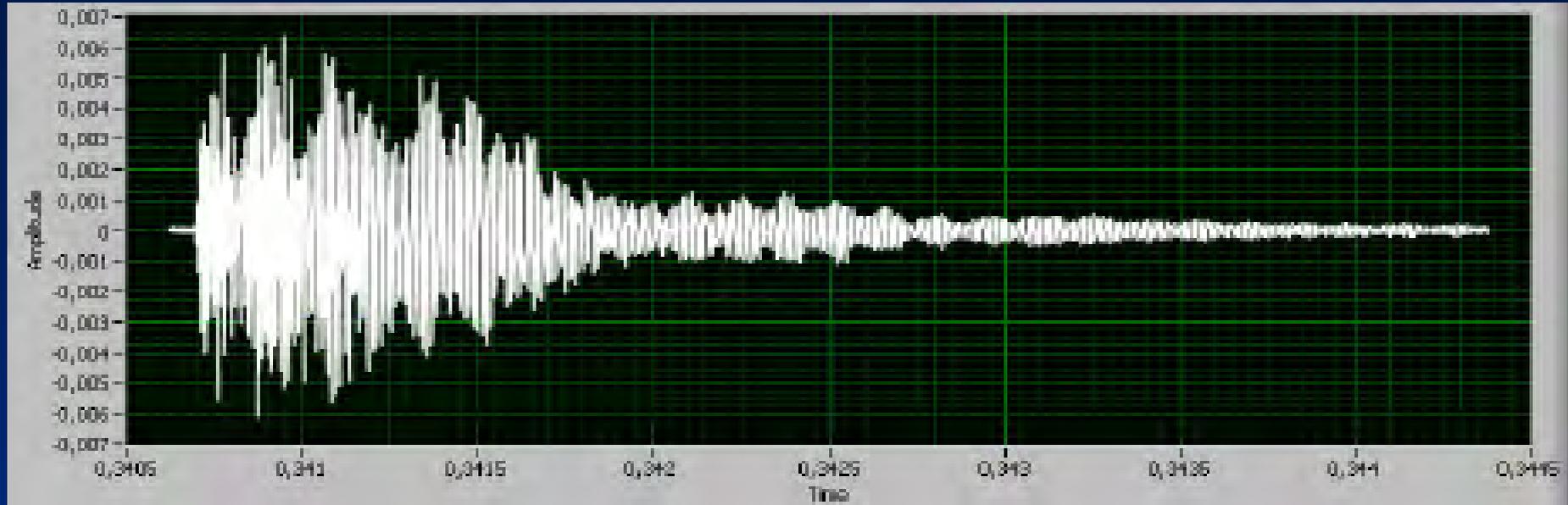
# The Acoustic Emission Technique

Cracking is accompanied by the emission of elastic waves which propagate within the bulk of the material.

These waves can be received by PZT transducers applied to the surface of the structural elements.



# AE signal identified by sensor



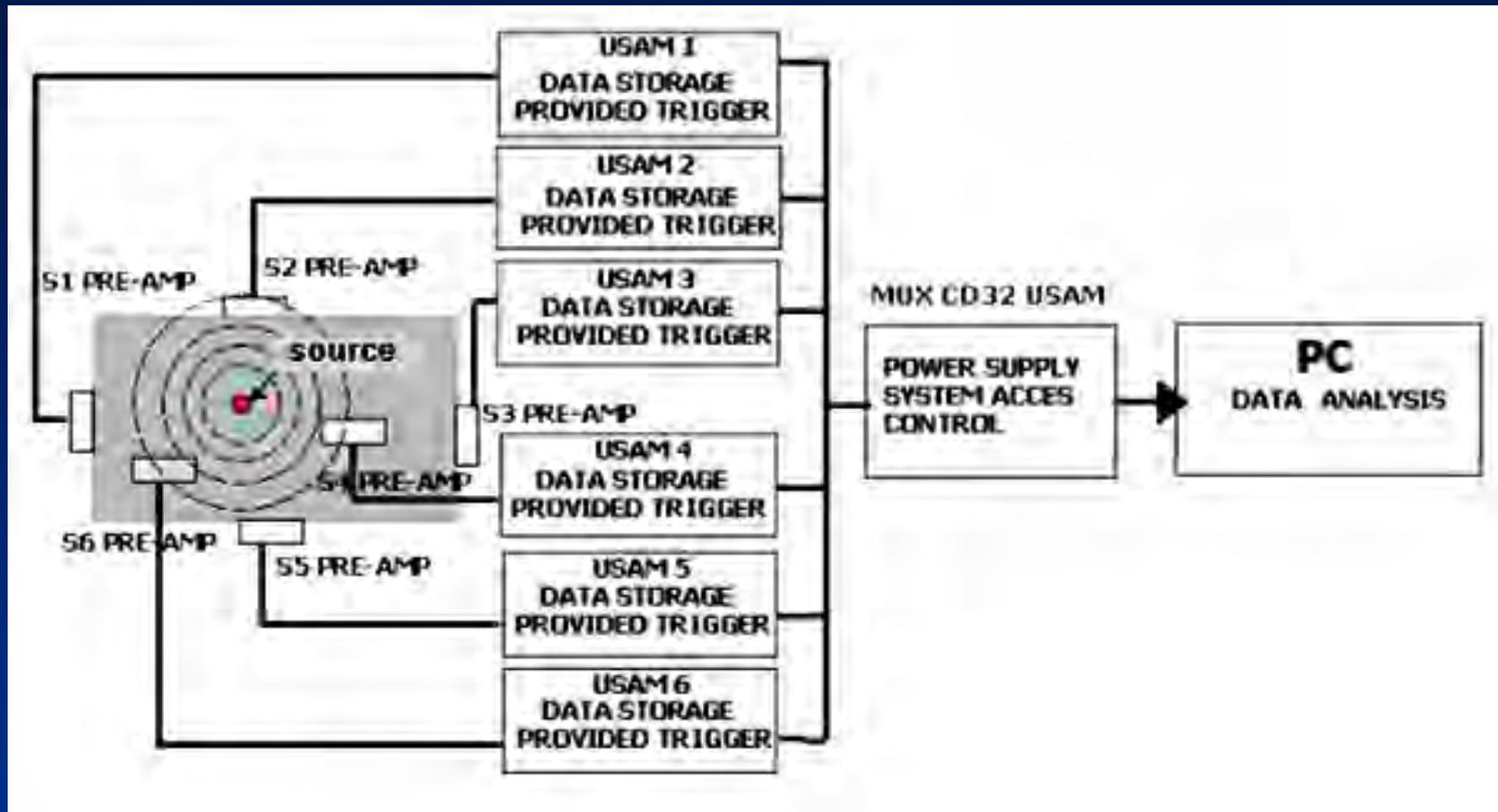
The signal picked up by a transducer is preamplified and transformed into electric voltage.

It is then filtered to eliminate unwanted frequencies, such as the vibration arising from the mechanical instrumentation, which is generally lower than 50 kHz.

Up to this point the signal can be represented as a damped oscillation.

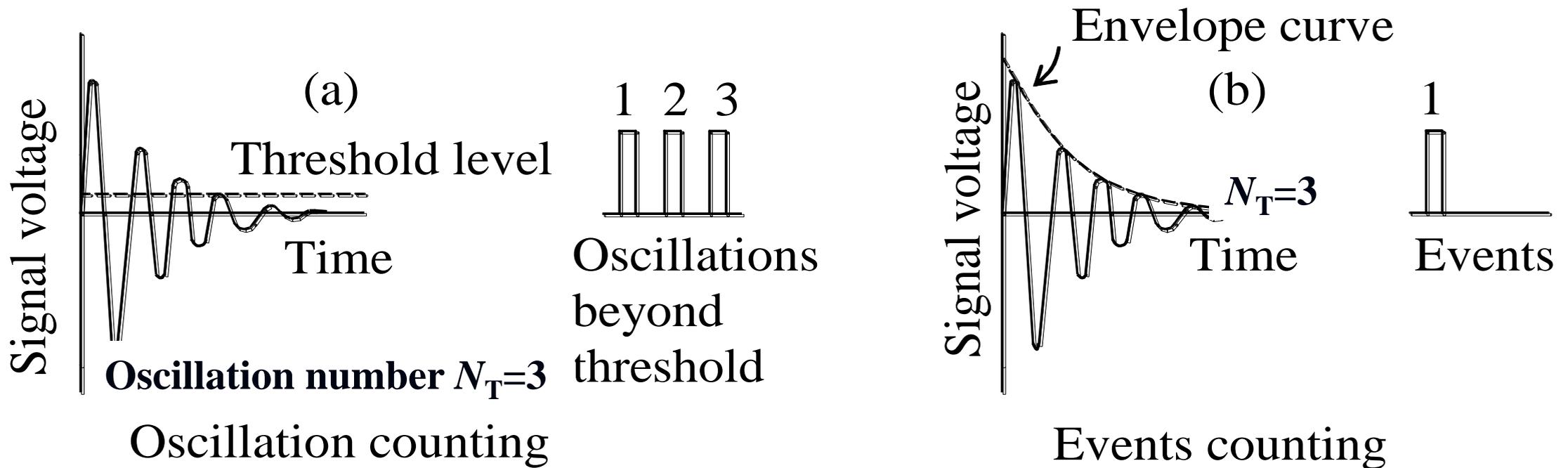
The signal is therefore analysed by a measuring system counting the emissions that exceed a certain voltage threshold measured in volts (V).

# AE Data acquisition system - USAM units



- PZT transducers are set on a frequency range between 50 kHz and 800 kHz.
- Data acquisition system consisting in: 6 Pre-Amplified sensors, 6 Data storage provided trigger, a central unit for the synchronization phase, a threshold measurer.
- From this elaboration microcracks localisation is performed and the condition of the monitored specimen can be determined.

# AE counting method



- The event intensity is measured by the oscillation number  $N_T$
- The oscillation number  $N_T$  increases with the signal amplitude

# Time dependence of AE

The authors have also shown that energy dissipation, as measured with the AE technique during the damaging process, follows the *time-scaling* law:

$$W \propto N \propto t^{\beta_t}, \text{ with } 0 \leq \beta_t \leq 3, \quad (1)$$

***W***: dissipated energy;

***N***: cumulative AE events number obtained during monitoring;

***t*** : monitoring time;

**$\beta_t$** : time-scaling exponent for the released energy.

---

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Pugno, N., “Time-scale-effects on acoustic emission due to elastic waves propagation in monitored cracking structures”, *Physical Mesomechanics*, 8, 77-80 (2005).

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Pugno, N., “Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring”, *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 273-289 (2007).

# Stability conditions

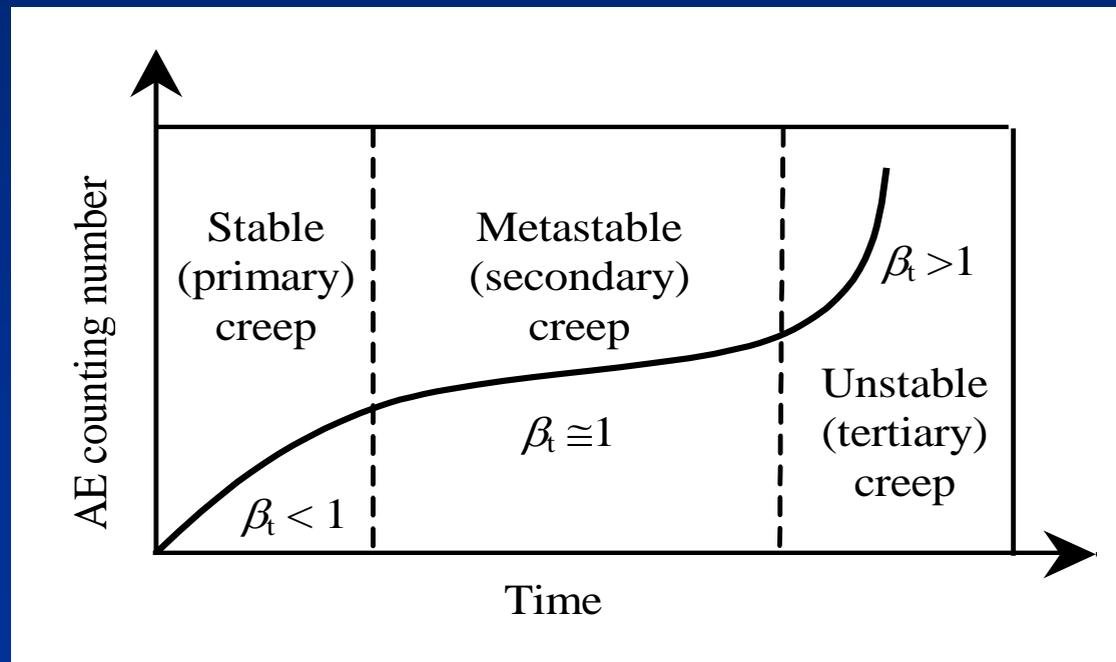
By working out the  $\beta_t$  exponent from the data obtained during the observation period, we can make a prediction on the structure's stability conditions:

$\beta_t < 1$ : the structure evolves towards stability conditions;

$\beta_t \cong 1$ : the process is metastable;

$\beta_t > 1$ : the process becomes unstable.

## *Pseudo-creep* behaviour



Schematic plot of the AE counting number vs. time

# AE Frequency-Magnitude Statistics

The GR relationship has been tested successfully in the acoustic emission field to study the scaling of the “amplitude distribution” in AE waves:

$$\text{Log}_{10}N(\geq m) = a - bm, \quad \text{or} \quad N(\geq m) = 10^{a-bm}, \quad (2)$$

$N$  : cumulative number of AE events with magnitude  $\geq m$ .

The *magnitude* in terms of AE technique is defined as follows:

$$m \propto \text{Log}_{10}A_{\max} \quad (3)$$

$A_{\max}$  : signal amplitude, measured in microvolt.

The  $b$ -value changes systematically with the different stages of fracture growth and hence it can be used to estimate the development of fracture process.

In particular, recent results from AE laboratory tests on different types of specimens, as well as *in situ* AE investigations, show that at the condition of criticality, when the external load equals the peak load:

$$b\text{-value} \cong 1.5.$$

In the later stages of damage evolution, when the final failure is imminent:

$$b\text{-value} \rightarrow 1.$$

---

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Niccolini, G., “Fractal analysis of damage detected in concrete structural elements under loading”, *Chaos, Solitons & Fractals*, 42, 2047-2056 (2009).

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Puzzi, S., “From criticality to final collapse: evolution of the “ $b$ -value” from 1.5 to 1.0”, *Chaos, Solitons & Fractals*, 41, 843-853 (2009).

# ***b*-value analysis**

**By analogy with earthquakes, the AE damage size-scaling entails the validity of the relationship:**

$$N(\geq L) = c L^{-D}, \quad (4)$$

***N* : cumulative number of AE events generated by source defects with a characteristic linear dimension  $\geq L$ ;**

***L* : linear dimension of the source defects;**

***c* : constant of proportionality;**

***D* : fractal dimension of the damaged domain.**

# *b*-value analysis

Carpinteri (1994) showed that equations (2) and (3) are entirely equivalent with:

$$D = 2b. \quad (5)$$

By the *b*-value it is possible to identify the modalities of energy dissipation during the monitoring process. The extreme cases envisaged are:

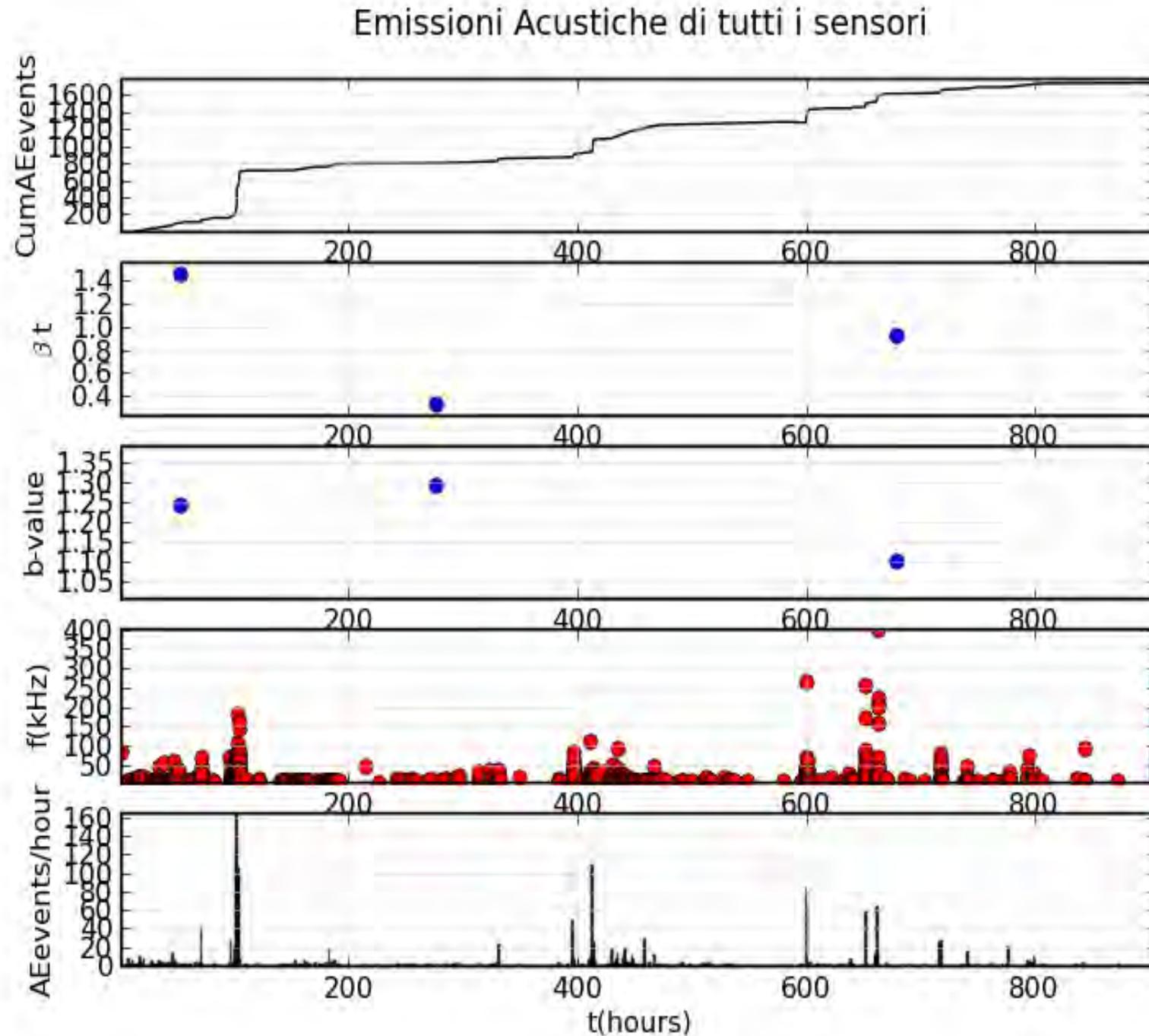
- $b = 1.5 \rightarrow D = 3$ , the energy dissipation takes place through small defects distributed throughout the volume;
- $b = 1 \rightarrow D = 2$ , the energy dissipation takes place along a surface.

In the former case diffused damage is observed, in the latter case two-dimensional cracks are formed leading to the collapse of the structural element.

---

Carpinteri, A., “Scaling laws and Renormalization Groups for Strength and Toughness of Disordered Materials”. *International Journal of Solids and Structures*, 31, 291-302 (1994).

# Risultati complessivi del monitoraggio condotto dal 28 aprile, ore 15.00, al 4 giugno, ore 12.00

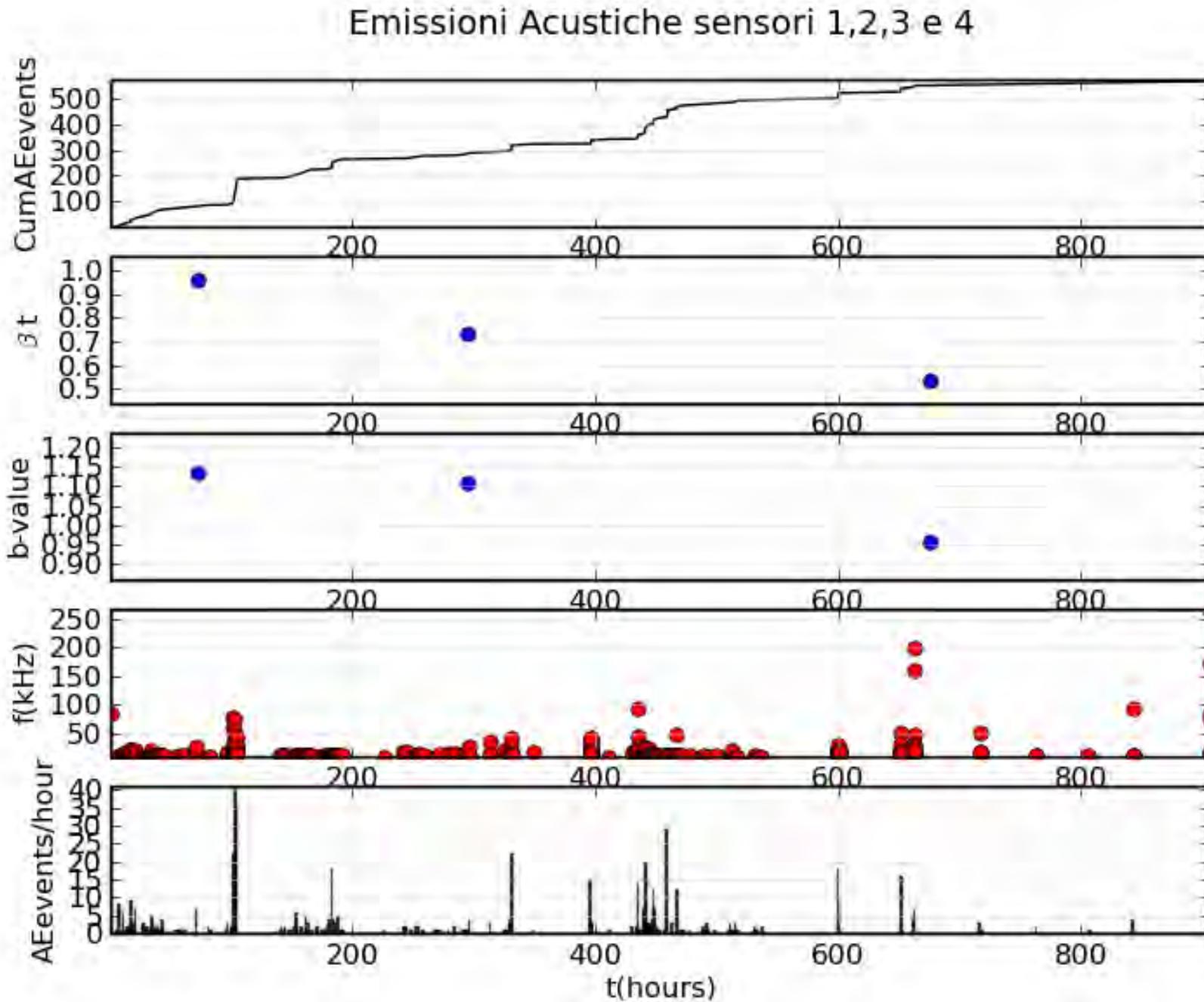


$$0.3 < \beta_t < 1.4$$

$$1.10 < b < 1.30$$

microfratture

# Risultati ottenuti dai sensori AE applicati nei pressi della lesione verticale

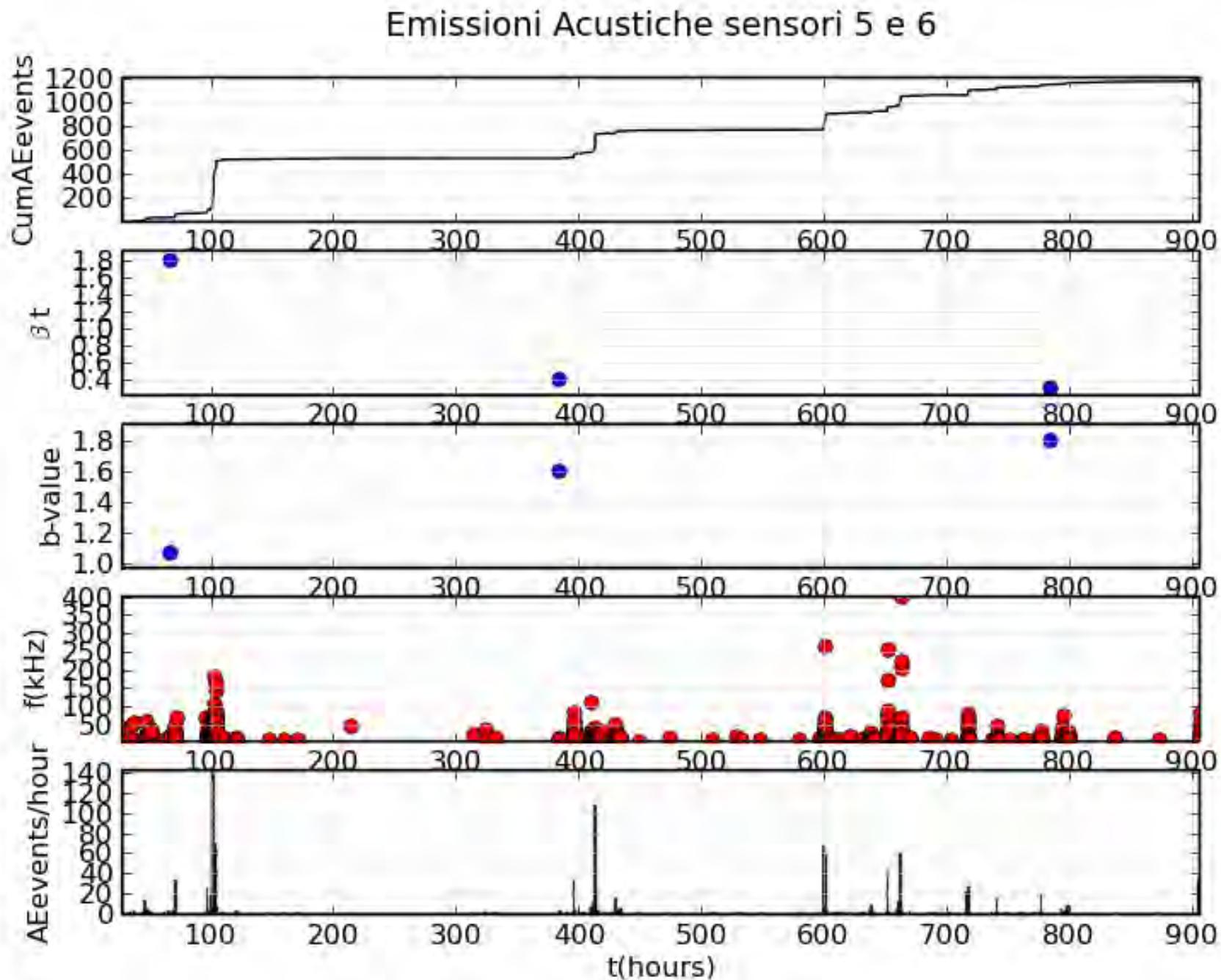


$$0.5 < \beta_t < 1.0$$

$$0.95 < b < 1.15$$

bassa frequenza

## Risultati ottenuti dai sensori AE applicati nei pressi del distacco dell'intonaco



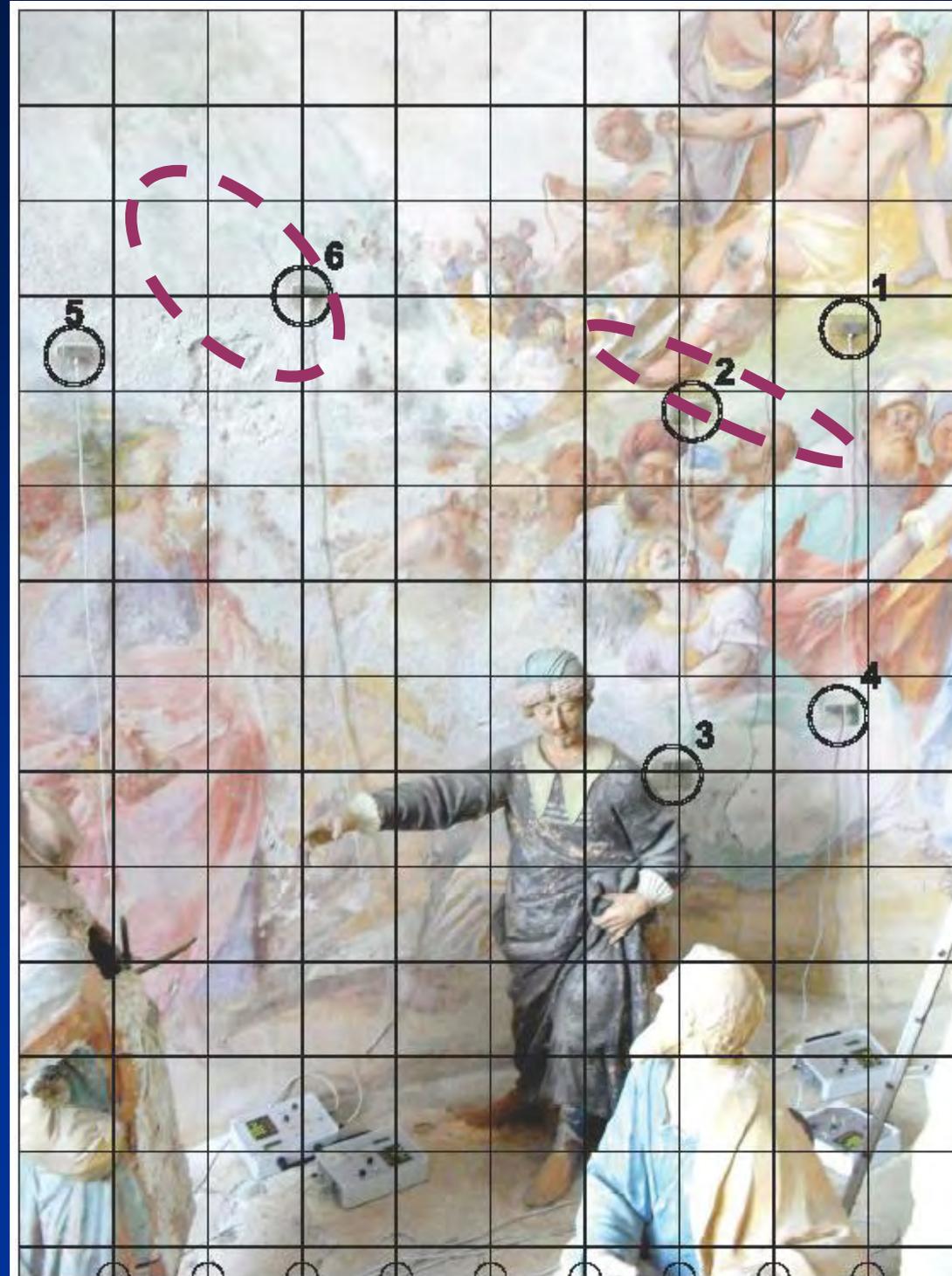
$$0.5 < \beta_t < 1.8$$

$$1.10 < b < 1.80$$

alta frequenza

# Numerazione dei sensori e localizzazione delle sorgenti di Emissione Acustica

Regioni di localizzazione dei segnali EA

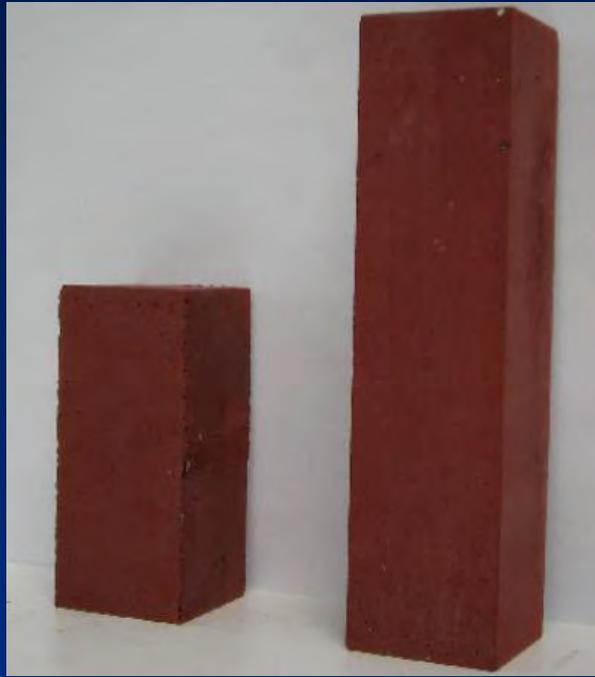


# **Cappella XVII del Sacro Monte di Varallo**

**(b) Analisi delle proprietà elettriche delle statue in terracotta**

# EME and Relative Electrical Resistance Variations Tests

## Views of the test specimens



**C1-C2    C3-C4**



**P5**



**P6-P7**

C1-C4: Prismatic mortar specimens enriched with 10% of iron dioxide.

P5-P7: Green Luserna Granite specimens.

---

Lacidogna, G., Carpinteri, A., Manuello, A., Niccolini, G., Agosto, A. and Borla, O.,  
“Acoustic emission and electrical properties of quasi-brittle materials under compression”.  
*Proc. of Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics (SEM)*,  
Uncasville, CT (USA) June, 2011.

# Materials, shapes, sizes of the tested specimens and piston velocities

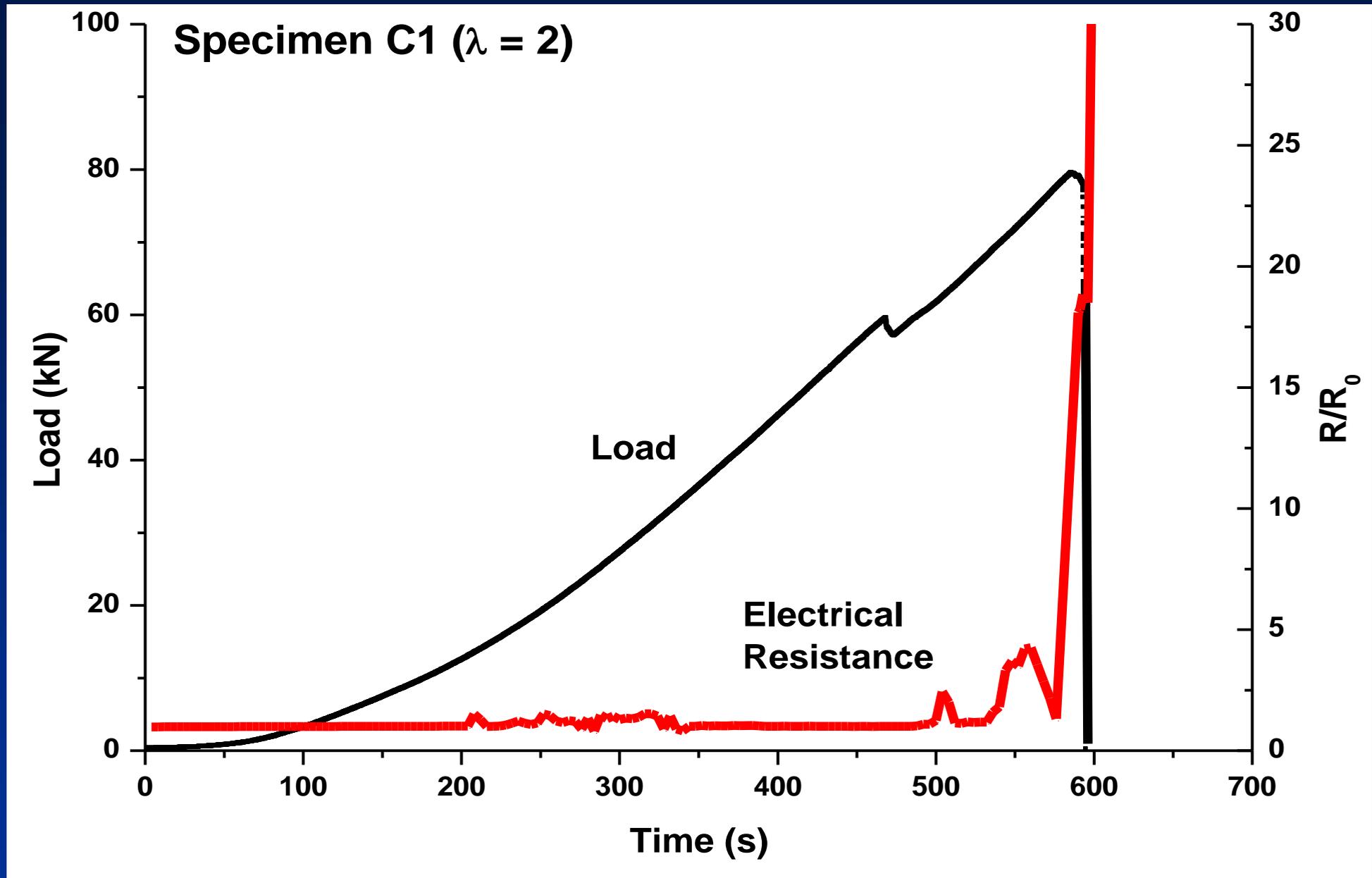
SPECIMEN	MATERIAL	SHAPE	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	PISTON VELOCITY [ m s <sup>-1</sup> ]
C1	Mortar	Prismatic	4×4×8	2.0×10 <sup>-6</sup>
C2	Mortar	Prismatic	4×4×8	2.0×10 <sup>-6</sup>
C3	Mortar	Prismatic	4×4×16	2.0×10 <sup>-6</sup>
C4	Mortar	Prismatic	4×4×16	2.0×10 <sup>-6</sup>
SPECIMEN	MATERIAL	SHAPE	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	PISTON VELOCITY [ m s <sup>-1</sup> ]
P5	Green Luserna Granite	Cylindrical	$\pi \times 1.4^2 \times 5$	1.0×10 <sup>-6</sup>
P6	Green Luserna Granite	Cylindrical	$\pi \times 2.5^2 \times 5$	1.0×10 <sup>-6</sup>
P7	Green Luserna Granite	Cylindrical	$\pi \times 2.5^2 \times 5$	1.0×10 <sup>-6</sup>

# Experimental setup

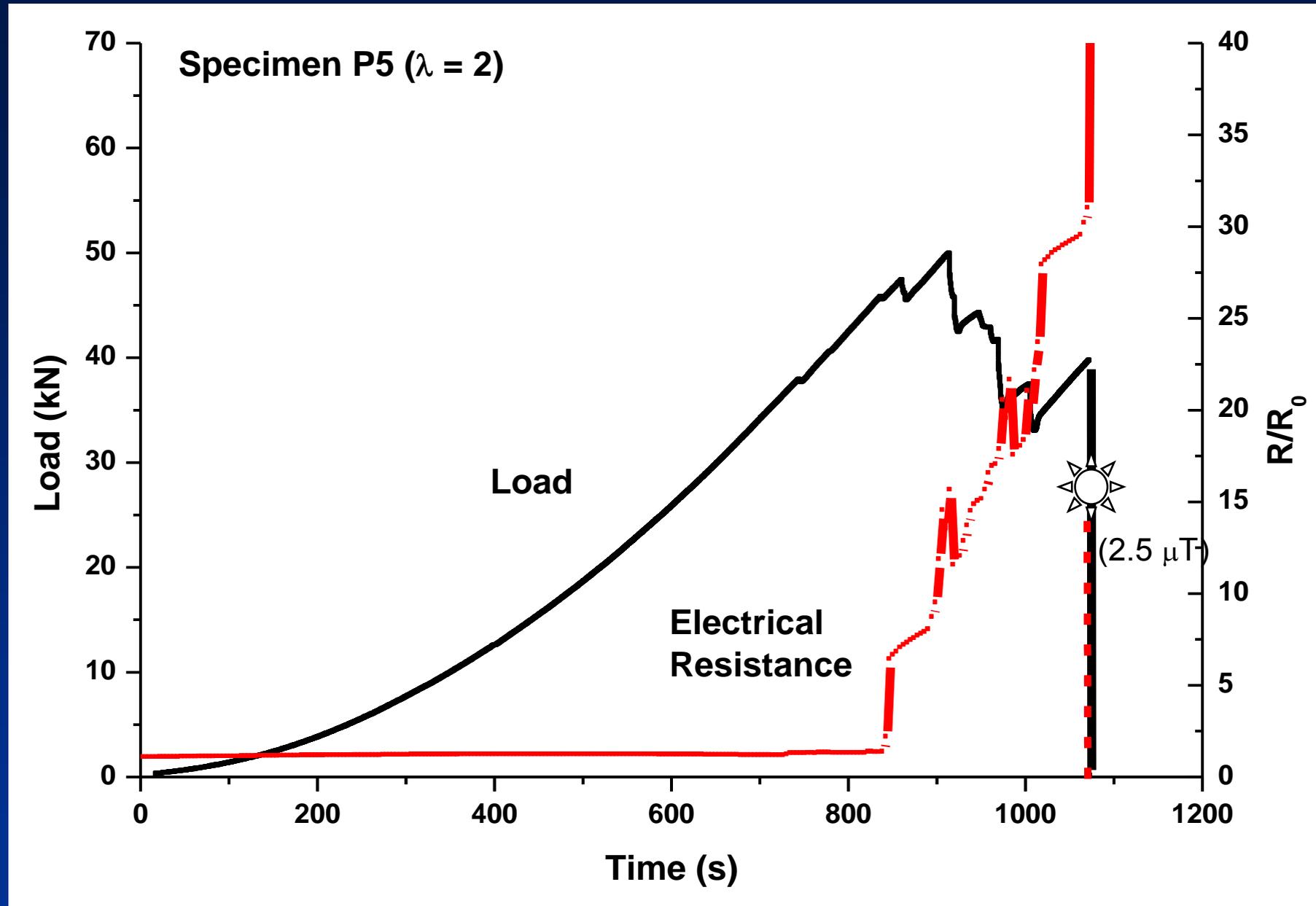


Using an Agilent model 34411A multimeter detector, for all the specimens, at the beginning of each compression test, the initial electrical resistance  $R_0$  was evaluated.

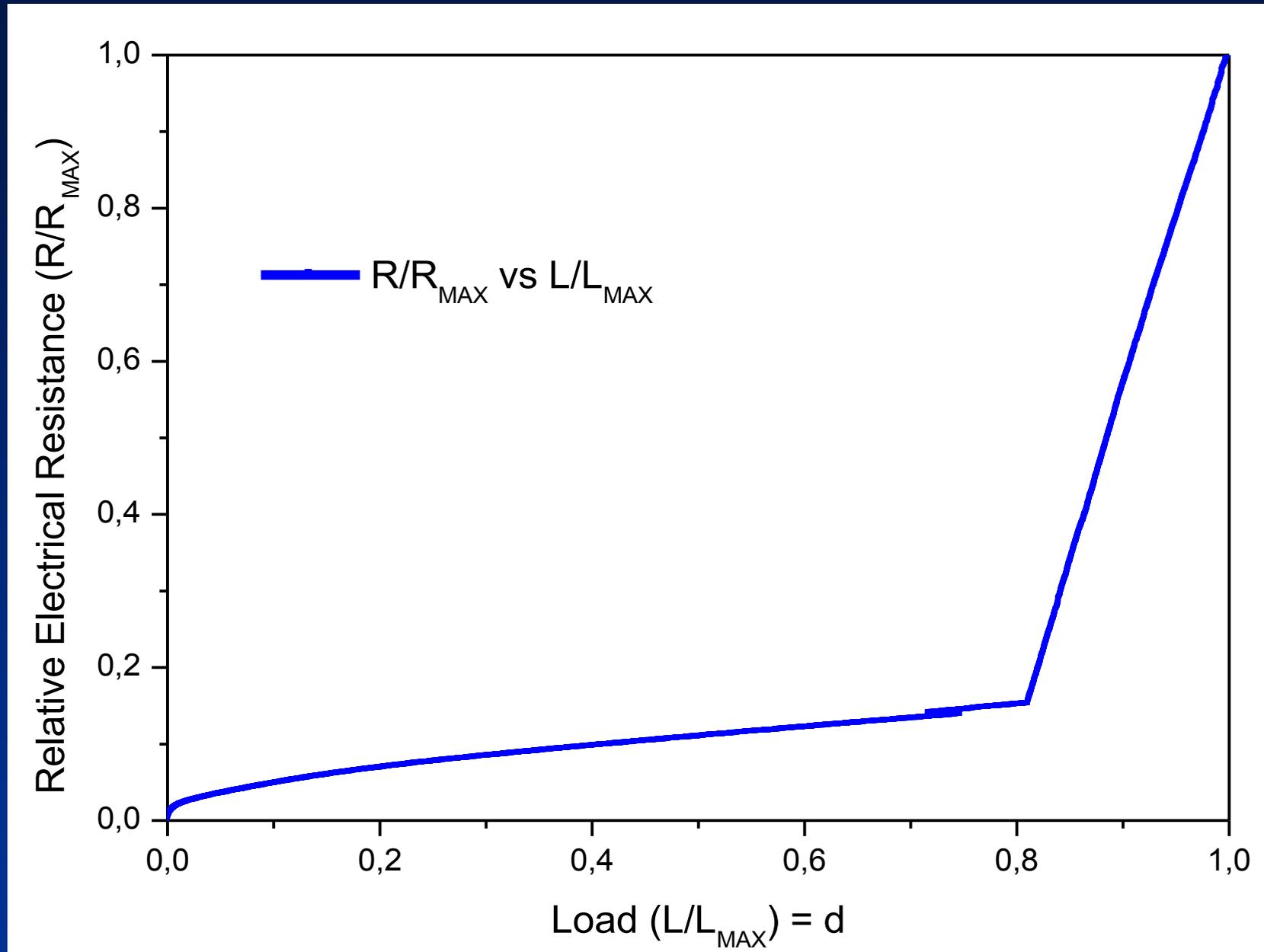
Afterwards the resistance variation  $R$  was monitored until the final collapse, calculating the relative ratio  $R/R_0$ .



**Load vs. time diagram and relative electrical resistance ( $R/R_0$ ) variation for the prismatic mortar specimen C1.**



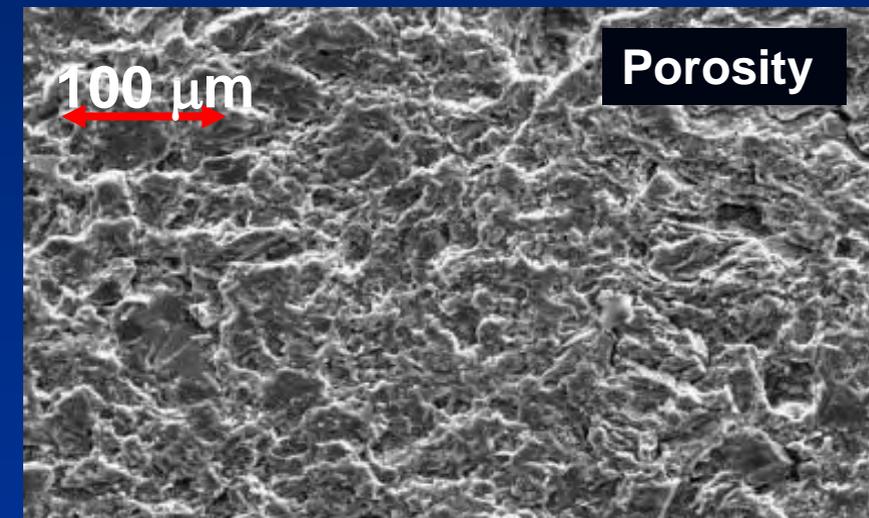
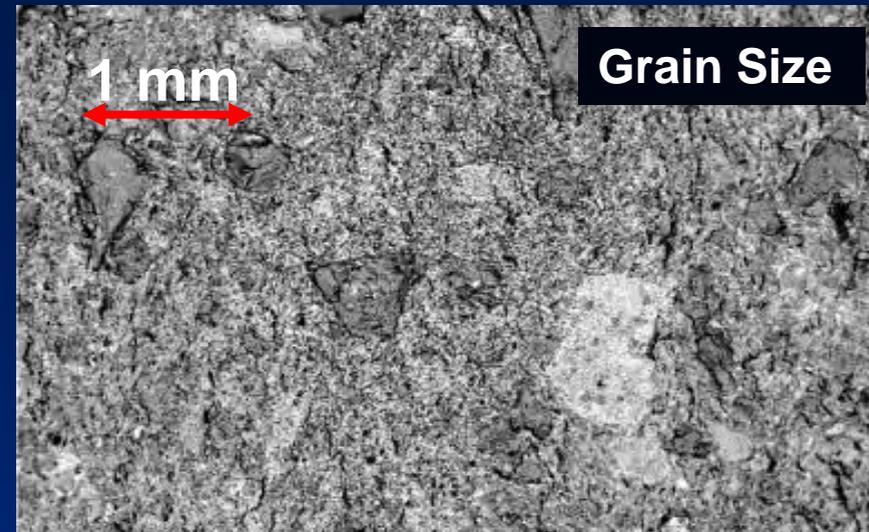
**Load vs. time diagram and relative electrical resistance ( $R/R_0$ ) variation for the cylindrical Green Luserna Granite specimen P5.**



**Relative electrical resistance ( $R/R_{MAX}$ ) vs damage variation ( $L/L_{MAX}$ ) for prismatic mortar specimens.**

# “Terra cotta” chemical composition

Elements	% in weight
Si O <sub>2</sub>	57.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.4
Ca O	14.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.9
Ti O <sub>2</sub>	0.4
Mg O	1.4
K <sub>2</sub> O	4.3
Na <sub>2</sub> O	1.3



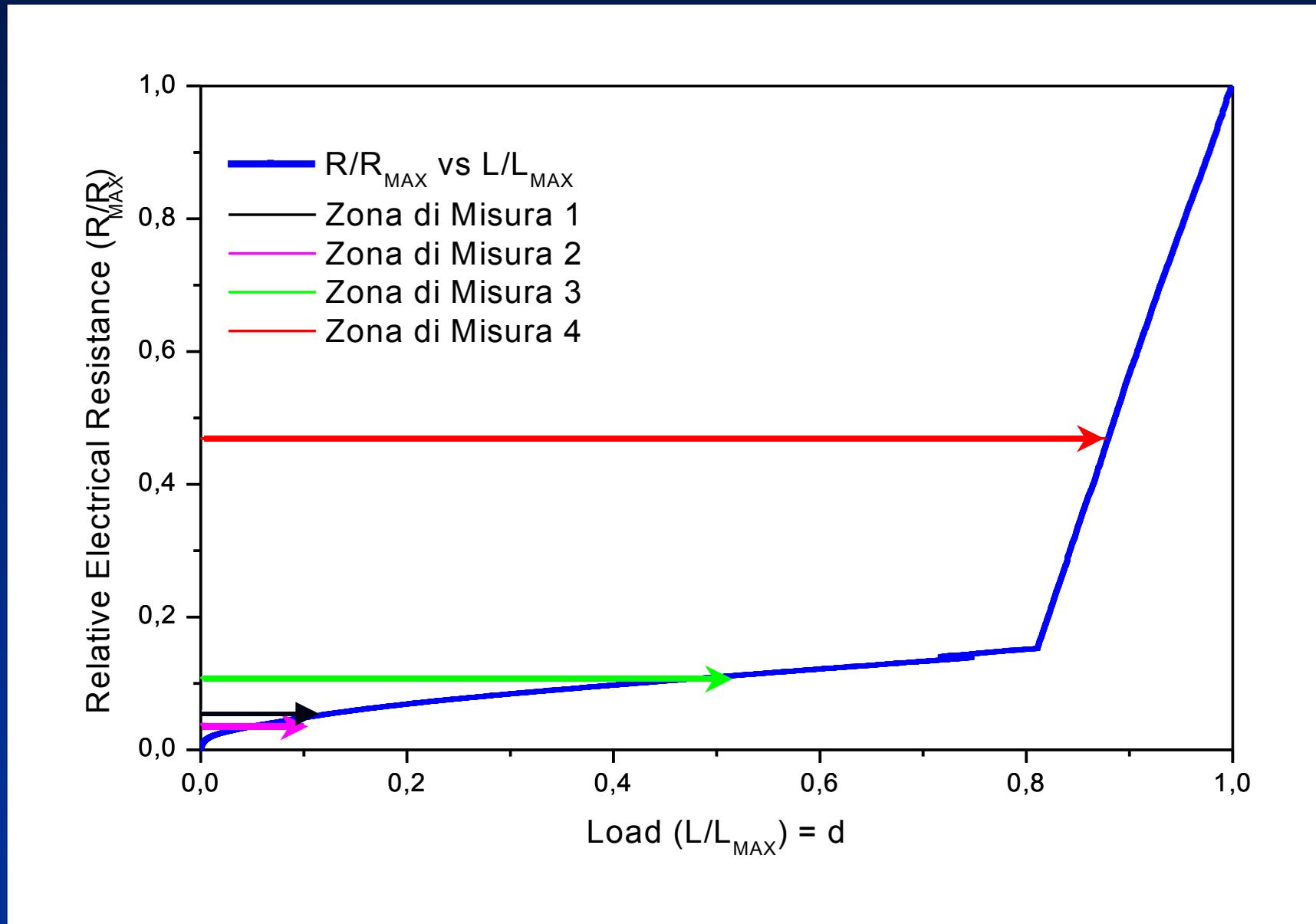
---

Huon, V., Wattrissea, B., El Yousoufia, M.S. and Chrysochoosa, A., “Elastic behavior of anisotropic terra cotta ceramics determined by kinematic full-field measurements”. *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 2303-2310 (2007).

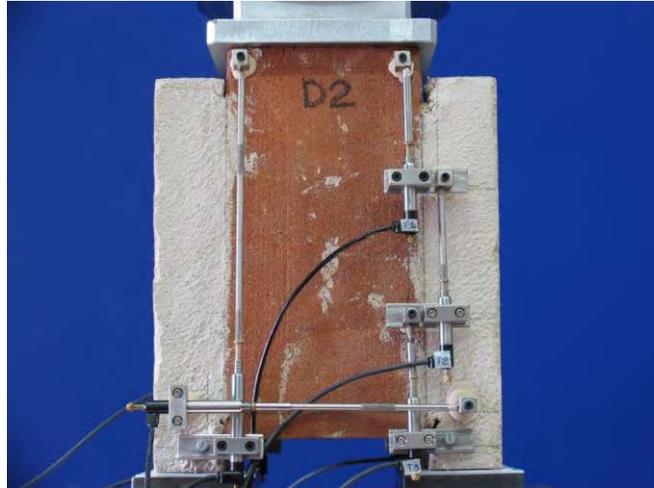
# Analisi delle proprietà elettriche delle statue in terracotta



# Livello di danneggiamento delle basi di appoggio delle statue



## Valutazione sperimentale della durabilità dell'interfaccia malta consolidante - muratura storica



### WP 3

*On site monitoring of mural decorative artworks using advanced ultrasonic techniques  
Laboratory prequalification of injection grouts to be used in repair works.*

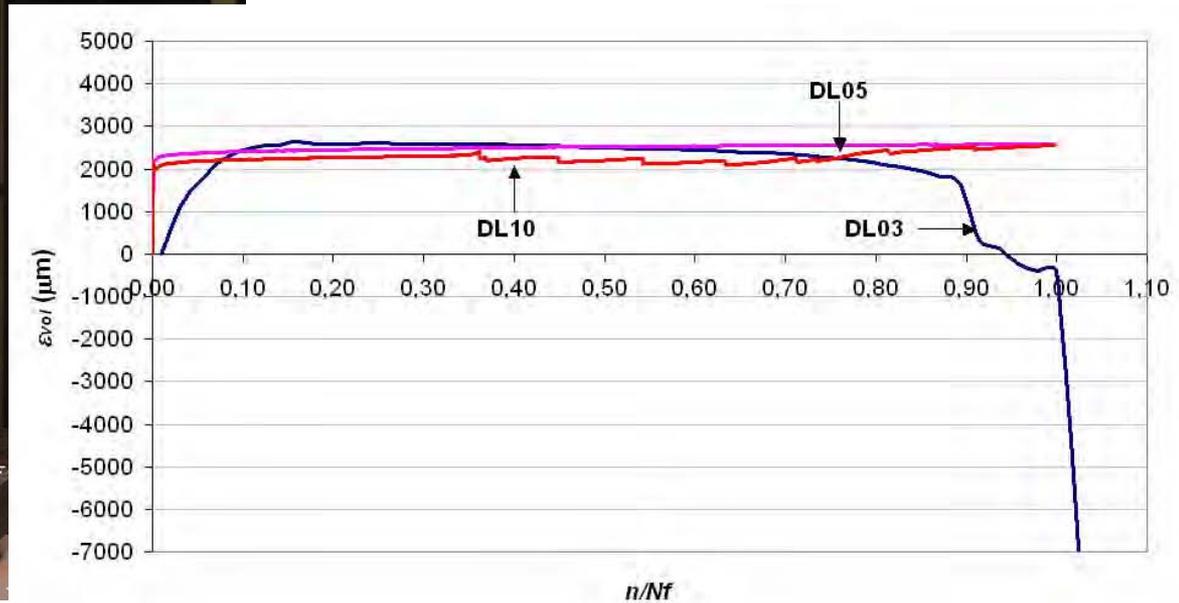
Responsabile Prof. Pietro Giovanni Bocca (DISTR - Politecnico di Torino)

Giornata Seminariale 6 Luglio 2011

Aula Albenga - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica  
Politecnico di Torino

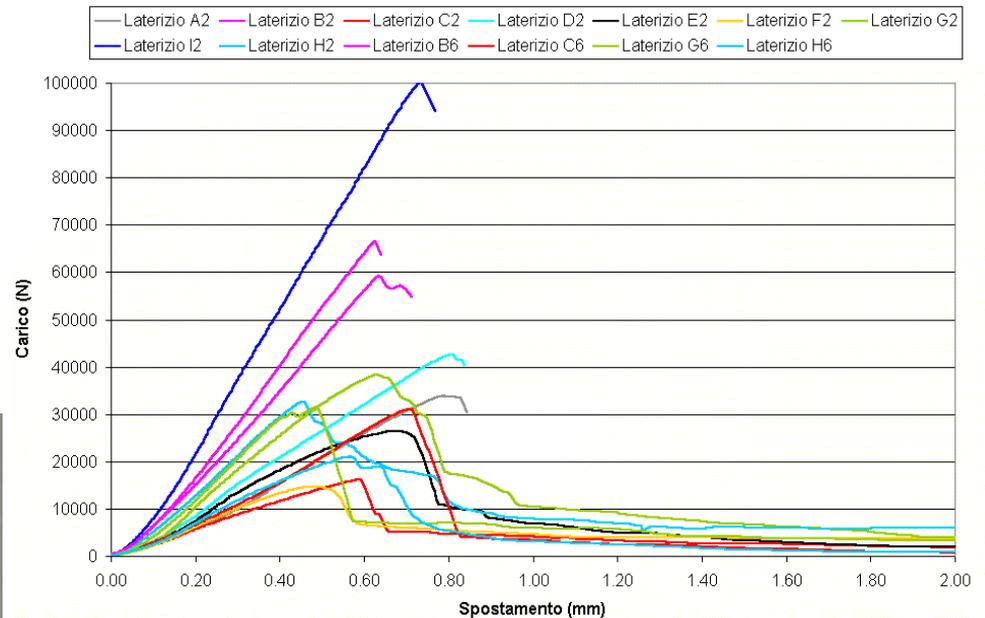
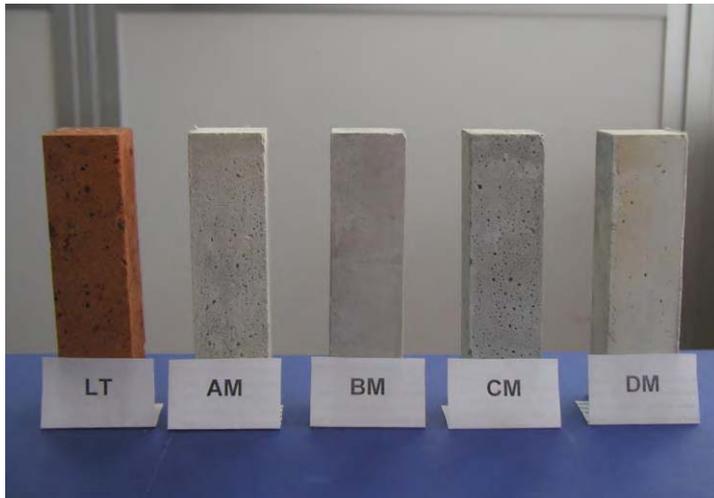
## Prequalificazione di malte consolidanti mediante prove cicliche per la valutazione della durabilità e compatibilità meccanica

Laboratorio Prove non Distruttive  
Direttore Prof. Pietro Bocca



# Prequalificazione di malte consolidanti mediante prove cicliche per la valutazione della durabilità e compatibilità meccanica

Laboratorio Prove non Distruttive  
Direttore Prof. Pietro Bocca



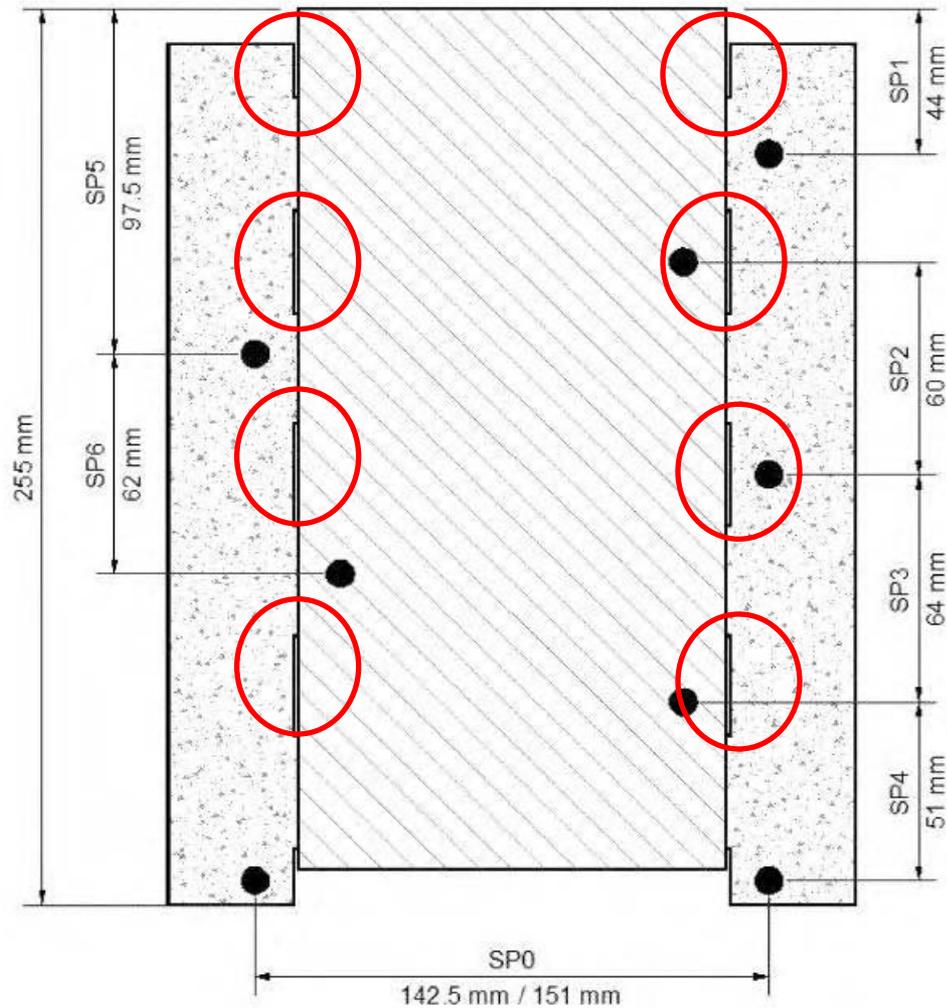
## Sacri Monti di Varallo

Tesi di laurea

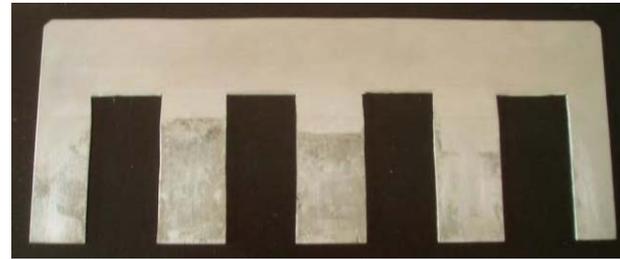
Nuove procedure sperimentali di prequalificazione di malte deumidificanti per il risanamento di murature storiche.



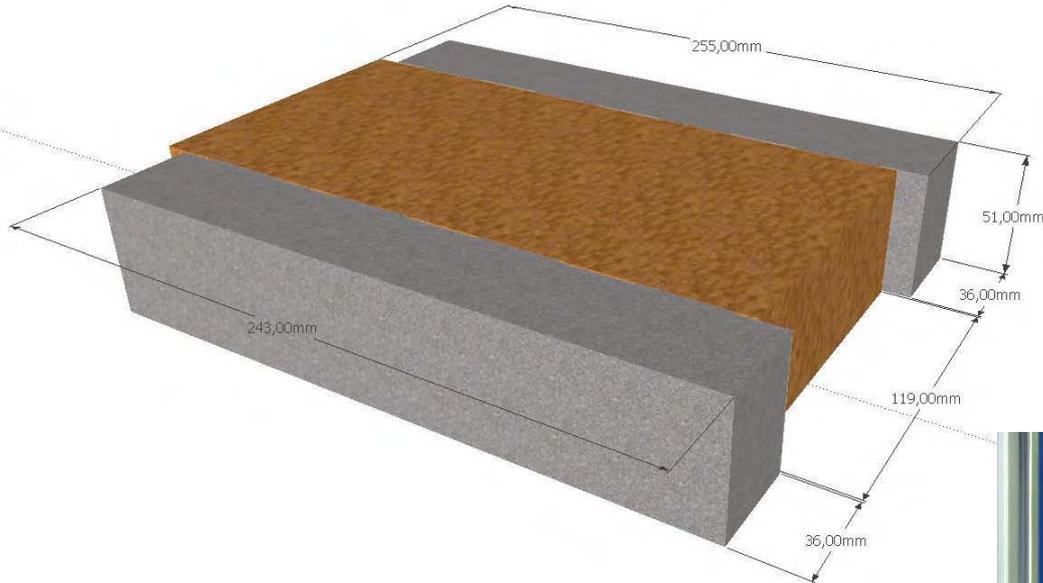
## 1° step: Provino misto 1 laterizio - malta



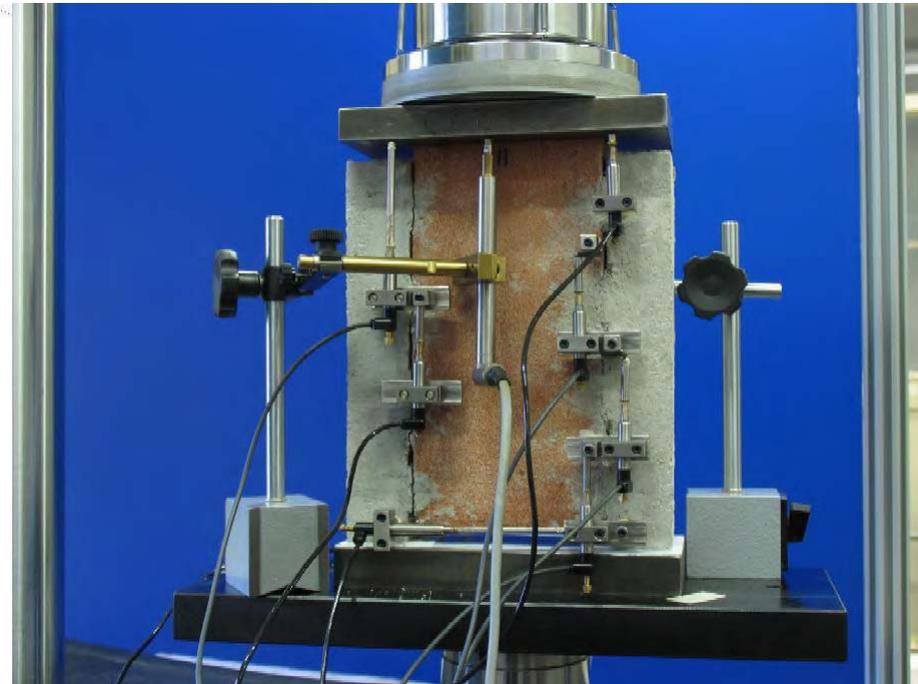
## 1° step: Provino misto 1 laterizio - malta



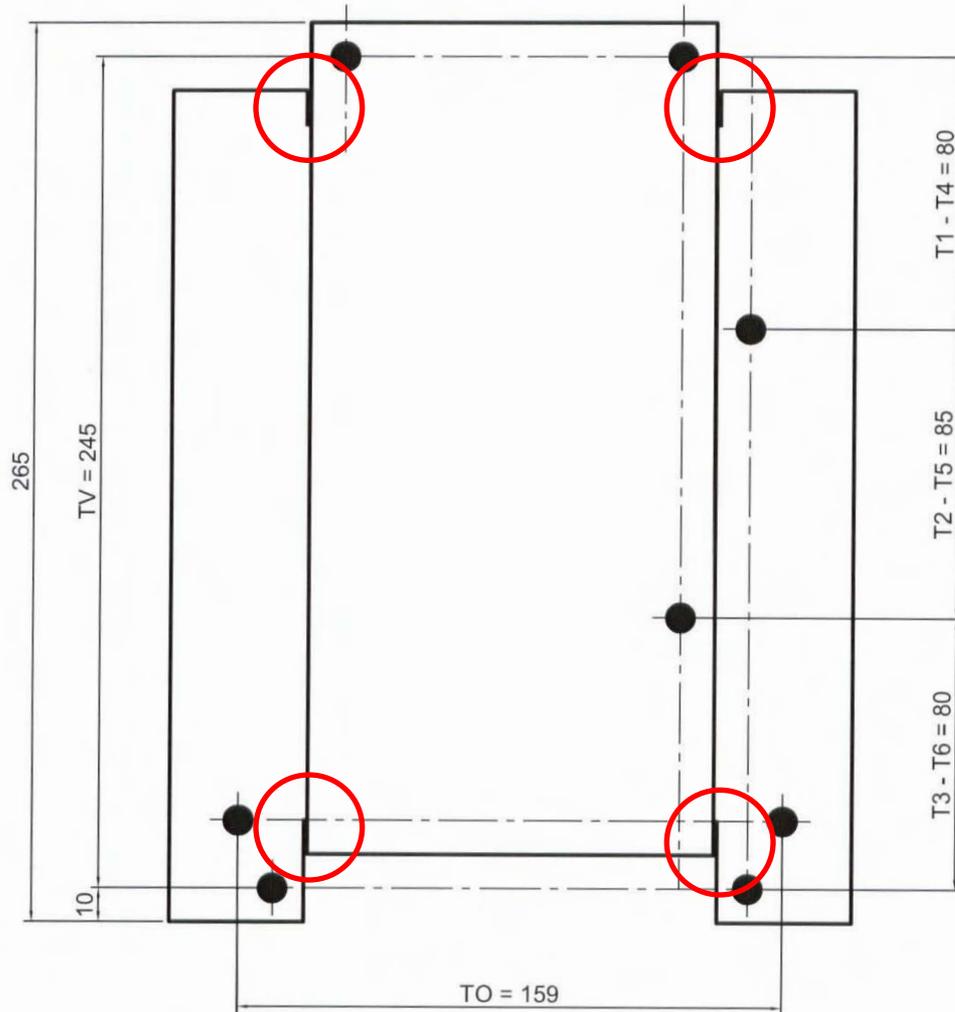
## 1° step: Provino misto 1 laterizio - malta



Prove statiche



## 2° step: Provino misto 2 laterizi - malta



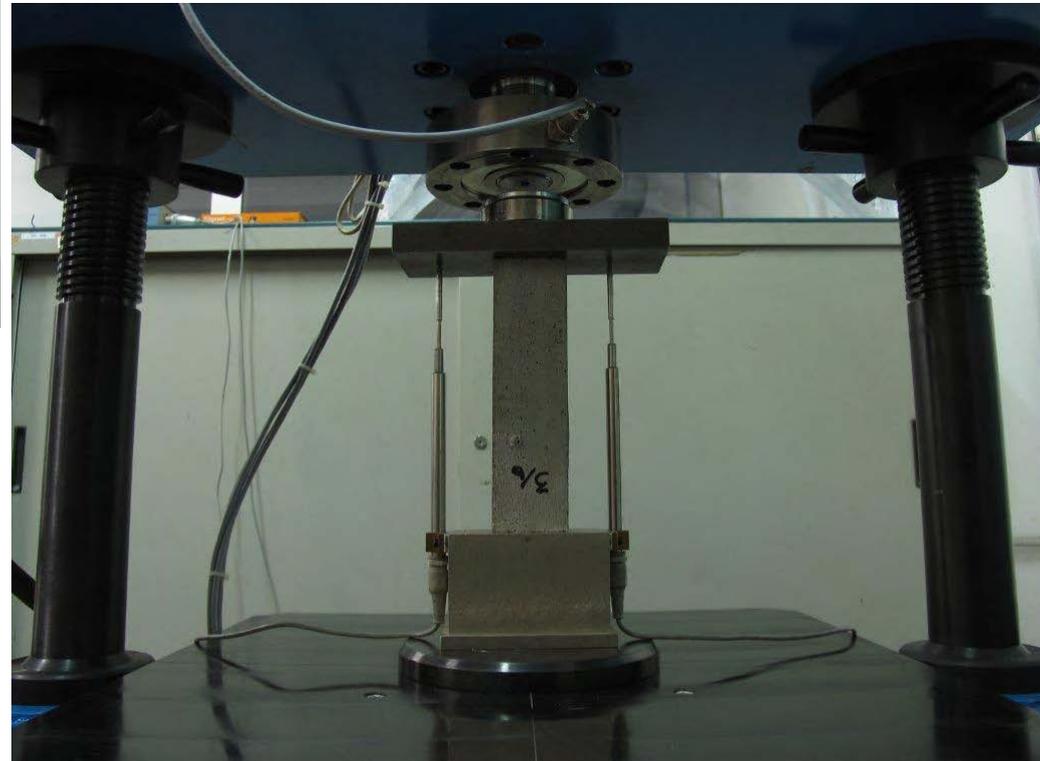
Prove statiche

2 tipologie di malte  
deumidificanti

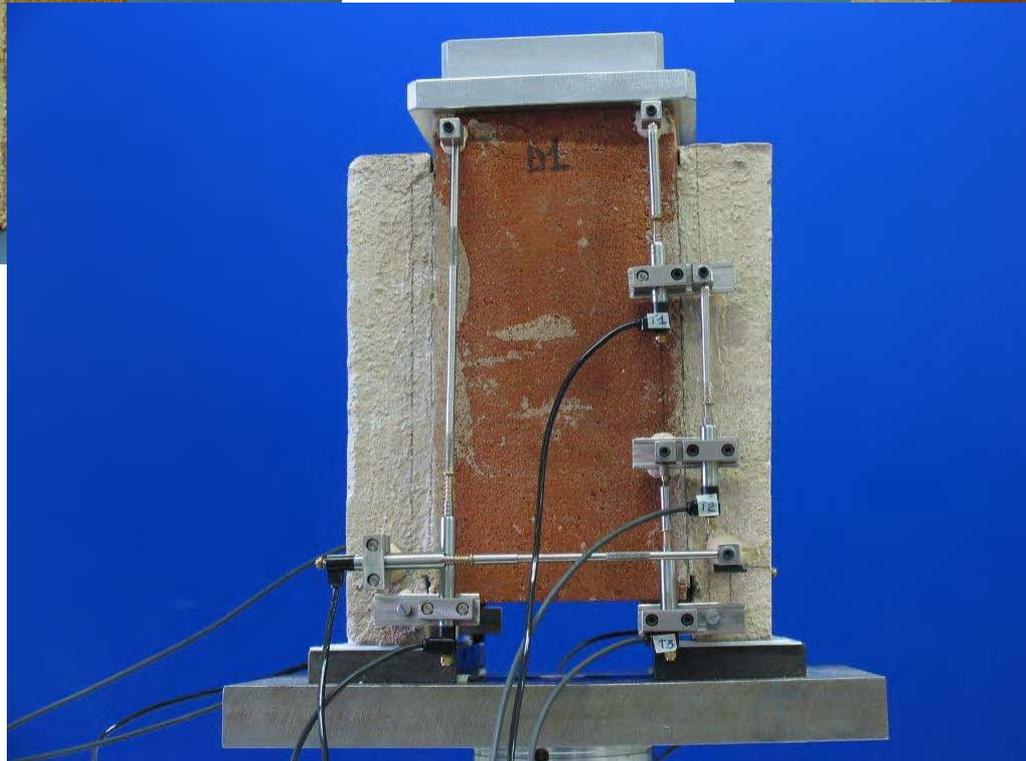
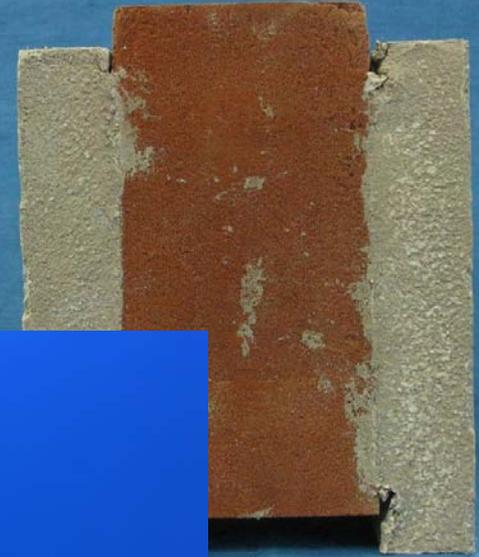
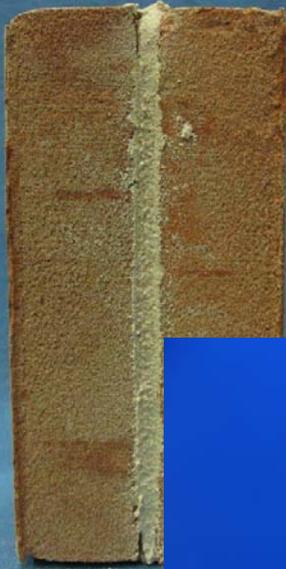
<b>MALTA A (*)</b>	
<i>Descrizione</i>	
Malta premiscelata in polvere per intonaci, composta da calce idraulica naturale (NHL) ed Eco-Pozzolana, sabbie naturali, speciali additivi e microfibre, a bassissima emissione di sostanze organiche volatili.	
<i>Campi d'impiego</i>	
<p>? Realizzazione di nuovi intonaci traspiranti a macchina o a cazzuola, all'interno e/o all'esterno, su murature in pietra, mattoni, tufo e miste, non soggette a umidità di risalita capillare.</p> <p>? Realizzazione di nuovi intonaci o ricostruzione di quelli esistenti a base calce e/o meccanicamente deboli, di murature in pietra, mattoni, tufo e miste, anche di pregio storico.</p> <p>? Realizzazione di interventi di "scuci-cuci" in paramenti murari, dove sono presenti vuoti e/o discontinuità.</p> <p>? Stilatura dei corsi tra pietre, mattoni e tufo di murature "faccia a vista".</p>	
<i>Vantaggi</i>	
La malta A possiede caratteristiche molto simili, in termini di resistenza meccanica, modulo elastico e porosità, a quelle delle malte a base di calce, calce-pozzolana o calce idraulica, impiegate originariamente nella costruzione degli edifici storici. Rispetto a tali malte però presenta proprietà che rendono il prodotto resistente alle diverse aggressioni chimico-fisiche, come ad esempio, ai cicli di gelo-disgelo, all'azione dilavante delle acque piovane, alla reazione alcali-aggregato ed alla comparsa di fessure da ritiro plastico.	
<i>Voce di capitolato</i>	
Intonaco di fondo traspirante a base di calce idraulica naturale ed Eco-Pozzolana, da applicare su murature esistenti, anche di pregio storico, o di nuova costruzione.	
<i>Caratteristiche tecniche</i>	
<p>? Aspetto: polvere</p> <p>? Colore: nocciola chiara</p> <p>? Tipo di legante: NHL 3.5 e NHL5</p> <p>? Dimensione massima dell'aggregato: 1.4 mm</p> <p>? Massa volumica apparente: 1.350 kg/m<sup>3</sup></p> <p>? Rapporto dell'impasto: 100 parti malta A con 19 parti di acqua</p> <p>? Resa: 13 kg/m<sup>2</sup> per cm di spessore</p> <p>? Aspetto dell'impasto: tixotropico</p>	<p>? Resistenza a compressione a 28 gg: 15-5 N/mm<sup>2</sup></p> <p>? Adesione al supporto: &gt;0,3 N/mm<sup>2</sup></p> <p>? Assorbimento d'acqua per capillarità: categoria W 0</p> <p>? Coefficiente di permeabilità al vapore acqueo: &lt;10</p> <p>? Conduttività termica: 0.54 W/mK</p> <p>? Reazione al fuoco: euroclasse A1</p>

<b>MALTA B (*)</b>	
<i>Descrizione</i>	
Malta a base di calce idrata e di calce idraulica, di colore bianco o grigio, contenente fibre poliacrilonitrile, applicabile sia a spruzzo con intonacatrici a ciclo continuo che a mano per realizzare intonaci deumidificanti.	
<i>Campi d'impiego</i>	
La malta B è progettata per realizzare intonaci interni ed esterni per deumidificare le murature.	
<i>Vantaggi</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>? Conferire alla muratura un elevato potere traspirante garantendo uno scambio igrometrico con l'ambiente.</li> <li>? Contrastare efficacemente l'effetto disgregante e la formazione delle efflorescenze causato dalla risalita e migrazione dei sali.</li> <li>? Rendere la muratura idrorepellente all'acqua proveniente dall'esterno (pioggia, umidità ecc).</li> </ul>	
<i>Voce di capitolato</i>	
Intonaco deumidificante per il trattamento di murature soggette all'umidità di risalita capillare in presenza di sali. Applicabile a spruzzo o a mano. Conforme ai requisiti della UNI EN 998/1 per gli intonaci da risanamento.	
<i>Caratteristiche tecniche</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>? Aspetto: polvere</li> <li>? Colore: bianco</li> <li>? Rapporto dell'impasto: quantitativo acqua 18,5-21,5 % sul peso del prodotto secco</li> <li>? Resa: 10 kg/m<sup>2</sup> per cm di spessore</li> <li>? Coefficiente di diffusione al vapore: 8</li> <li>? Assorbimento capillare a 24 ore: 1,30 kg/m<sup>2</sup></li> <li>? Profondità di penetrazione dell'acqua a 24 ore: 1,48 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>? Vuoti di aerazione: &gt;25%</li> <li>? Porosità totale: &gt;50%</li> <li>? Coefficiente di conducibilità termica: 0,47 W/mK</li> <li>? Resistenza a compressione: 5 N/mm<sup>2</sup></li> <li>? Resistenza a flessione: 2,48 N/mm<sup>2</sup></li> <li>? Adesione al supporto: &gt;0,40 N/mm<sup>2</sup></li> <li>? Reazione al fuoco: euroclasse A1</li> </ul>

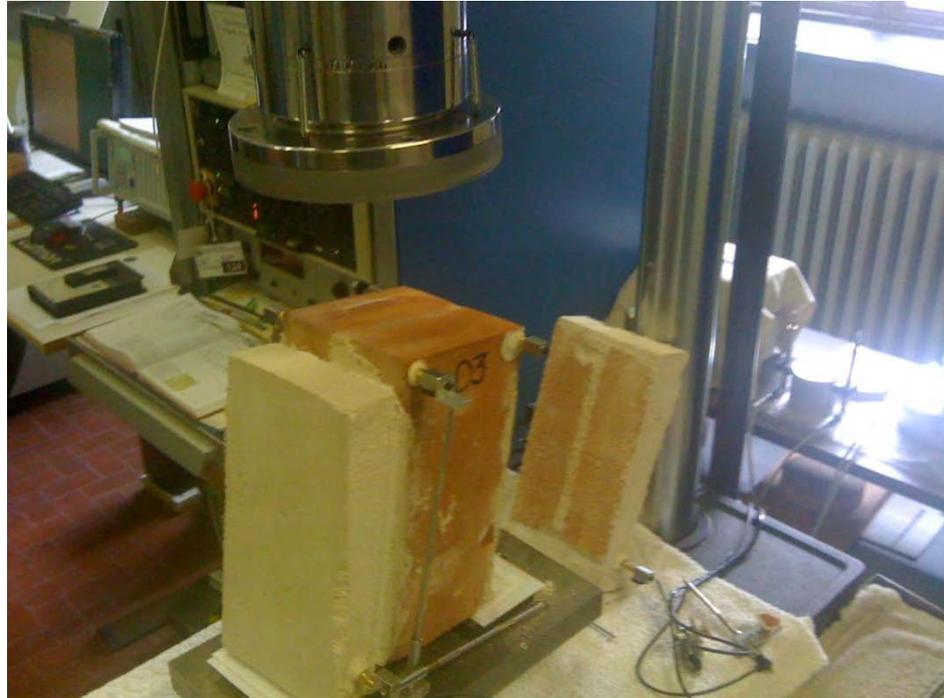
## 2° step: Provino misto 2 laterizi - malta



## 2° step: Provino misto 2 laterizi - malta



2° step: Provino misto 2 laterizi - malta



**2° step: Provino misto 2 laterizi - malta**



# Prove statiche di aderenza tra intonaco e muratura

A. Alberto, P. Antonaci, P. Bocca, A. Grazzini,  
D. Maserà S. Valente

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino

Riunione di coordinamento del progetto Re-Frescos  
6 Luglio 2011, Politecnico di Torino

# Introduzione

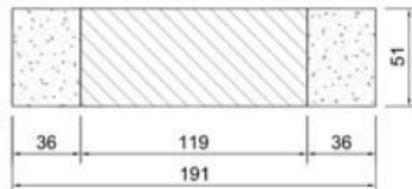
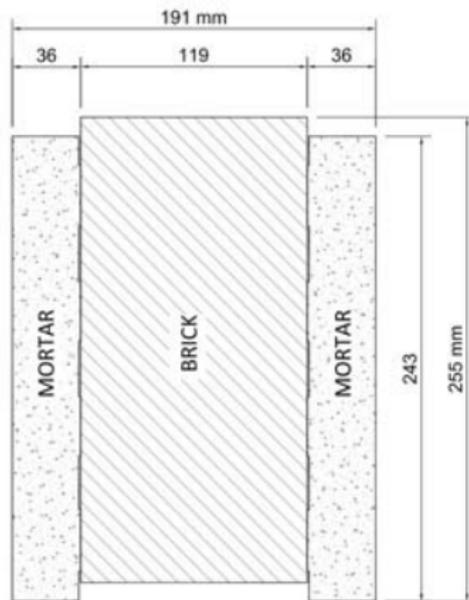
- ▶ Poiche' l'intonaco e' uno **strato sottile** , a diretto contatto con l'aria, esso e' soggetto al **ciclo termico** giornaliero ed alle variazioni di **umidita' relativa**.
- ▶ Se l'intonaco fosse libero, esso si dilaterrebbe in fase di riscaldamento e si contrarrebbe in fase di raffreddamento. La variazione di umidita' genera un fenomeno analogo.
- ▶ La muratura, essendo protetta dall'intonaco, subisce il ciclo termo-igrometrico 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.



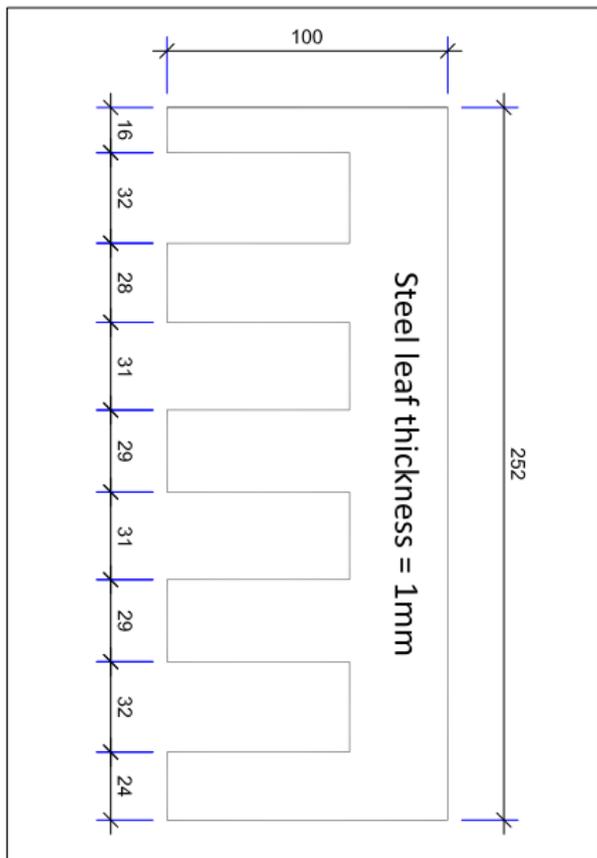
# La macchina di prova in controllo di spostamento



# Il provino



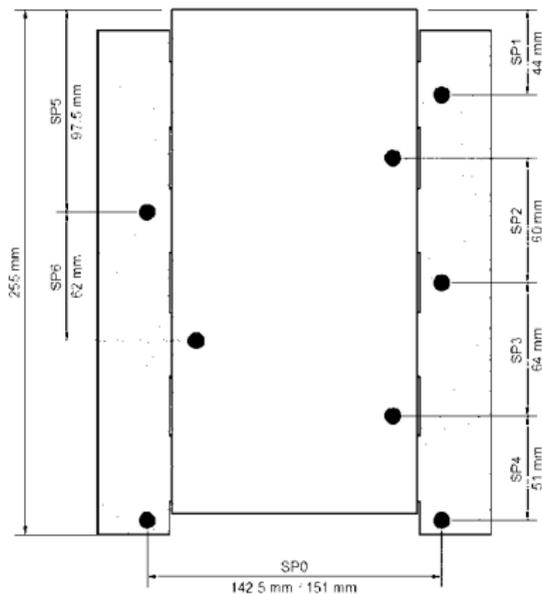
# Il pettine inserito tra intonaco e mattone



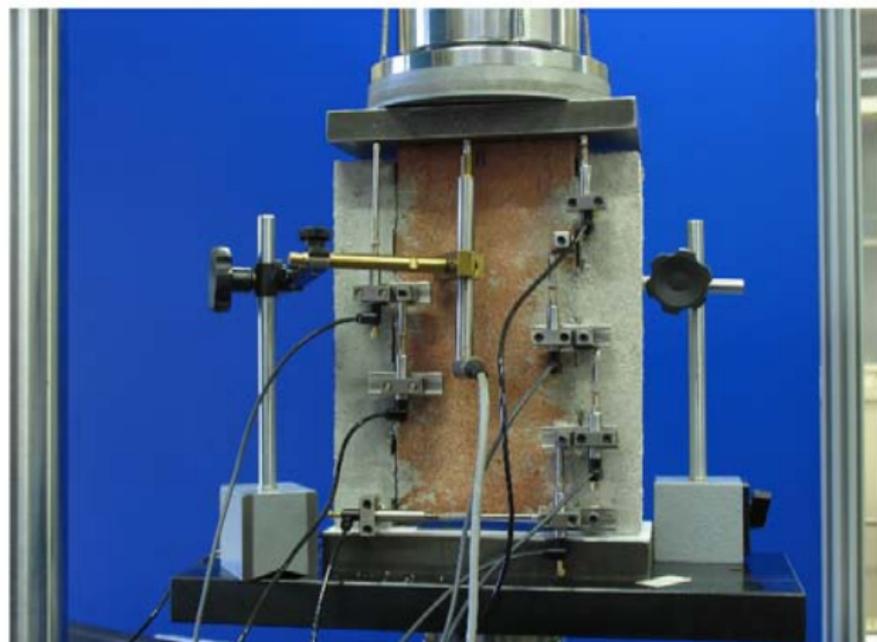
# Il provino montato sulla macchina di prova



# La posizione dei trasduttori di spostamento



# Il provino strumentato



# Il criterio di inizio della frattura

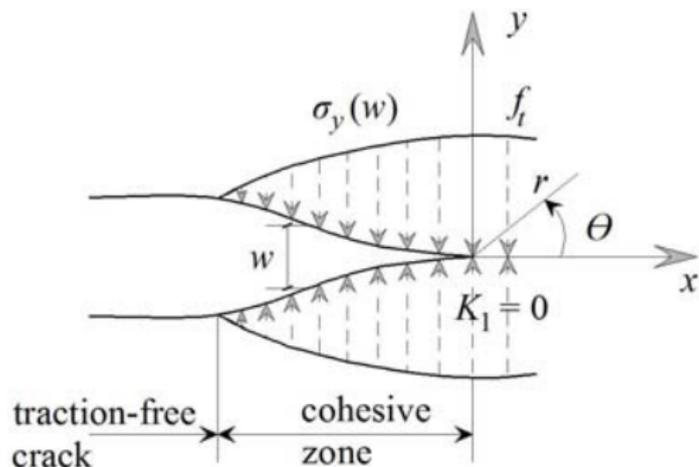
Il criterio di **inizio** della frattura e' stato assunto come segue:

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

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.

# Il modello della frattura coesiva

Secondo il modello della **frattura coesiva** entrambe le componenti di tensione coesiva sono funzioni decrescenti del modulo della discontinuità di spostamento. Per semplicità in figura è indicata la sola componente normale.



# Il criterio di evoluzione della frattura

Come proposto da:

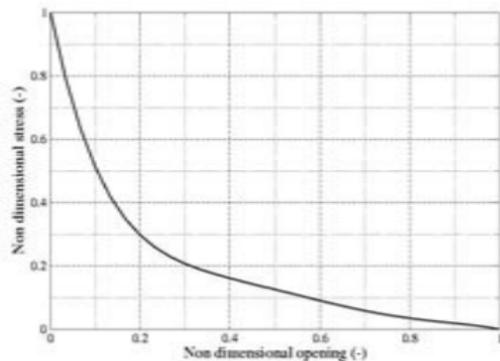
- ▶ J. Červenka, J.M.Chandra Kishen, and V.E. Saouma. Mixed mode fracture of cementitious bimaterial interfaces; part ii: Numerical simulations. *Engineering Fracture Mechanics*, 60(1):95–107, 1998.

le tensioni coesive sono assunte **funzioni decrescenti della discontinuita' di spostamento** espressa da:

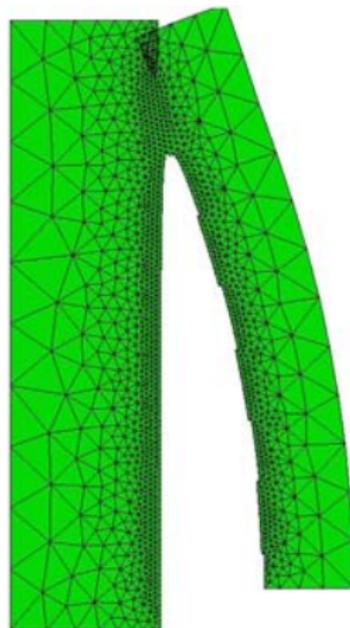
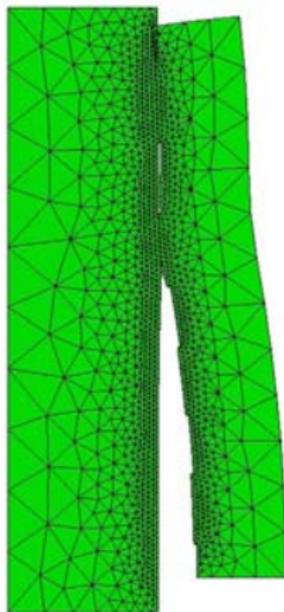
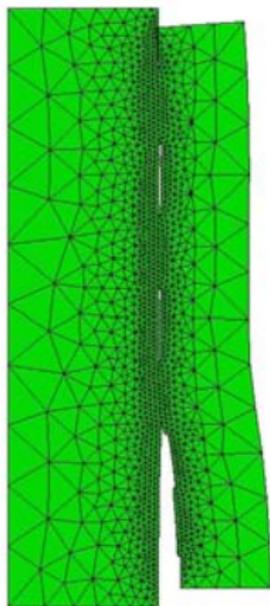
$$w_{eff} = \sqrt{\left(\frac{w_n}{w_{nc}}\right)^2 + \left(\frac{w_t}{w_{tc}}\right)^2} \quad (2)$$

dove  $w_n$  rappresenta la componente normale della discontinuita' di spostamento e  $w_t$  quella tangenziale.  $w_{nc}$  e  $w_{tc}$  sono i corrispondenti valori critici.

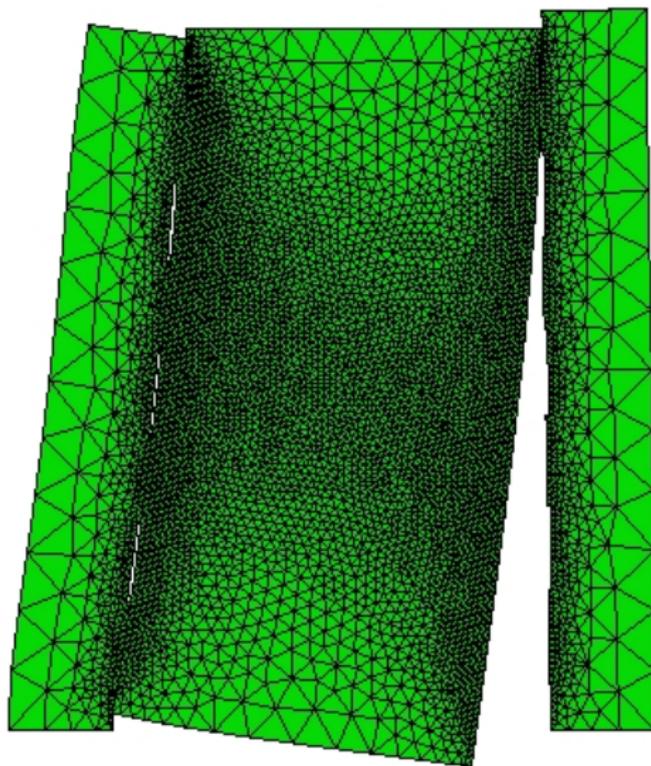
# la legge coesiva



# Gli spostamenti ingrandito 500 volte



# Risultati numerici dopo la rottura della simmetria



# Alcuni dati

Table: Proprieta' elastiche

	Mod.di Young MPa	Poisson -
malta	19500	0.15
mattone	14500	0.20

Table: Parametri dell'interfaccia

	$f_t$ MPa	$f_s$ MPa	$w_{nc}$ mm	$w_{tc}$ mm
lato sinistro	1.5	1.5	0.01	0.01
lato destro	1.3	1.3	0.01	0.01

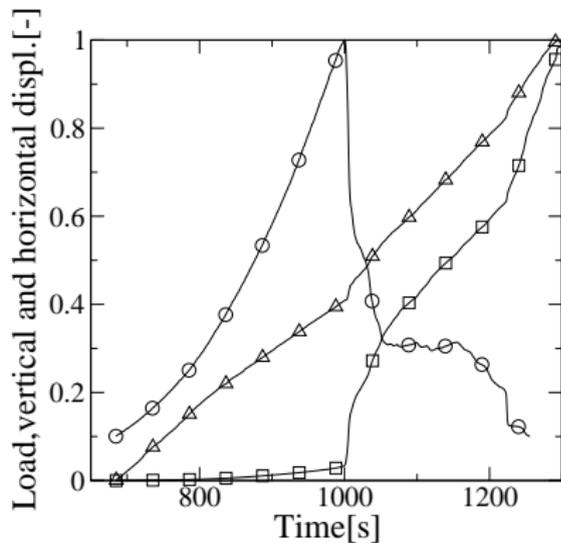


## Alcuni risultati sperimentali e numerici

	Carico max N	Spost.vert.max del punto di carico mm	Spost.oriz.max da malta a malta mm
Provino-1	8655	0.32	1.60
Provino-2	5809	0.37	1.14
Simulazione	7497	0.019	0.042

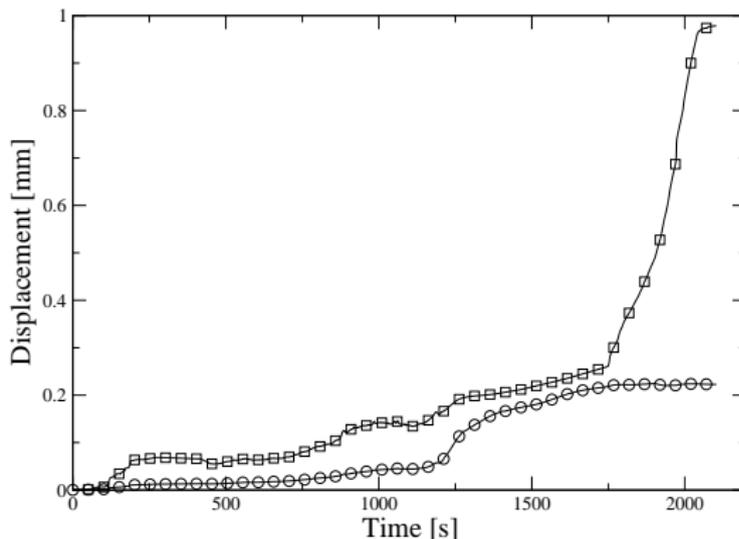


# Risultati sperimentali sul provino 1



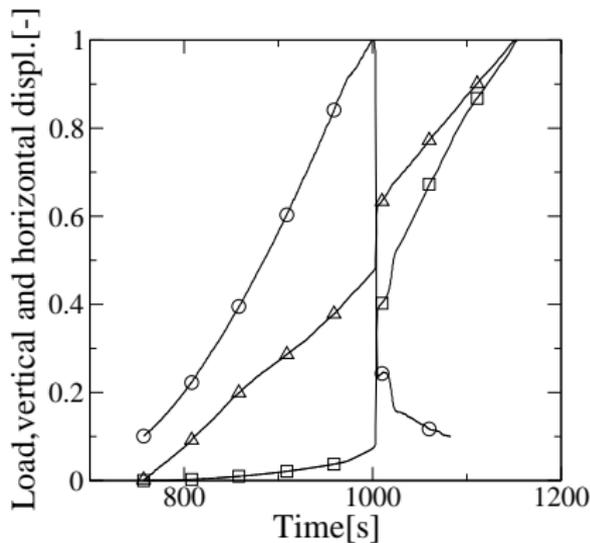
**Figure:** Risultati sperimentali adimensionali per il provino 1 (cerchio)carico, (quadrato)spost.ORIZ., (triangolo)spost.VERT.

# Rottura della simmetria sul provino 1



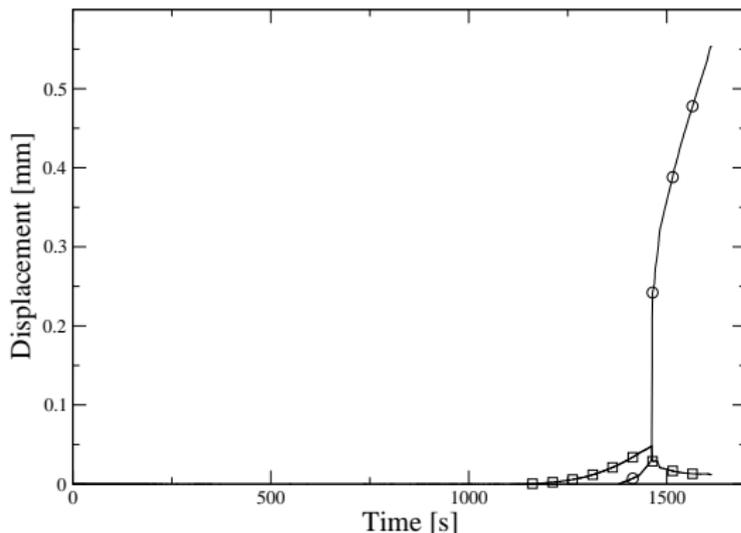
**Figure:** Risultati sperimentali per il provino 1  
(cerchio) trasduttore SP1 (lato destro) , (quadrato) trasduttore SP5 (lato sinistro)

# Risultati sperimentali sul provino 2



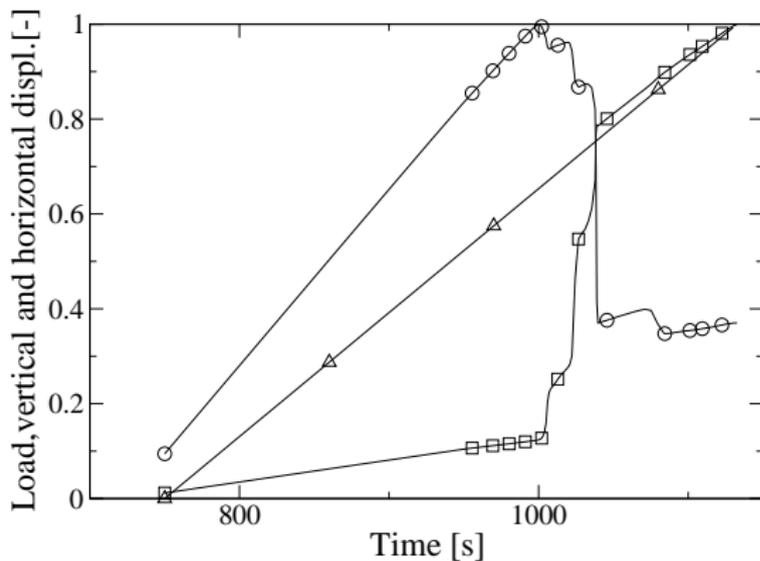
**Figure:** Risultati sperimentali adimensionali per il provino 2 (cerchio)carico, (quadrato)spost.ORIZ., (triangolo)spost.VERT.

# Rottura della simmetria sul provino 2



**Figure:** Risultati sperimentali per il provino 2  
(cerchio) trasduttore SP1 (lato destro) , (quadrato) trasduttore SP5 (lato sinistro)

# Risultati numerici



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

# 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 intendiamo confrontare diverse soluzioni di collegamento tra intonaco e muratura.
- ▶ A.Alberto, P.Antonaci, S.Valente.  
*Damage analysis of brick-to-mortar interfaces.*  
In *Int.Conf.on Mechanical Behaviour of Materials (ICM11)*, pages 1151–1156. Elsevier Procedia Engineering, Vol.10, 2011.  
DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.191.



# **SONOSCOPIA ENDOSUPERFICIALE:**

***La realizzazione  
dell'apparato sperimentale  
per la diagnosi sugli affreschi  
del Sacro Monte di Varallo***

**Alessandro Schiavi  
Paolo Tarizzo**



# Progetto RE-FRESCOS

*Bando regionale per progetti di ricerca in materia di scienze umane e sociali per l'anno 2008 – D.D. 229/DB1300 del 12 Novembre 2008, S.O. n.2 al BUR 48/2008*

## AREA TEMATICA:

VALORIZZAZIONE E TUTELA DEL PATRIMONIO ARTISTICO E CULTURALE

Ente proponente: POLITECNICO DI TORINO

Responsabile progetto: Prof. Alberto Carpinteri

Work Package 4: “Valorizzazione e recupero del patrimonio pittorico murale del Piemonte: il problema dell’affidabilità e durabilità del supporto”

Responsabile WP4: Dott. Alessandro Schiavi (I.N.Ri.M)

## Personale I.N.Ri.M:

Dott. Alessandro Schiavi

Dott.ssa Giuliana Benedetto

Dott. Paolo Tarizzo

P.E. Francesco Russo

*coadiuvati dal Dott. Claudio Guglielmone*

# Progetto RE-FRESCOS

## Obiettivi WP 4:

- 1) Studiare un metodo di indagine basato su tecniche acustiche non-invasive per la valutazione dello stato di conservazione degli affreschi.
- 2) Individuare i limiti e le potenzialità della tecnica di misurazione proposta con metodi metrologici.
- 3) Realizzare un apparato di misura *ad hoc* e definire la tecnica di misurazione con test di laboratorio e *in situ*.
- 4) Definire una “mappa acustica” sullo stato di conservazione della superficie dell'affresco *in situ*.

## Risultati Attesi:

- 1) Fornire un metodo di indagine innovativo e non invasivo, dello stato di conservazione degli affreschi.
- 2) Fornire una mappa qualitativa e quantitativa dello stato della superficie degli affreschi indagati.

# Stato dell'arte



ELSEVIER

Applied Acoustics 63 (2002) 43–59

www.elsevier.com/locate/apacoust

applied  
acoustics

## Revealing surface anomalies in structures by in situ measurement of acoustic energy absorption

P. Calicchia\*, G.B. Cannelli

Consiglio Nazionale delle Ricerche–Istituto di Acustica “O. M. Corbin” – Via del Fosso del Cavaliere, 100 – 00133 Rome, Italy

Received 7 August 2000; received in revised form 20 February 2001; accepted 20 March 2001

### Abstract

An improved method is proposed for revealing surface anomalies in structures by in situ relative measurement of acoustic energy absorption. Characterization and mapping of particular structures, such as plasters of antique mural paintings are taken into account as a possible application. In situ measurements of the acoustic energy absorption are carried out, employing a diagnostic technique based on the Cepstrum algorithm. Tests on samples with artificially prepared specimens, simulating surface anomalies, are described and a collection of acoustic images is presented. Properties of the specimens and features of the experimental technique are discussed. © 2001 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

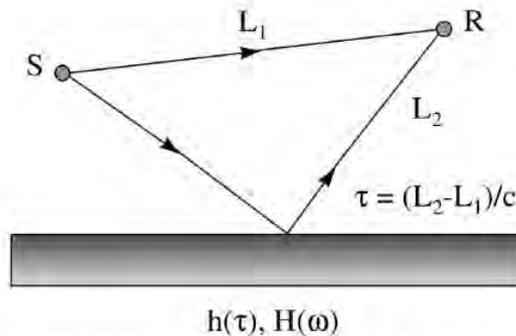


Fig. 1. Acoustic signal source and detector system for the study of surface anomalies.



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Journal of Sound and Vibration 284 (2005) 1015–1031

JOURNAL OF  
SOUND AND  
VIBRATION

www.elsevier.com/locate/jsv

## Assessment of fresco detachments through a non-invasive acoustic method

Dionisio Del Vescovo\*, Annalisa Fregolent

Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma “La Sapienza”, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italy

Received 14 July 2003; received in revised form 6 May 2004; accepted 26 July 2004

Available online 15 December 2004

### Abstract

In artistic frescoes, the partial detachment of plaster portions is a typical and serious problem. At present, the standard procedure of diagnosis consists of manual inspection, but produces only approximate information. This work describes in more detail an acoustic, non-invasive, experimental technique of diagnosis, which has been already proposed by the authors. It is based on the acoustic–structural interaction which occurs when an acoustic duct is excited by a loudspeaker and closed by the investigated fresco at the opposite end. The analysis of the acoustic pressure field and of its alterations allows the assessment of detachments, since the acoustic modal parameters are affected by the acoustic system boundary conditions, i.e. the portion of fresco closing the duct. Experiments carried out on fresco specimens show the potential of this acoustic method.

© 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved.

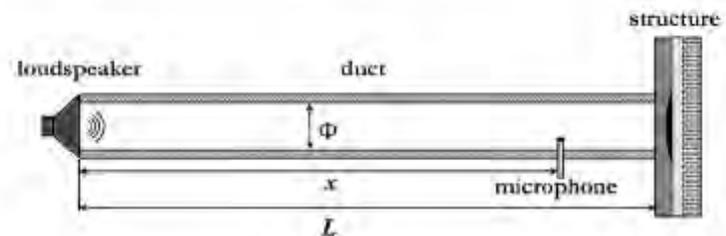
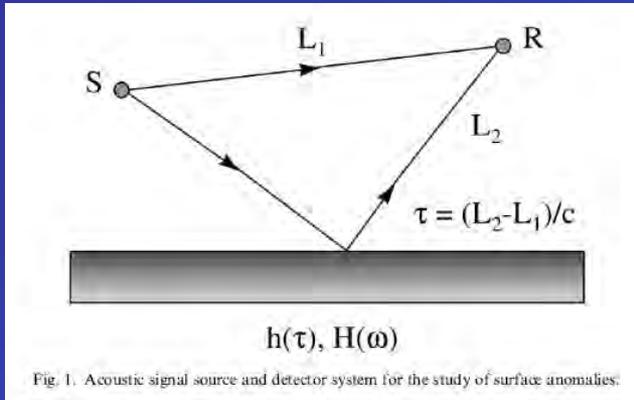
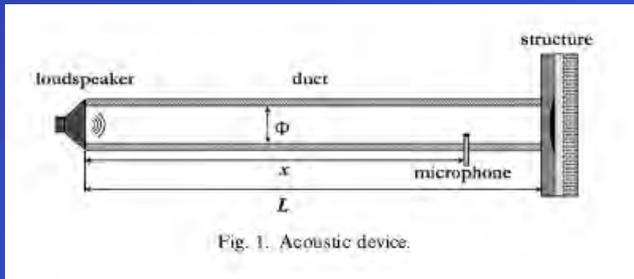


Fig. 1. Acoustic device.

# ...alcune incongruenze

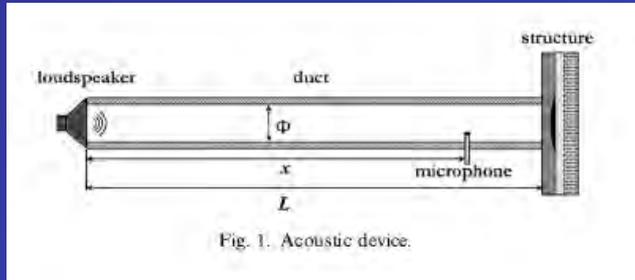


I valori di coefficiente di assorbimento determinati sono risultati poco distinguibili rispetto ai valori attesi (come da letteratura). Dal punto di vista metrologico le differenze tra “intonaco attaccato” e “intonaco staccato” sembrerebbero compresi nell’incertezza di misura (!).

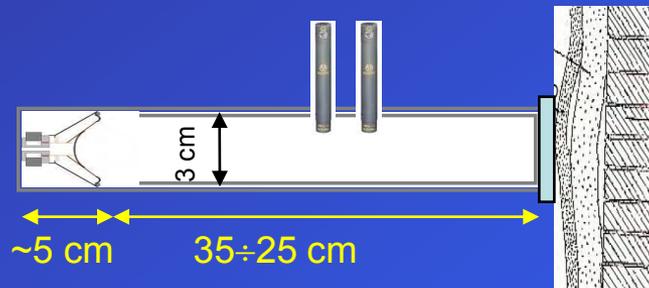


Le dimensioni geometriche del tubo ad onde stazionarie (in particolare lunghezza e diametro) condizionano fortemente la misura, molto più significativamente di quanto desunto sulla base della letteratura, l’analisi delle frequenze utili ci ha consentito di definire le dimensioni corrette.

# Sistema in fase di realizzazione



~50 cm



Sulle basi delle prime analisi abbiamo verificato che è possibile adottare un sistema di misura molto più compatto di quello preventivamente progettato.

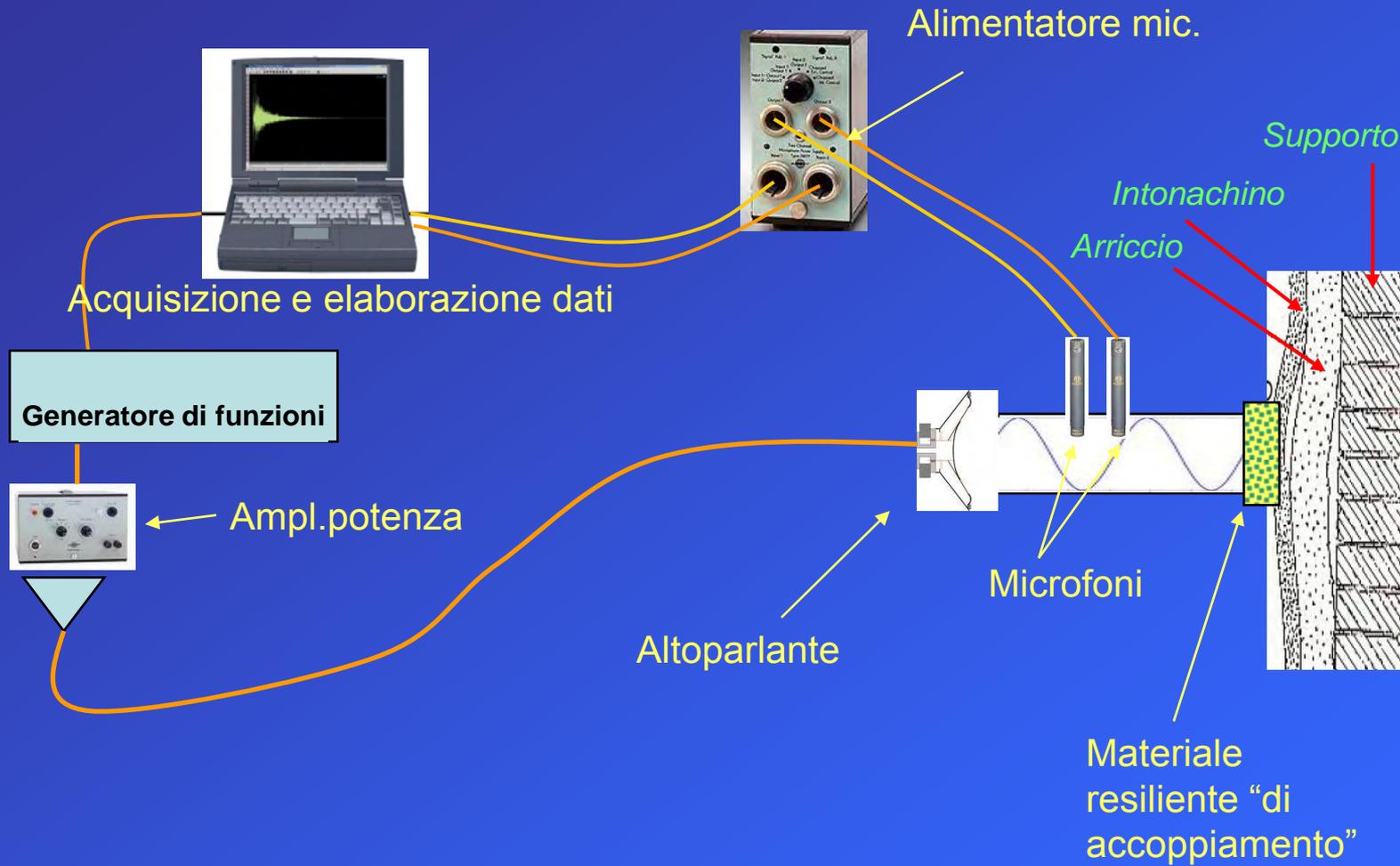
Il primo sistema prevedeva la presenza di un condotto flessibile tra generatore e microfoni, un condotto di circa 7.5 cm di diametro e 50 cm di lunghezza.

Il sistema che stiamo realizzando presenta un condotto estendibile tra solo 25 cm e 35 cm di lunghezza, con un diametro di 3 cm.

Queste dimensioni (oltre ad indubbi vantaggi di fruibilità) consentono una migliore risoluzione nei risultati e una più fine rilevazione dei difetti sulla superficie indagata.

L'estendibilità del tubo rende il sistema "accordabile" al fine di migliorare la definizione dell'analisi a seconda della tipologia di superficie e/o di danneggiamento.

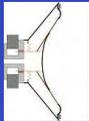
# Apparato sperimentale proposto

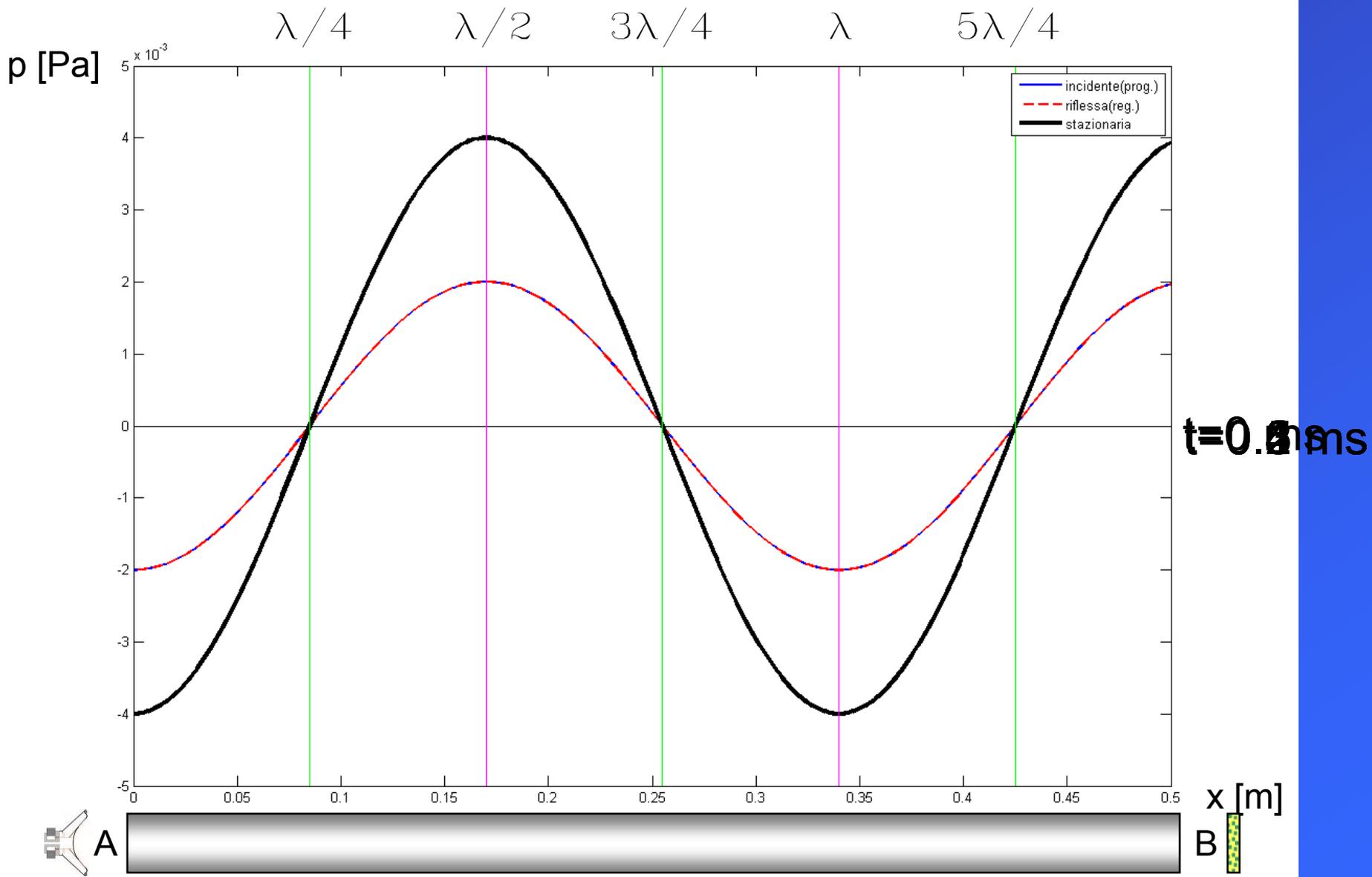


# TUBO A ONDE STAZIONARIE (O TUBO DI IMPEDENZA)

Un tubo rigido e di sezione costante costituisce un apparato idoneo alla misura delle proprietà acustiche (meccaniche) di una superficie posta ad una estremità del tubo stesso.

Attraverso la misura della pressione (ampiezza) delle onde stazionarie presenti nel tubo, può essere determinata l'impedenza acustica del materiale testato.



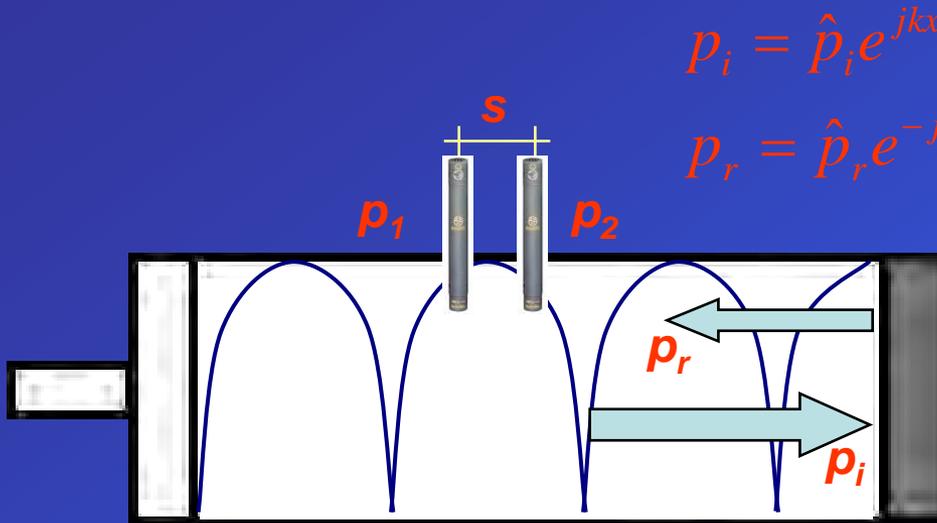


$f = 1000 \text{ Hz}$ ;  
 $c = 340 \text{ m/s}$ ;  
 $A = 0.002 \text{ Pa}$ ;  
 $\lambda = c/f = 0.34 \text{ m}$

$$p_+ = A_+ e^{ikx - i\omega t}$$

$$p_- = A_- e^{-ikx - i\omega t}$$

# Basi teoriche del principio



$$p_i = \hat{p}_i e^{jkx}$$

$$p_r = \hat{p}_r e^{-jkx}$$

$$p_1 = \hat{p}_i e^{jkx_1} + \hat{p}_r e^{-jkx_1}$$

$$p_2 = \hat{p}_i e^{jkx_2} + \hat{p}_r e^{-jkx_2}$$

$$H_i = \frac{p_{2i}}{p_{1i}} = e^{-jk(x_2-x_1)} = e^{-jks}$$

$$H_r = \frac{p_{2r}}{p_{1r}} = e^{jk(x_2-x_1)} = e^{jks}$$

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jkx_2} + r e^{-jkx_2}}{e^{jkx_1} + r e^{-jkx_1}}$$

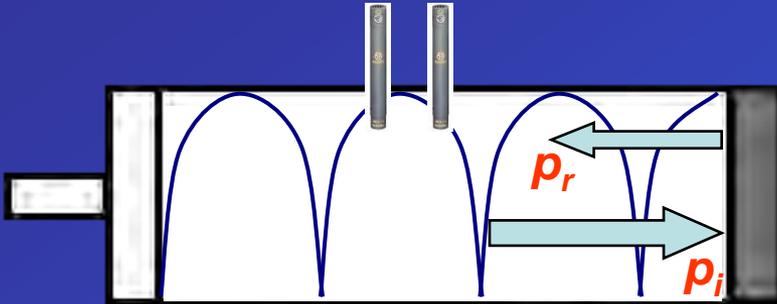
$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{2jkx_1}$$

$$k = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$c_0(T^\circ) = 343.3 \sqrt{\frac{T}{293}}$$

La tecnica di misura è limitata in frequenza nel seguente campo:  $0 \leq k \cdot s \leq \pi/2$

# Basi teoriche del principio



La funzione di trasferimento  $H_{12}$ , che è funzione della frequenza, è calcolata scambiando le posizioni dei microfoni. In questo modo si correggono gli effetti di sfasamento e le differenti sensibilità.

$$H_{12} = \left( H_{12}^I \cdot H_{12}^{II} \right)^{1/2} = |H_{12}| e^{j\varphi}$$

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{2jkx_1}$$

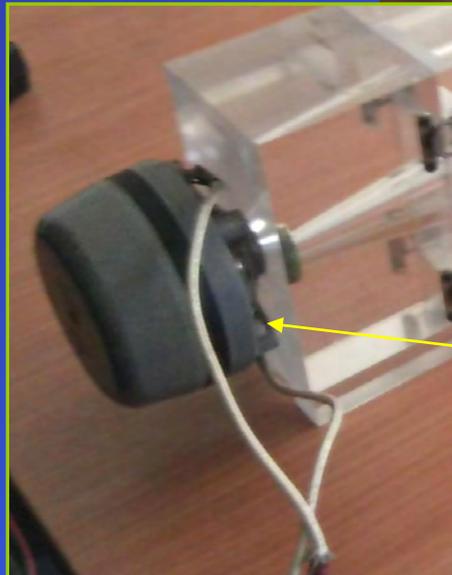
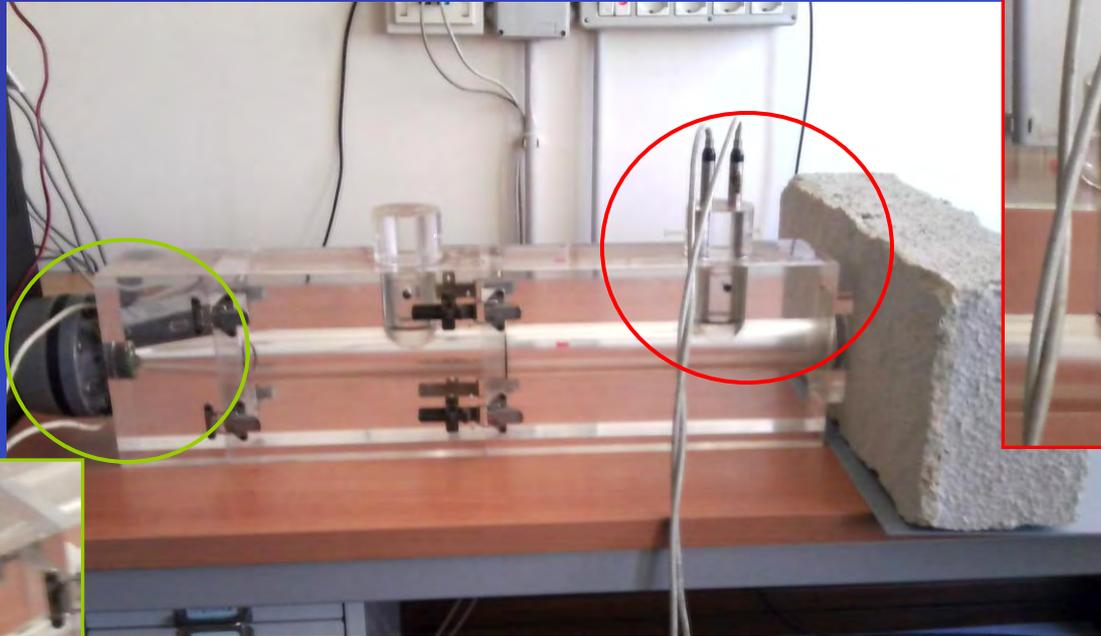
Coefficiente di assorbimento  
acustico per incidenza normale

$$\longrightarrow \alpha = 1 - |r|^2$$

Impedenza acustica specifica

$$\longrightarrow \frac{Z}{\rho c_0} = \frac{1+r}{1-r}$$

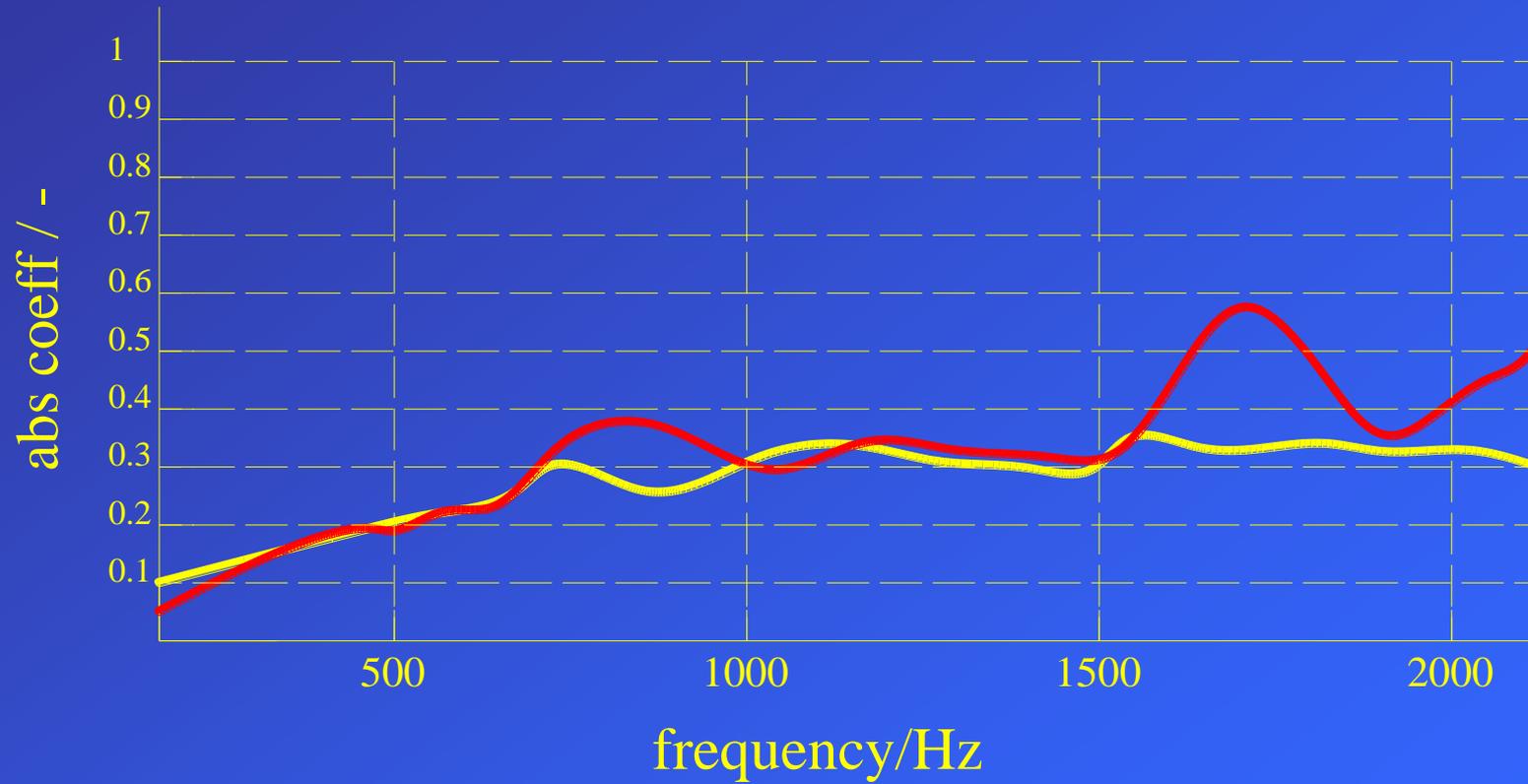
# (RI) ALLESTIMENTO DELL'APPARATO DI LABORATORIO



Compression Driver

Microfoni 1/4"

# Risultati preliminari



The logo for iNRIIM, featuring a blue circle with a white grid pattern and the text 'iNRIIM' in white lowercase letters.

**iNRIIM**

ISTITUTO  
NAZIONALE  
DI RICERCA  
METROLOGICA

A classical painting depicting a winged figure, likely Cupid or Psyche, holding a large, ornate object. The figure is surrounded by other figures, including a child in the bottom right corner. The background is a bright blue sky with soft clouds.

# **SONOSCOPIA** **ENDOSUPERFICIALE**

**Alessandro Schiavi:** [\*\*a.schiavi@inrim.it\*\*](mailto:a.schiavi@inrim.it)

**Paolo Tarizzo:** [\*\*p.tarizzo@inrim.it\*\*](mailto:p.tarizzo@inrim.it)



# Problemi di applicabilità dei metodi proposti

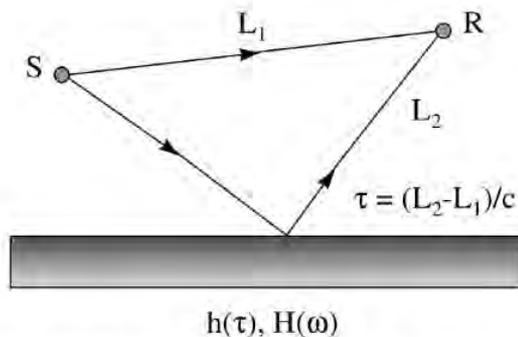
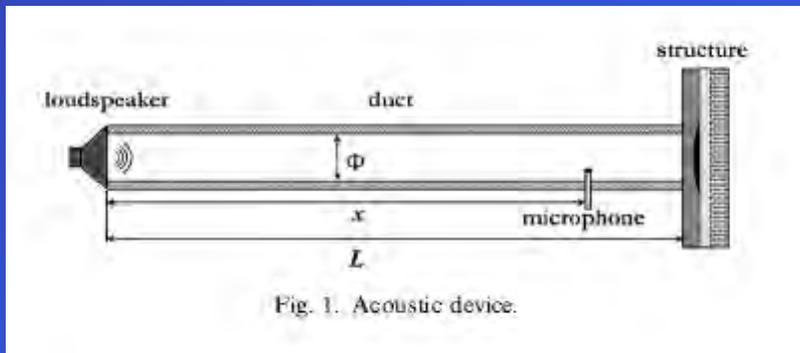


Fig. 1. Acoustic signal source and detector system for the study of surface anomalies.

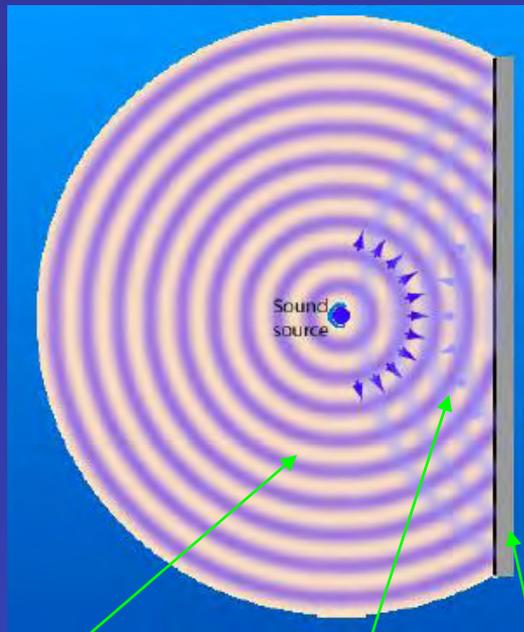
Questo metodo, che fornisce molte informazioni fisico-meccaniche, non è applicabile perché la sorgente **S** e il ricevitore **R** devono essere collocati in campo libero; nel nostro caso la presenza delle statue nel campo crea riflessioni multiple.

# Problemi di applicabilità dei metodi proposti



Questo metodo è basato sulla risposta all'impulso. Tecnicamente è il metodo che offre più garanzie, tuttavia sulla base dell'articolo, l'analisi proposta è basata solo sull'analisi della risposta in frequenza del sistema.

# Basi teoriche del principio



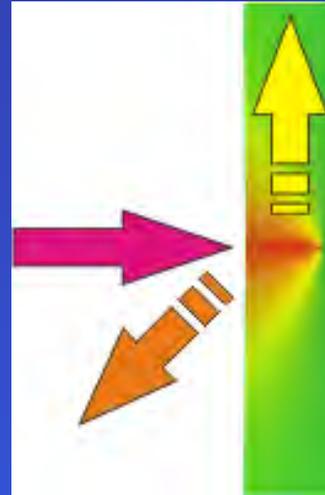
Energia  
incidente



Energia  
riflessa



Energia  
Assorbita



## ASSORBIMENTO ACUSTICO

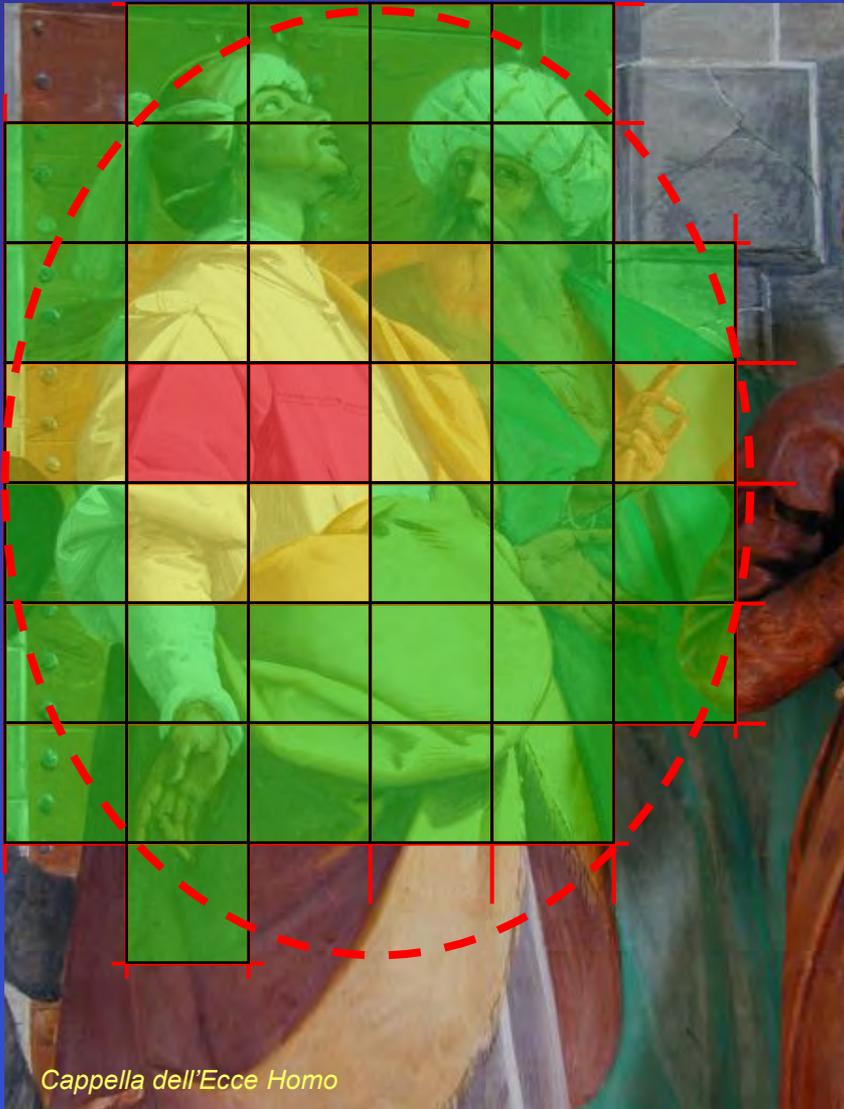
- Assorbimento per porosità
- Assorbimento per risonanza di cavità
- Assorbimento per risonanza di membrana

Quando un'onda di pressione acustica incontra una qualsiasi superficie in parte viene riflessa e in parte assorbita. L'onda riflessa è modificata in ampiezza e in frequenza (modulo e fase).

Determinando sperimentalmente la "quantità di energia" riflessa o assorbita (nota l'energia incidente), oppure l'andamento della risposta in frequenza, è possibile risalire alle proprietà e/o alle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale "ostacolo".

Onda Incidente  
Onda riflessa  
Ostacolo

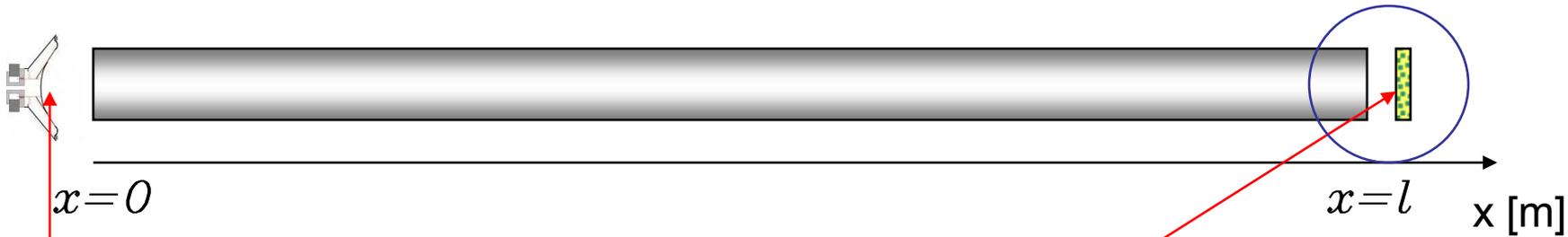
# Esempio: Tecnica di intervento



1 - Individuazione di un'area d'intervento

2 - Suddivisione "topografica" della superficie interessata in aree di dimensioni definite

3 - Determinazione del coefficiente di riflessione di ciascuna porzione di superficie e assegnazione, a ciascuna porzione d'area, di un "indicatore di criticità"



$$p(x,t) = A_+ e^{ikx - i\omega t} + A_- e^{-ikx - i\omega t}$$

$$u(x,t) = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\rho c} [p_+(x,t) - p_-(x,t)]$$

$$p = A_+ e^{ikx} + A_- e^{-ikx} = A \cosh(ikx + \Phi_0) = A \cosh(ikx - \Phi_l)$$

$$u = \frac{A}{\rho c} \sinh(ikx + \Phi_0) = -\frac{A}{\rho c} \sinh(ikx - \Phi_l)$$

$$A_+ = \frac{1}{2} A e^{\Phi_0}$$

$$A_- = \frac{1}{2} A e^{-\Phi_0}$$

$$d = l - x$$

$$\Phi_l = \Phi_0 + ikl$$

$$\Phi_0 = \pi\alpha_0 - i\pi\left(\beta_0 + \frac{1}{2}\right)$$

$$\Phi_l = \pi\alpha_l - i\pi\left(\beta_l + \frac{1}{2}\right)$$

$$ik = -\pi\gamma + i\pi\frac{2}{\lambda}$$

$$\alpha_0 = \alpha_l + \gamma_l$$

$$\beta_0 = \beta_l + \frac{2l}{\lambda}$$

$$\frac{A_r}{A_i} = \exp(-2\text{Re}\Phi_s) = e^{-2\pi\alpha_l}$$

$$\text{phasediffonref} = -2\text{Im}\Phi_s = \pi(2\beta_s + 1)$$

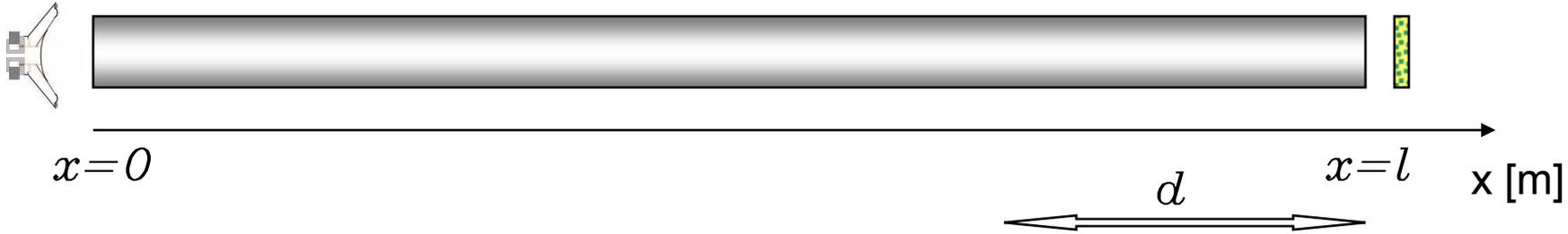
$$z_l = \left(\frac{p}{u}\right)_l = \rho c \zeta_l = \rho c(\vartheta - i\chi)$$

$$\zeta_l = \coth\Phi_l = \coth\left(\alpha_l - i\beta_l - \frac{1}{2}i\right) = \tanh\pi(\alpha_l - i\beta_l)$$

Se l'impedenza acustica specifica è nota:

$$\zeta_0 = \coth\Phi_0 = \tanh\pi(\alpha_0 - i\beta_0) = \tanh\pi\left[(\alpha_l + \gamma_l) - i\left(\beta_l + \frac{2l}{\lambda}\right)\right]$$

Se l'impedenza acustica non è nota, essa può essere determinata misurando l'ampiezza della pressione nel tubo in funzione di x:



$$|A|^2 |\cosh(ikd - \Phi_1)|^2 = |A|^2 \left| \cosh \pi \left[ (\alpha_1 + \gamma_d) - i \left( \beta_1 + \frac{2d}{\lambda} + \frac{1}{2} \right) \right] \right|^2 = |A|^2 \left[ \cosh^2 \pi (\alpha_1 + \gamma_d) - \cos^2 \pi \left( \beta_1 + \frac{2d}{\lambda} \right) \right]$$

$$\beta_1 + \frac{2d_{\min}}{\lambda} = n$$

$$p_{\min}(n) = |A| \sinh \pi \left[ \alpha_1 + \frac{1}{2} \gamma \lambda (n - \beta_1) \right]$$

$$p_{\max} \left( n + \frac{1}{2} \right) = |A| \cosh \pi \left[ \alpha_1 + \frac{1}{2} \gamma \lambda \left( n + \frac{1}{2} - \beta_1 \right) \right]$$

Per misurare l'impedenza  $\zeta_1$  :

determinare la distanza tra due minimi e quella tra il minimo più prossimo alla terminazione  $x=l$ ;

il valore di  $\gamma$  è determinabile misurando la pressione rms a due minimi consecutivi e il massimo intermedio;

Il valore di  $\alpha_1$  è determinabile attraverso la media aritmetica dei valori rms della pressione a due minimi consecutivi, diviso per il valore rms della pressione del massimo intermedio (conoscendo  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $d_{\max}$ )

Con  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  è possibile determinare l'impedenza del materiale posto a  $x=l$

# Road-map prevista

## Giugno - Dicembre 2010:

- 1) Realizzazione dell'apparato sperimentale
- 2) Taratura e caratterizzazione dell'apparato in laboratorio

## Gennaio - Giugno 2011:

- 1) Prime misure esplorative *in situ* per la definizione della procedure di misurazione
- 2) Definizione delle procedure di interpretazione e analisi dei dati sperimentali raccolti *in situ*
- 3) Primo prototipo di "mappa acustica".

## Da Luglio 2011:

- 1) Inizio attività di rilevazione dello stato endosuperficiale degli affreschi
- 2) Analisi dei dati
- 3) Produzione di "mappe acustiche" sullo stato degli affreschi soggetti a monitoraggio