

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.

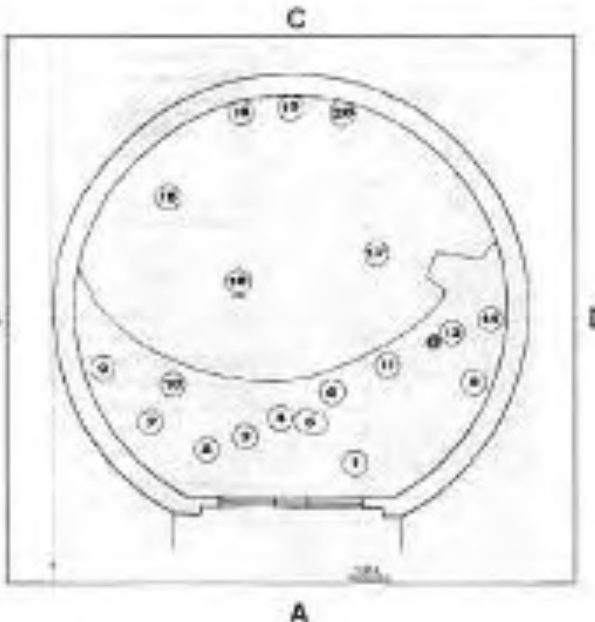


Condizioni strutturali della Cappella XVII

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		***	***	***	***

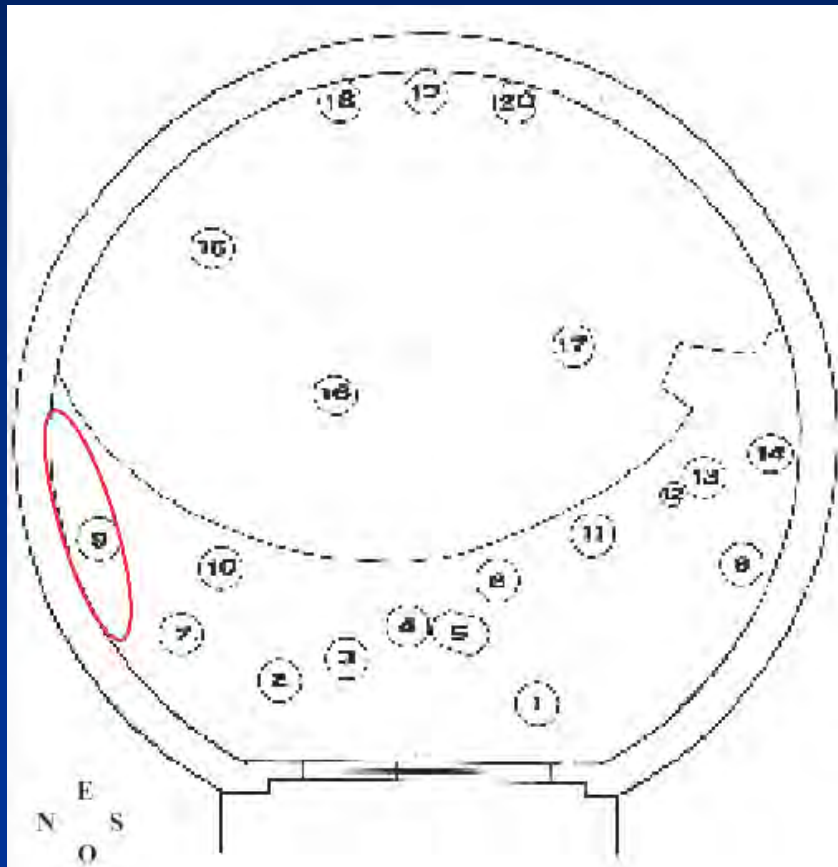
*** urgente
 ** indispensabile
 * tenere sotto controllo
 non preoccupante



[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".



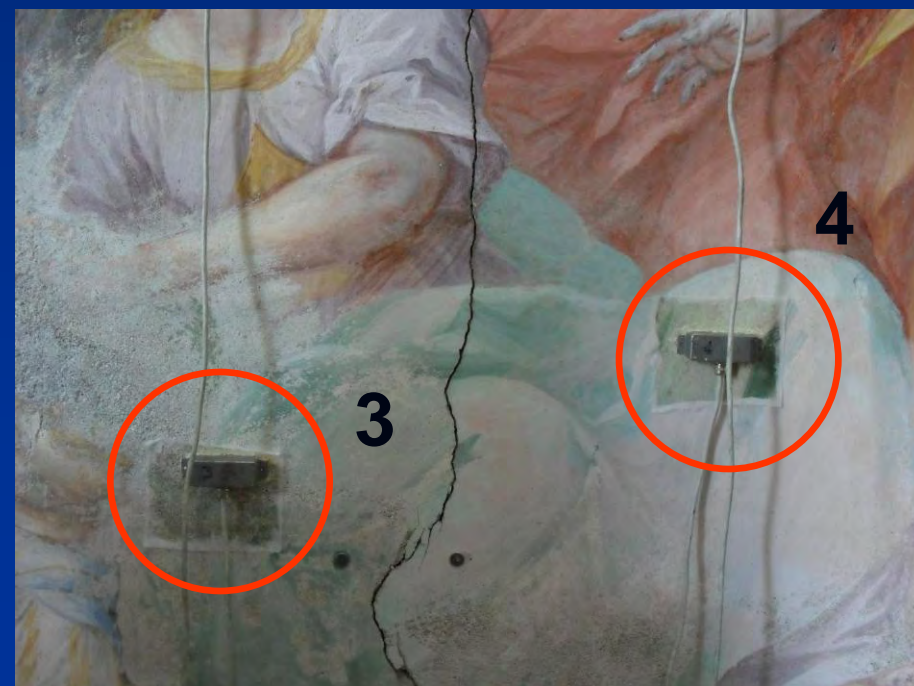
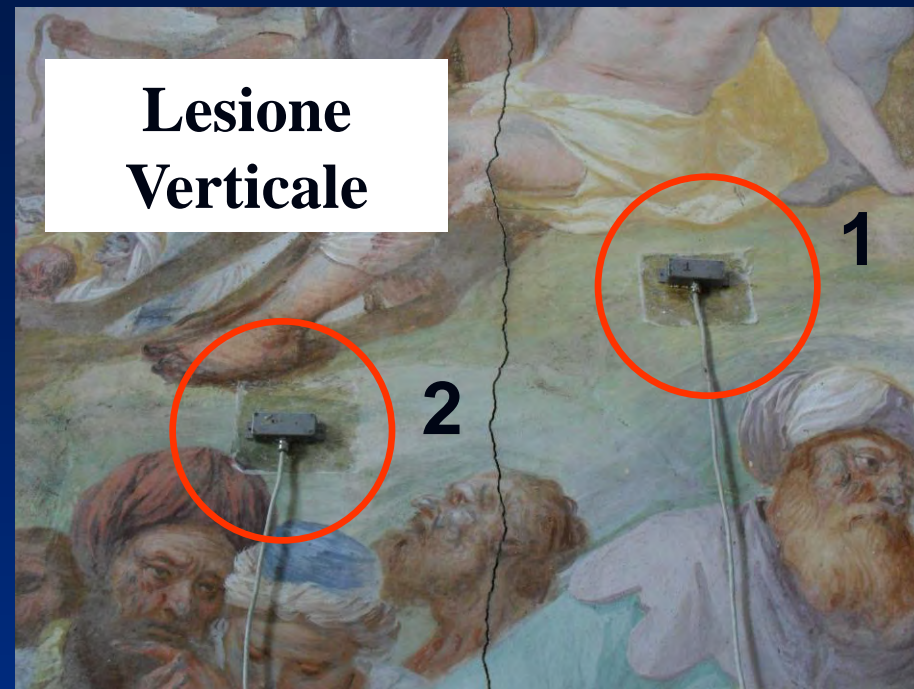
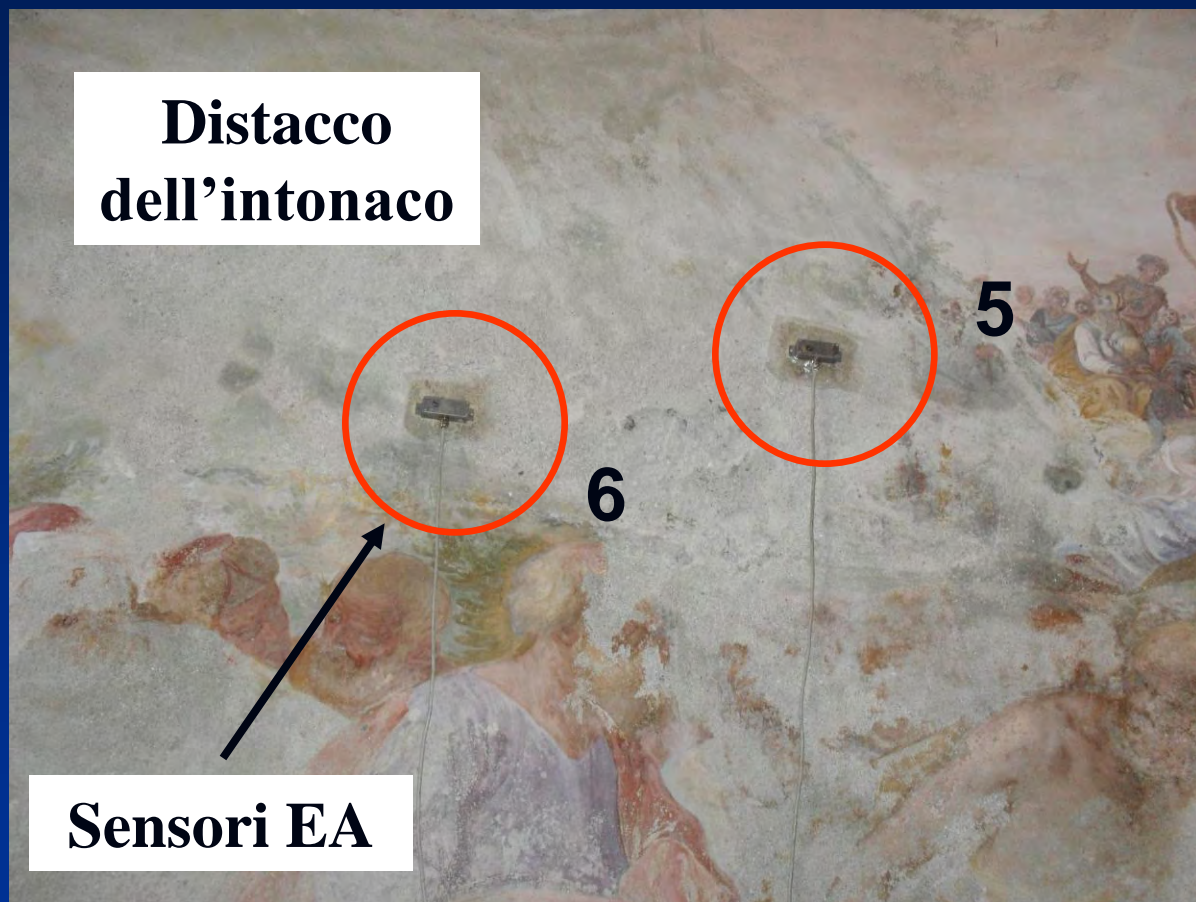
Si tratta di una resina acrilica che viene utilizzata nel campo del restauro come consolidante a basse concentrazioni (2-4%), o come collante in concentrazioni maggiori.

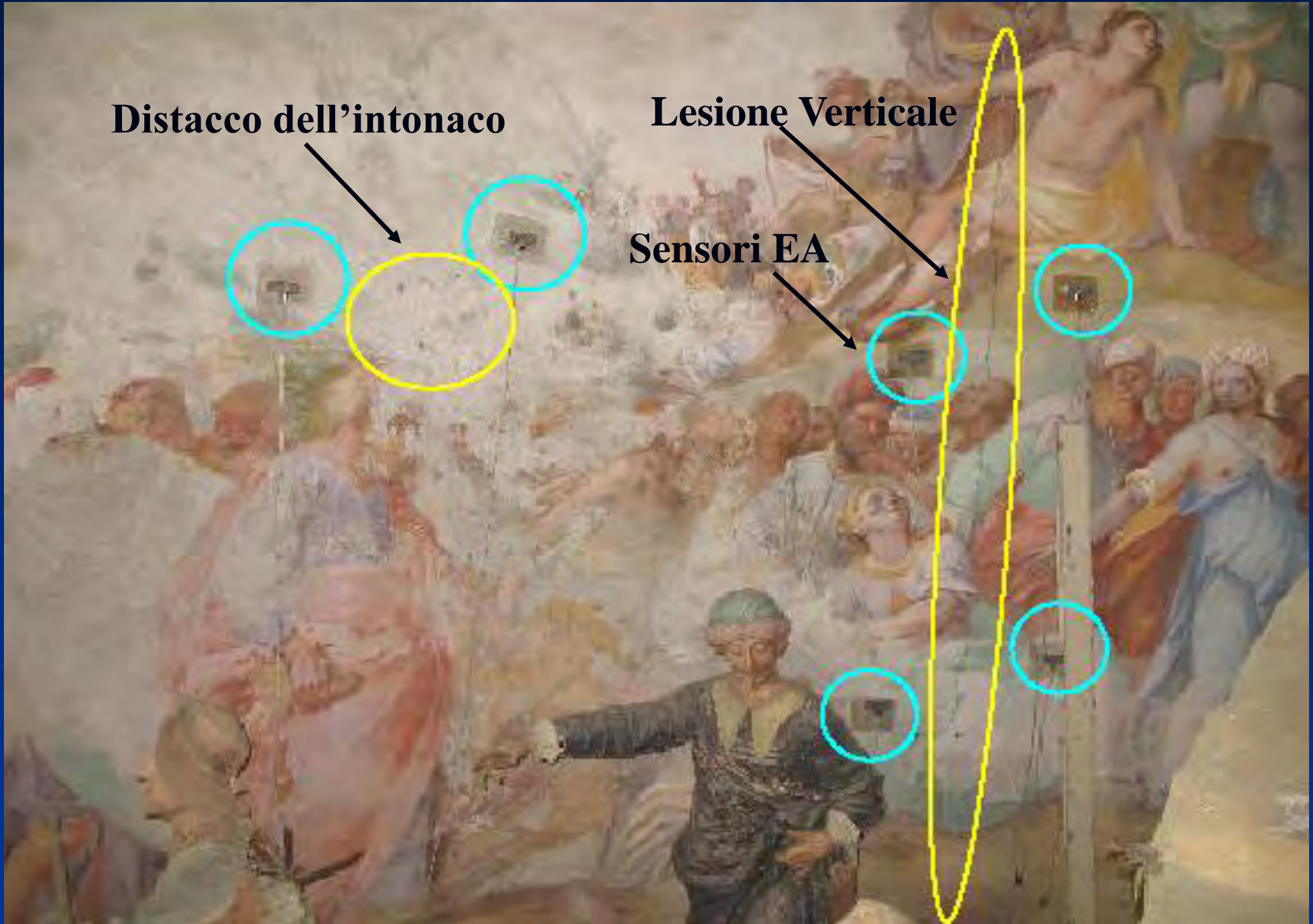
Il Paraloid ha la funzione di formare una ottima base protettiva per il successivo incollaggio dei sensori EA.

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

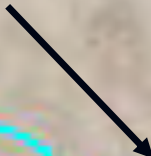


I sensori sono stati applicati in zone utili a monitorare contemporaneamente sia l'avanzamento della lesione che il distacco dell'intonaco.





Distacco dell'intonaco



Lesione Verticale



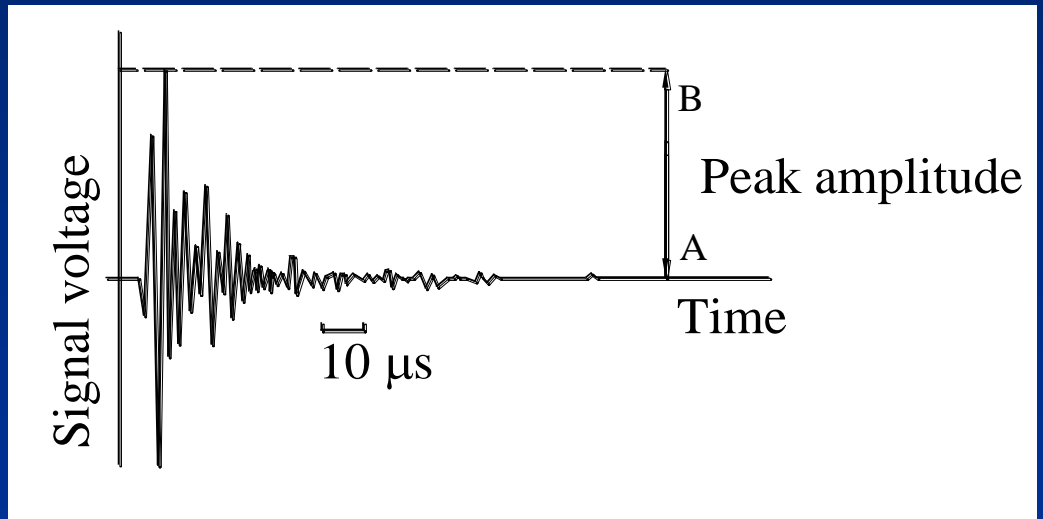
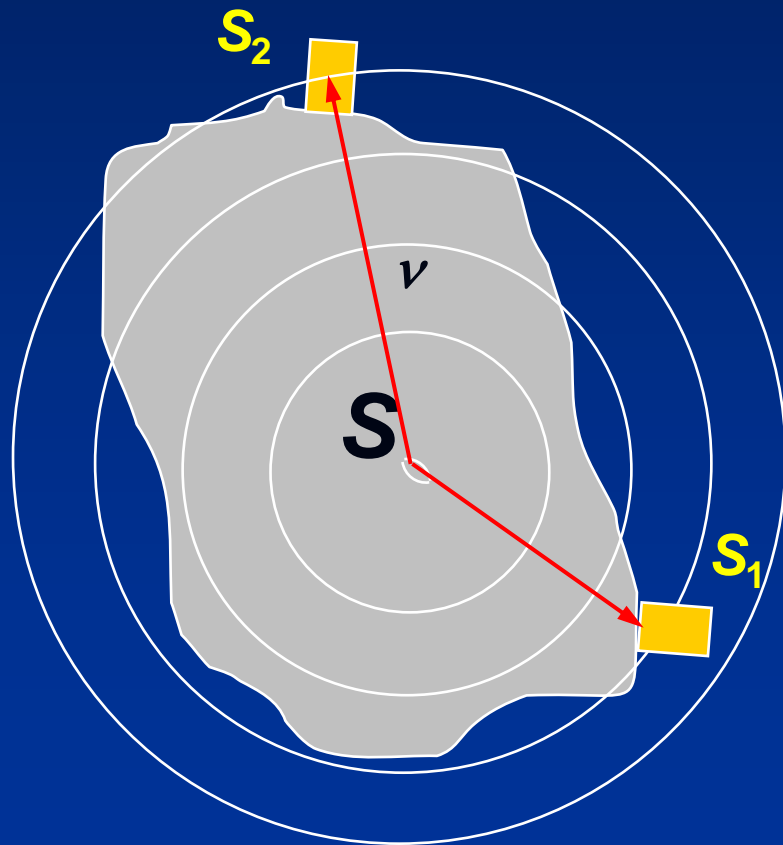
Sensori EA



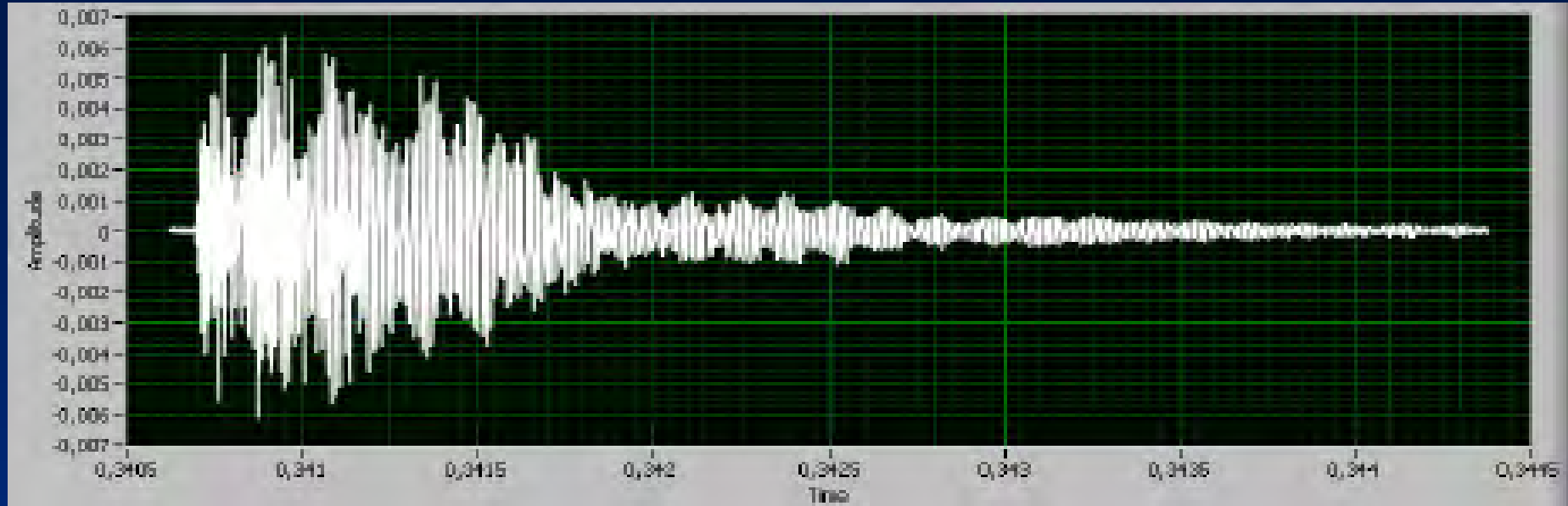
The Acoustic Emission Technique

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



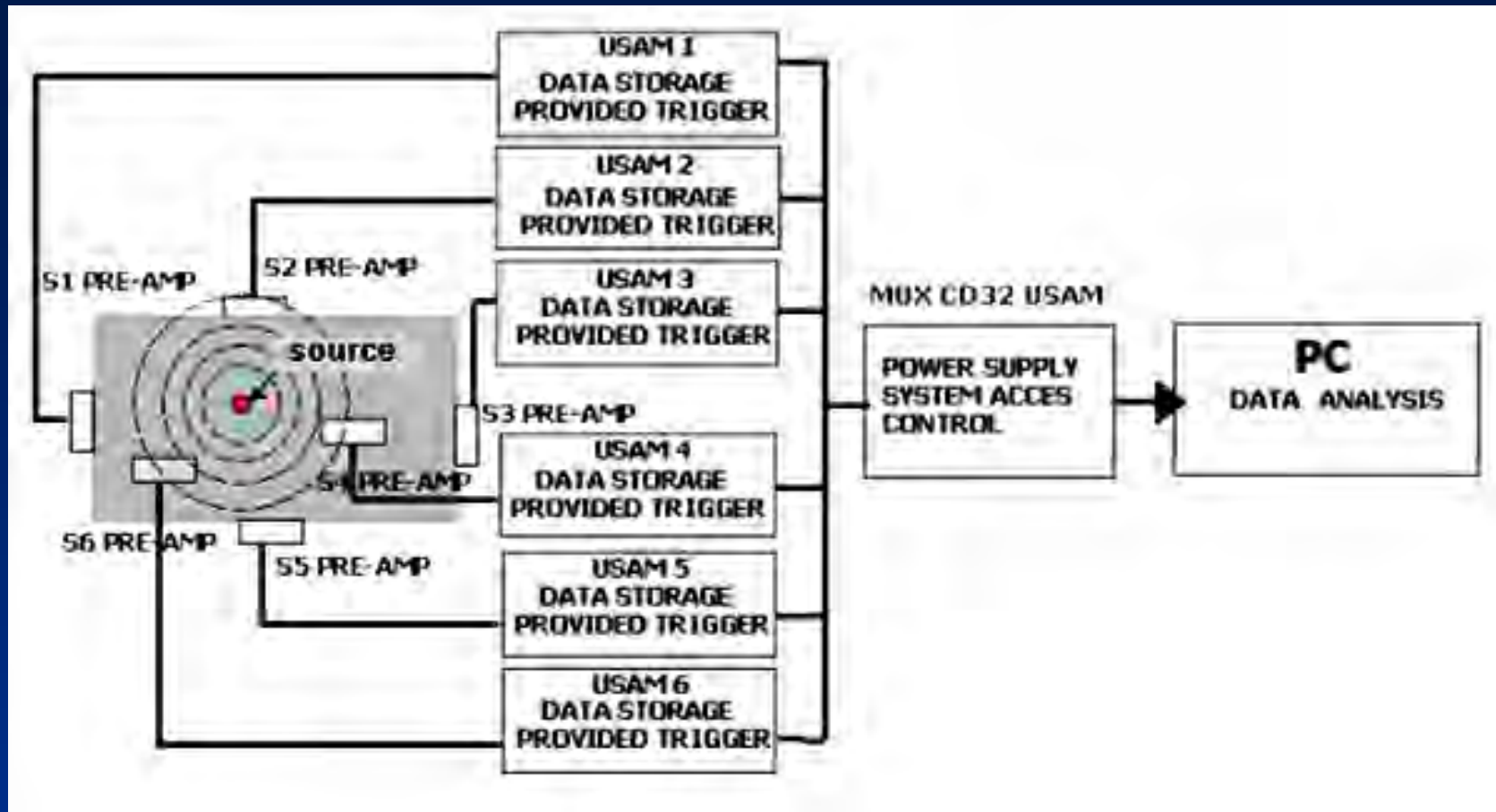
The signal picked up by a transducer is preamplified and transformed into electric voltage.

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.

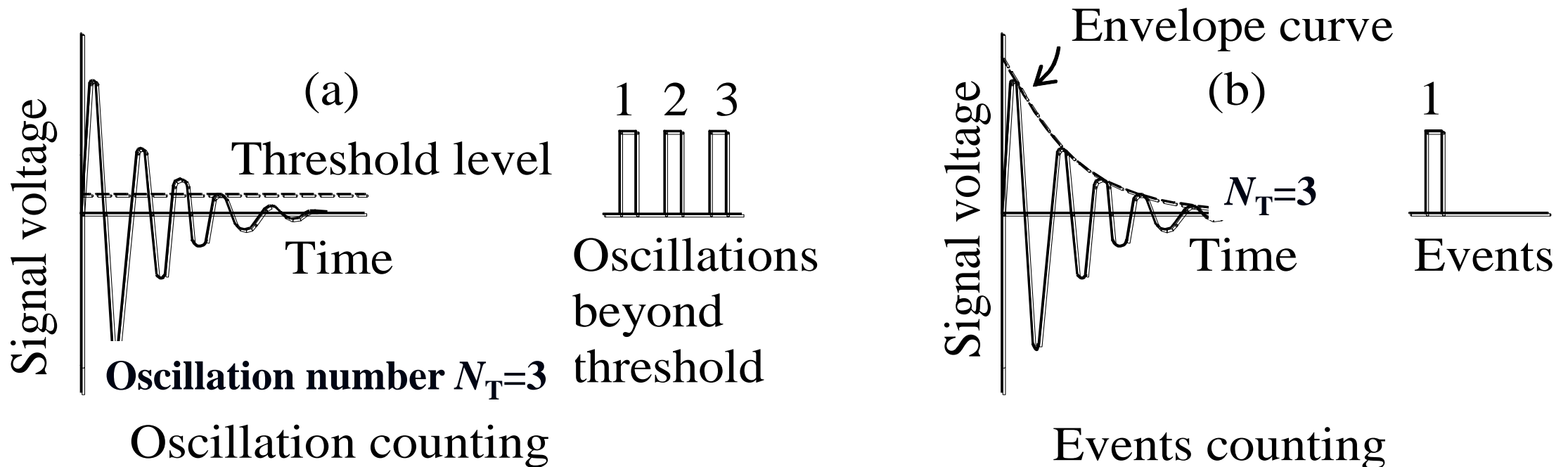
The signal is therefore analysed by a measuring system counting the emissions that exceed a certain voltage threshold measured in volts (V).

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;

β_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

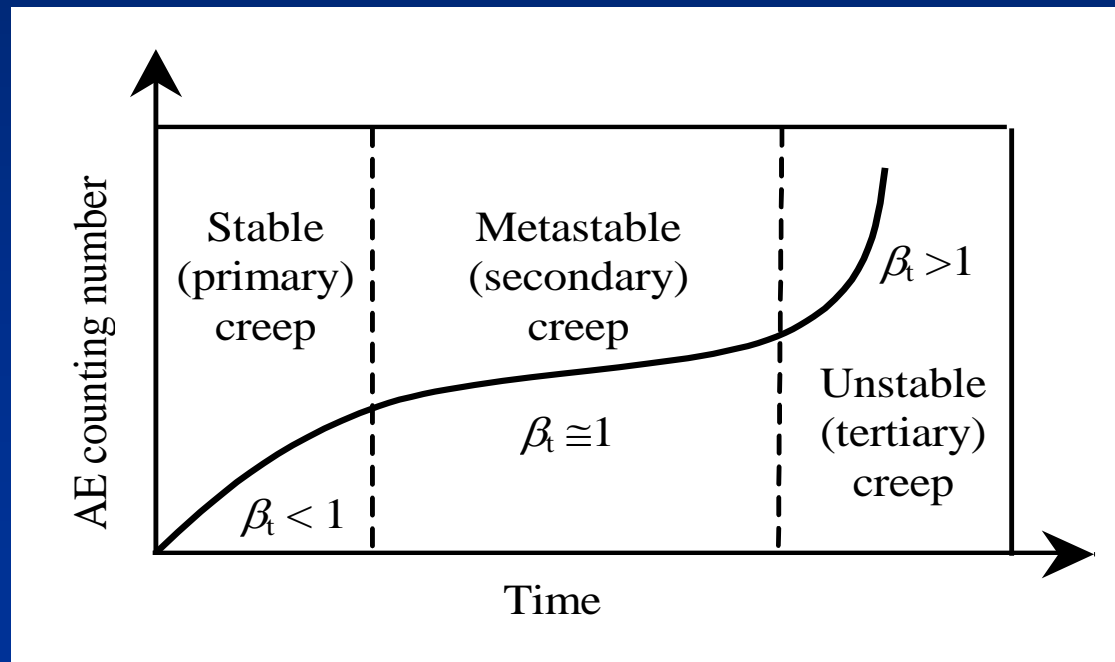
By working out the β_t exponent from the data obtained during the observation period, we can make a prediction on the structure's stability conditions:

$\beta_t < 1$: 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:

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

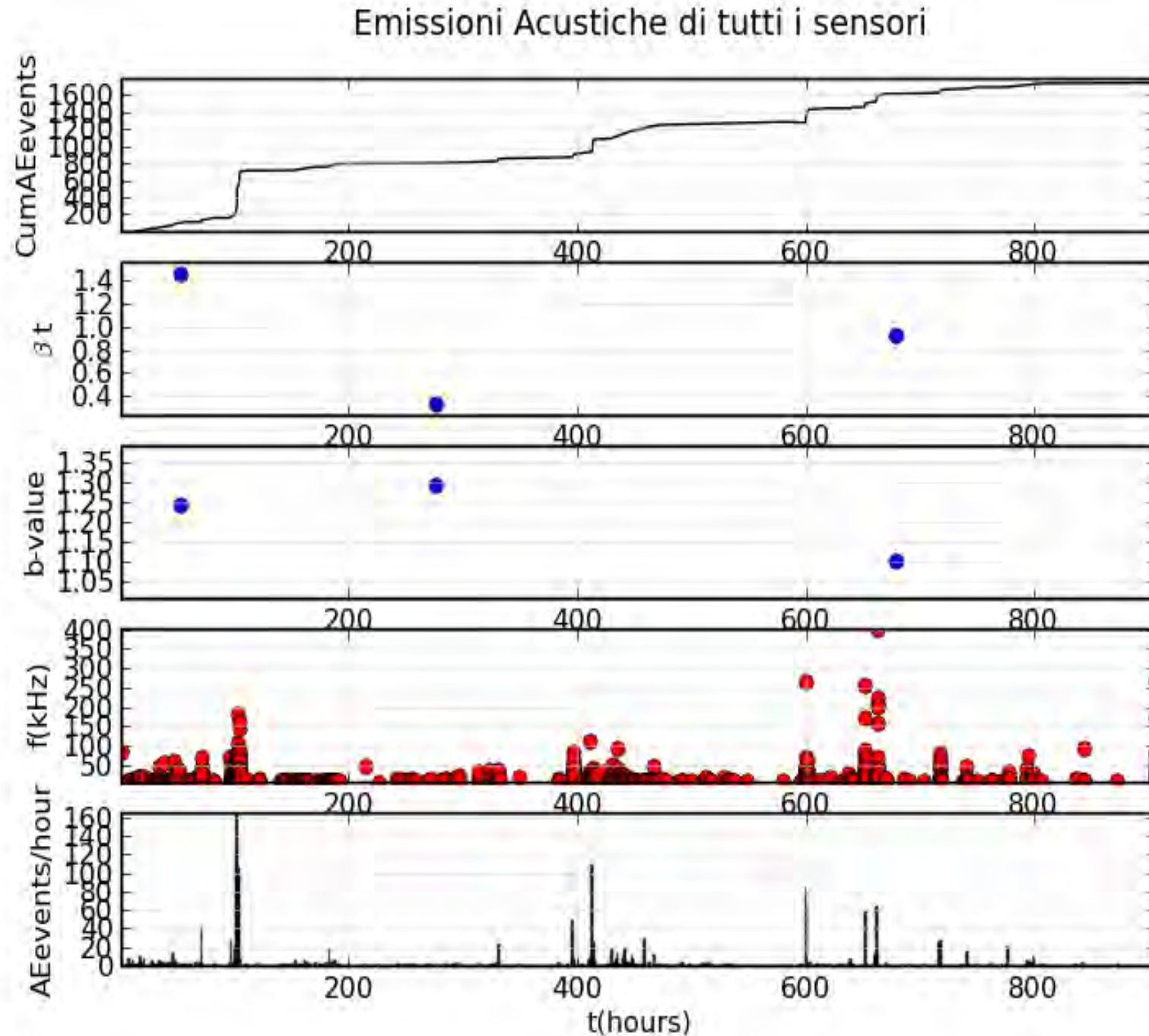
By the *b*-value it is possible to identify the modalities of energy dissipation during the monitoring process. The extreme cases envisaged are:

- $b = 1.5 \rightarrow D = 3$, 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

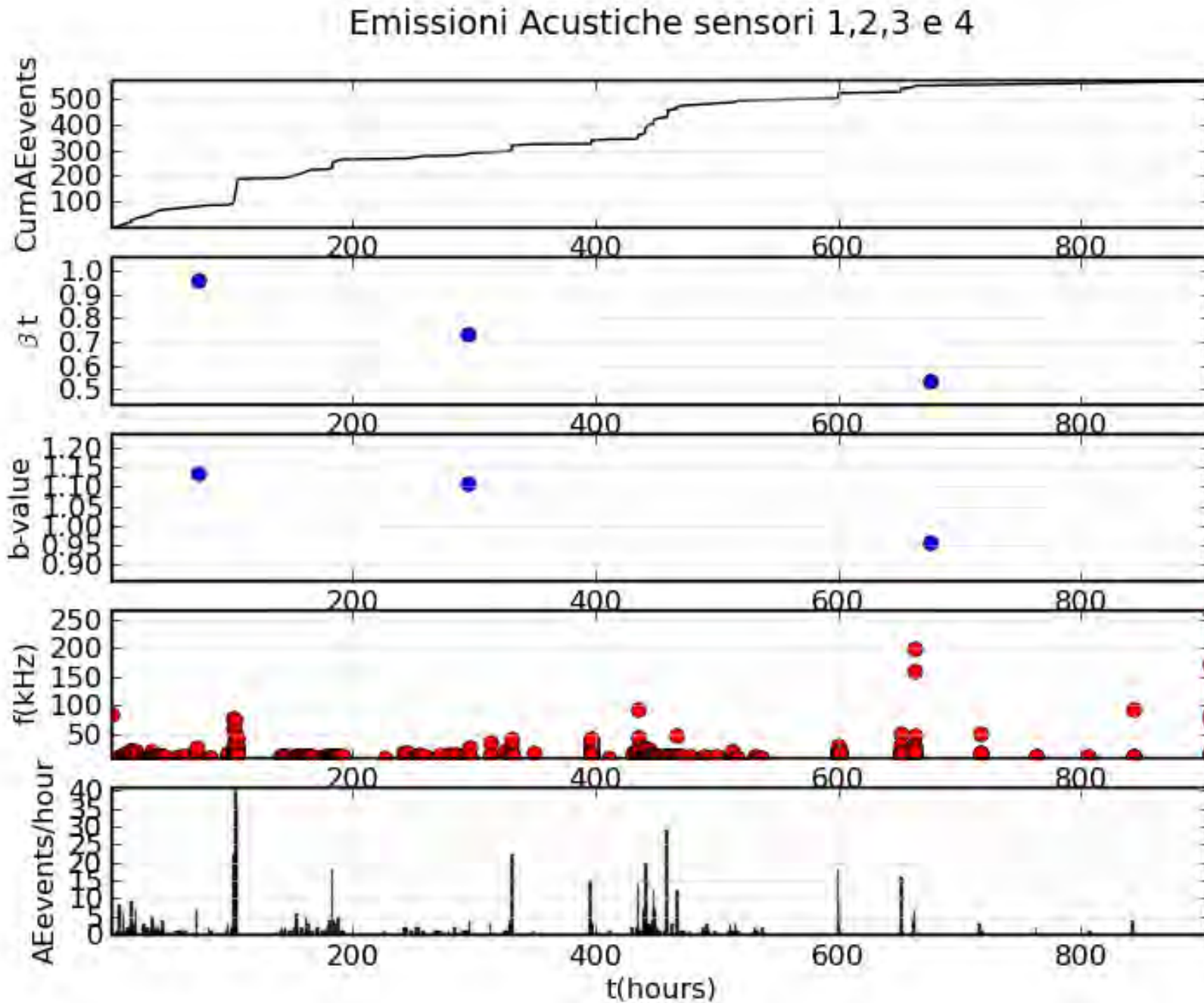


$$0.3 < \beta_t < 1.4$$

$$1.10 < b < 1.30$$

microfratture

Risultati ottenuti dai sensori AE applicati nei pressi della lesione verticale

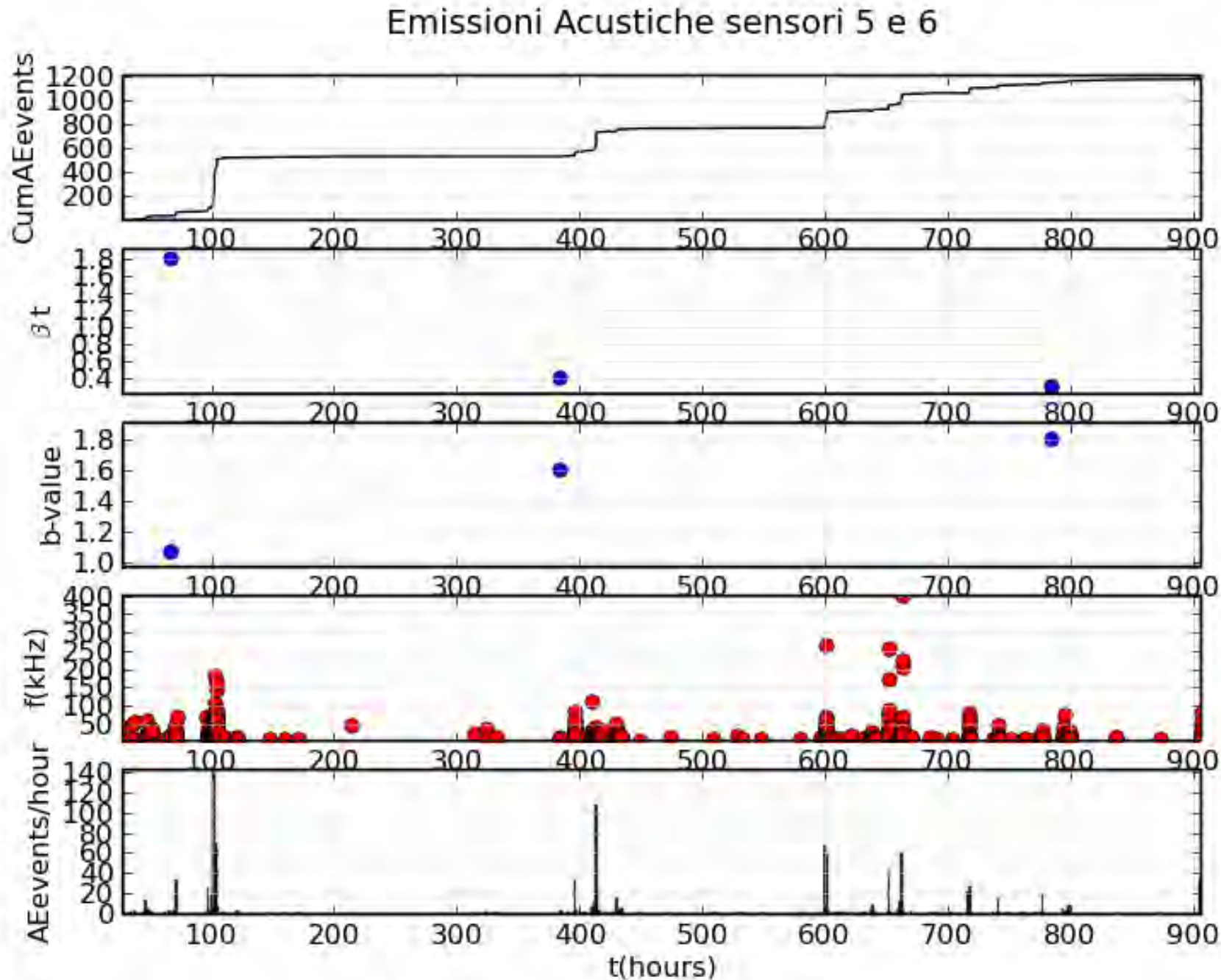


$$0.5 < \beta_t < 1.0$$

$$0.95 < b < 1.15$$

bassa frequenza

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



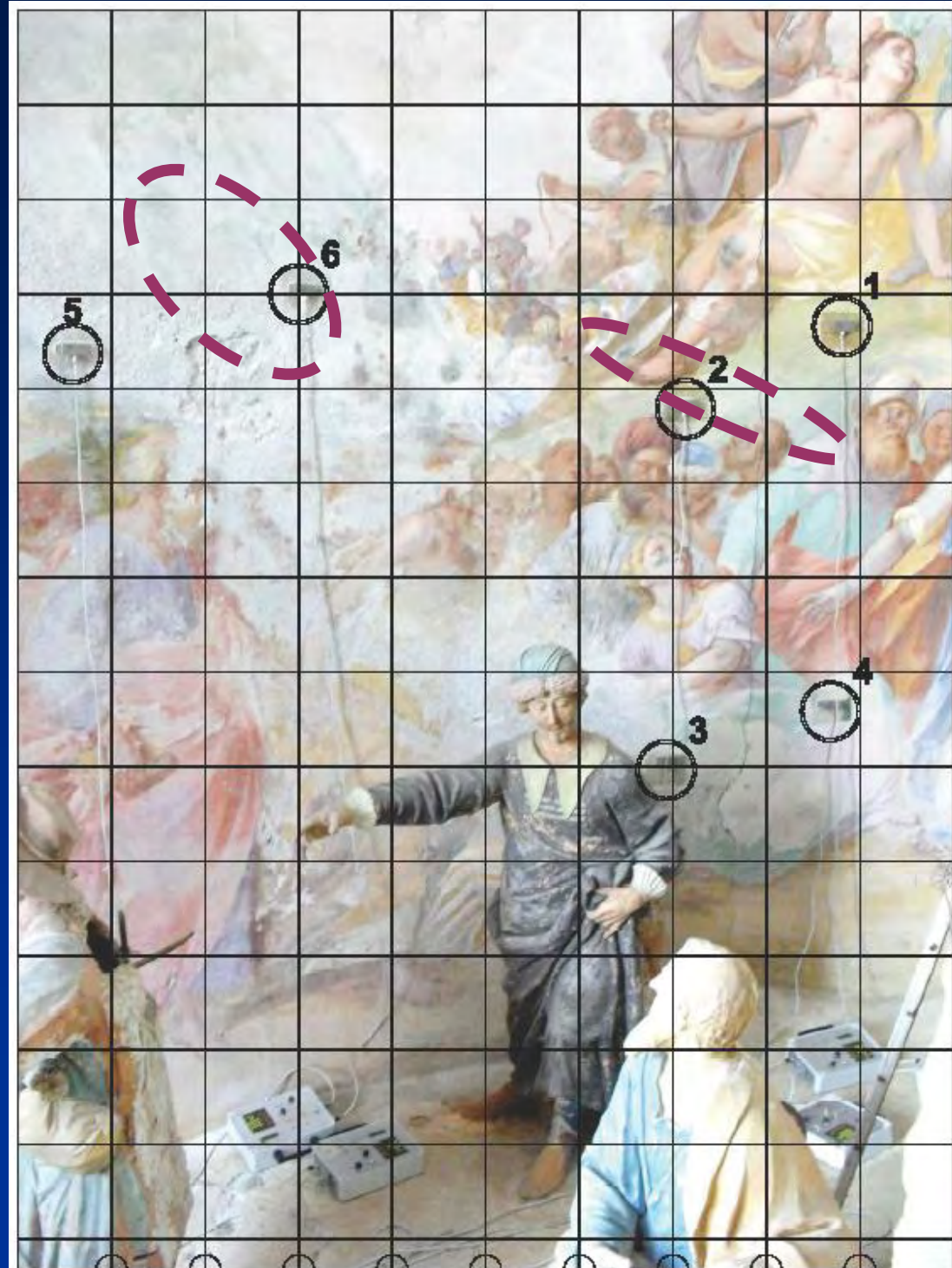
$$0.5 < \beta_t < 1.8$$

$$1.10 < b < 1.80$$

alta frequenza

Numerazione dei sensori e localizzazione delle sorgenti di Emissione Acustica

Regioni di localizzazione dei segnali EA

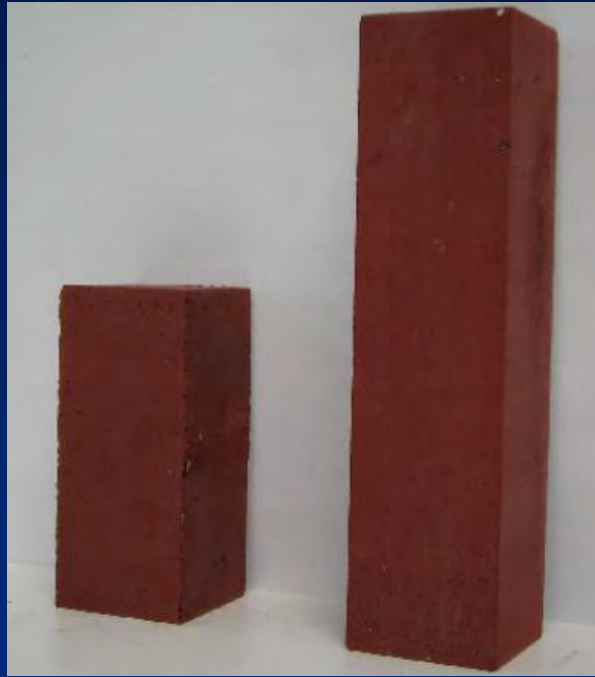


Cappella XVII del Sacro Monte di Varallo

(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

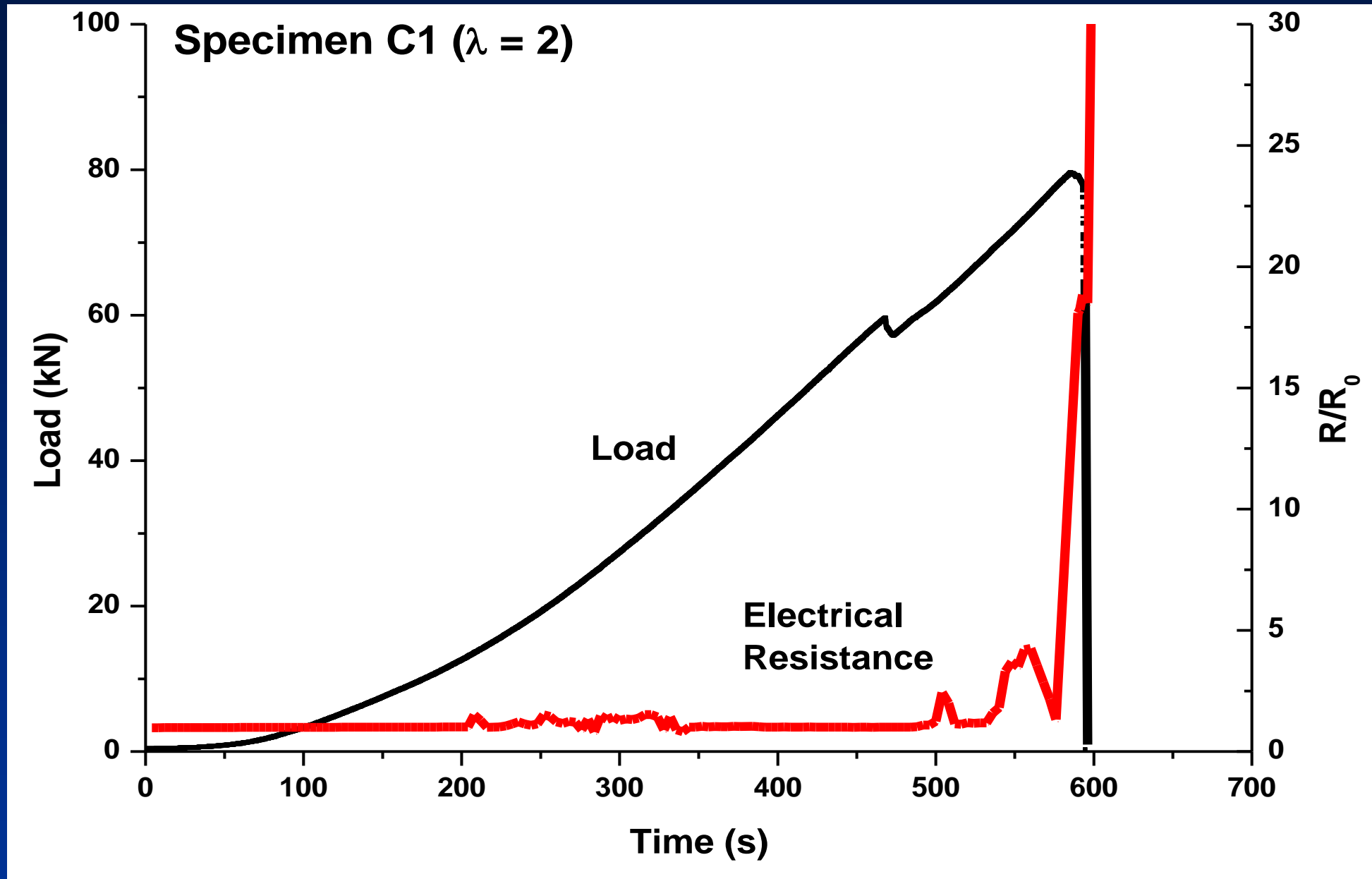
SPECIMEN	MATERIAL	SHAPE	VOLUME [cm ³]	PISTON VELOCITY [m s ⁻¹]
C1	Mortar	Prismatic	4×4×8	2.0×10 ⁻⁶
C2	Mortar	Prismatic	4×4×8	2.0×10 ⁻⁶
C3	Mortar	Prismatic	4×4×16	2.0×10 ⁻⁶
C4	Mortar	Prismatic	4×4×16	2.0×10 ⁻⁶
SPECIMEN	MATERIAL	SHAPE	VOLUME [cm ³]	PISTON VELOCITY [m s ⁻¹]
P5	Green Luserna Granite	Cylindrical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

Experimental setup

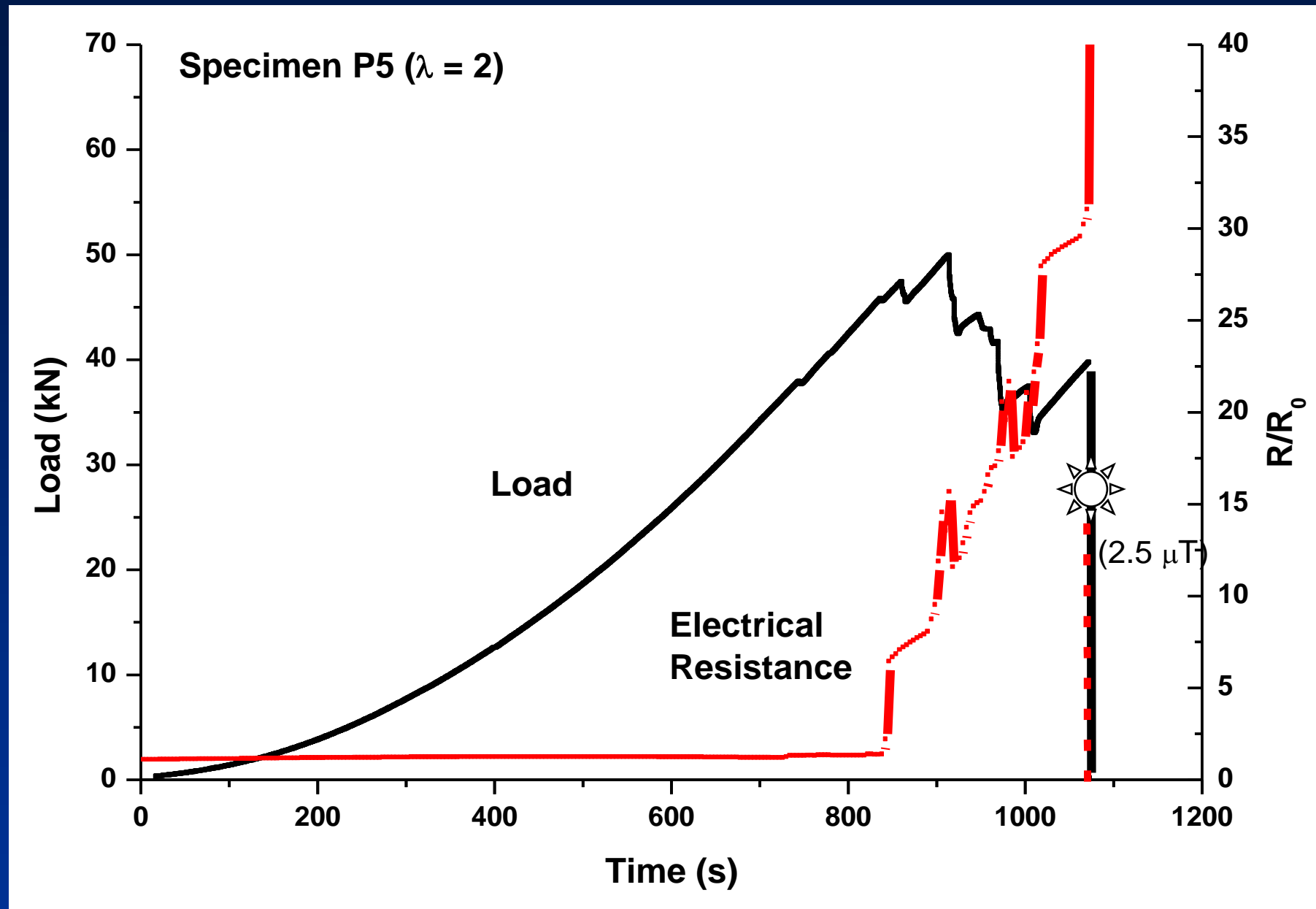


Using an Agilent model 34411A multimeter detector, for all the specimens, at the beginning of each compression test, the initial electrical resistance R_0 was evaluated.

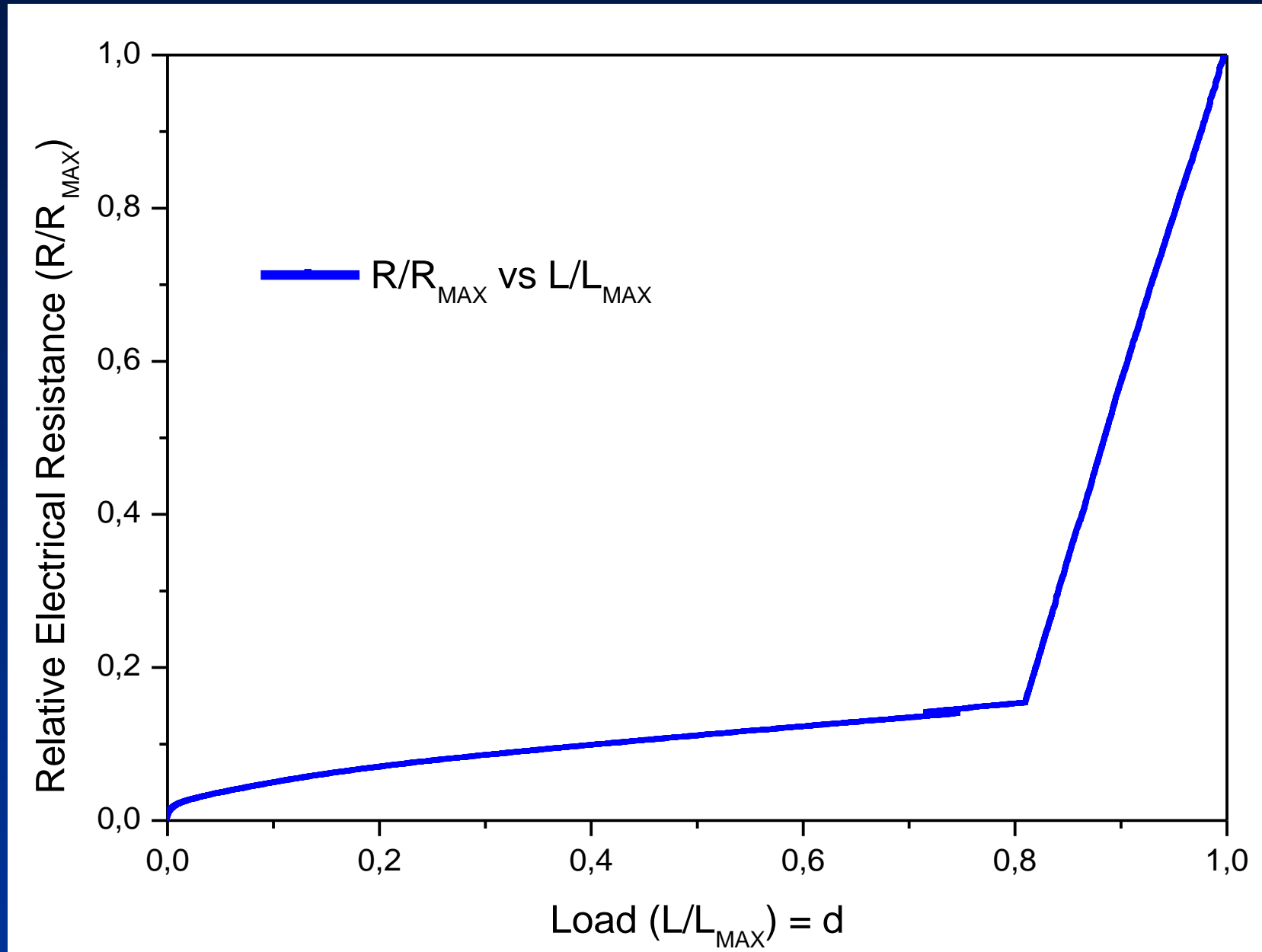
Afterwards the resistance variation R was monitored until the final collapse, calculating the relative ratio R/R_0 .



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



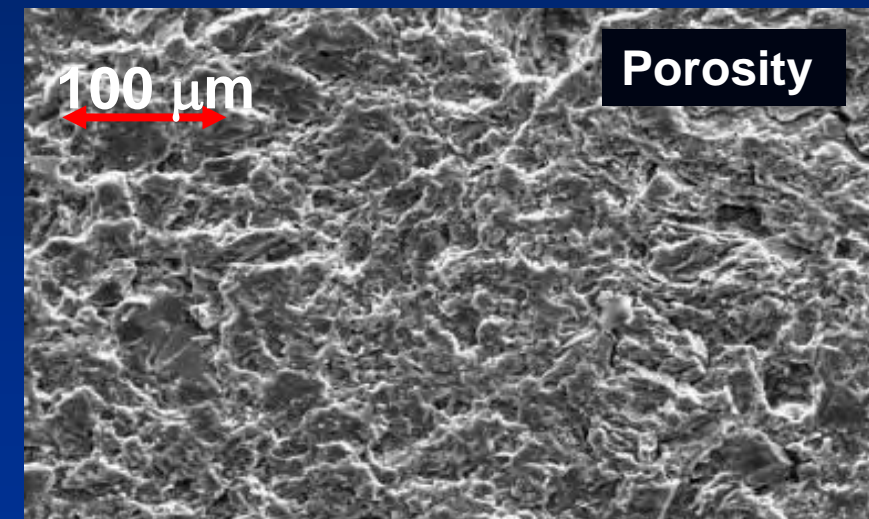
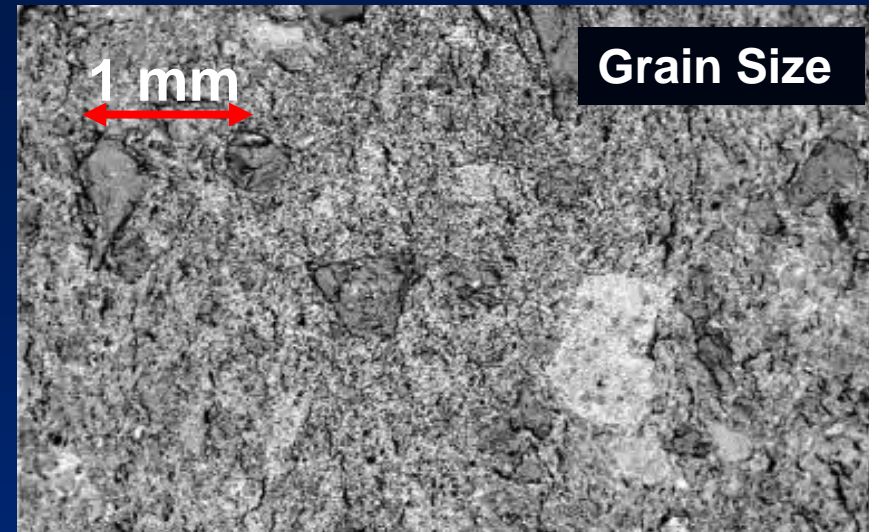
Load vs. time diagram and relative electrical resistance (R/R_0) variation for the cylindrical Green Luserna Granite specimen P5.



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 ₂	57.9
Al ₂ O ₃	15.4
Ca O	14.4
Fe ₂ O ₃	4.9
Ti O ₂	0.4
Mg O	1.4
K ₂ O	4.3
Na ₂ O	1.3



Huon, V., Wattrissea, B., El Youssofia, 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

