

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.

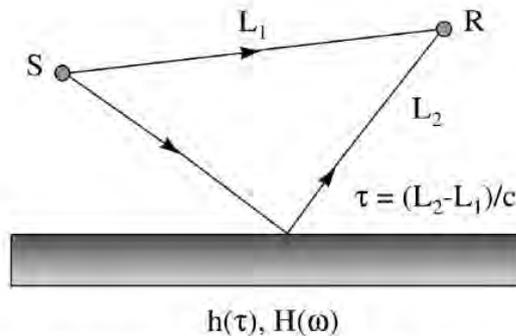


Fig. 1. Acoustic signal source and detector system for the study of surface anomalies.



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.

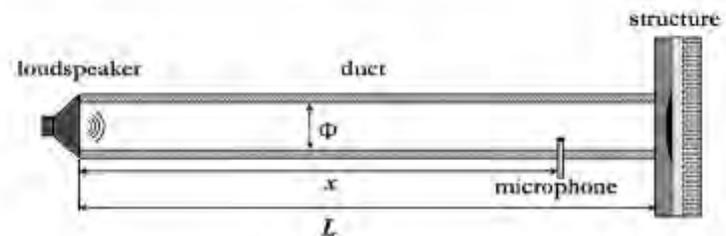
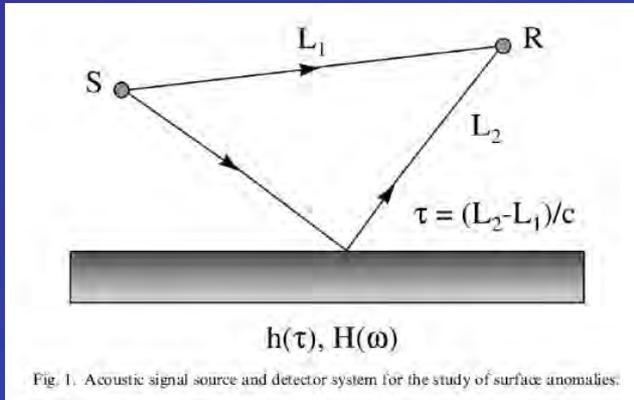
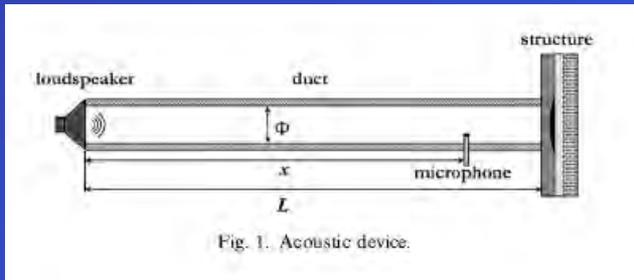


Fig. 1. Acoustic device.

...alcune incongruenze

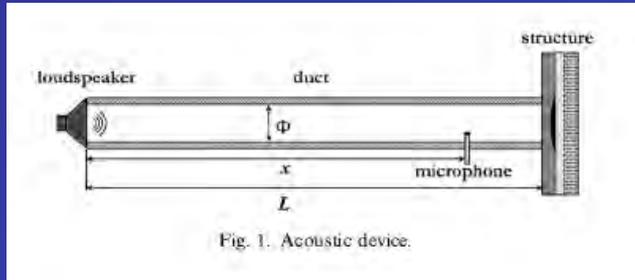


I valori di coefficiente di assorbimento determinati sono risultati poco distinguibili rispetto ai valori attesi (come da letteratura). Dal punto di vista metrologico le differenze tra “intonaco attaccato” e “intonaco staccato” sembrerebbero compresi nell’incertezza di misura (!).

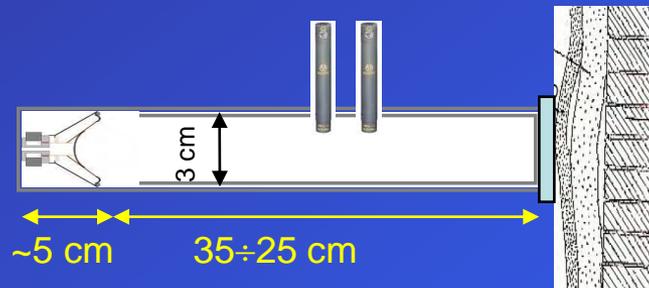


Le dimensioni geometriche del tubo ad onde stazionarie (in particolare lunghezza e diametro) condizionano fortemente la misura, molto più significativamente di quanto desunto sulla base della letteratura, l’analisi delle frequenze utili ci ha consentito di definire le dimensioni corrette.

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.

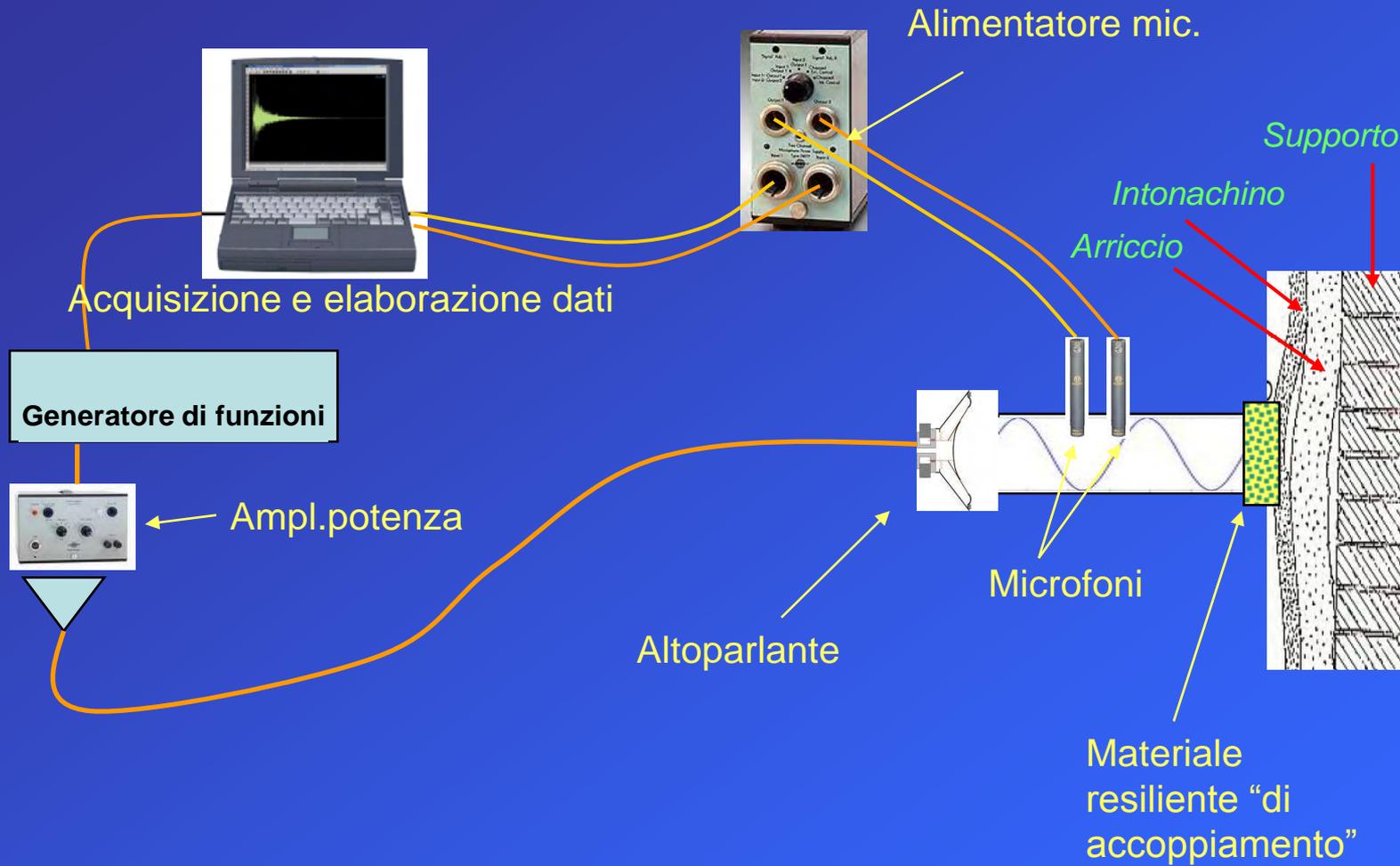
Il primo sistema prevedeva la presenza di un condotto flessibile tra generatore e microfoni, un condotto di circa 7.5 cm di diametro e 50 cm di lunghezza.

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.

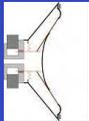
Apparato sperimentale proposto

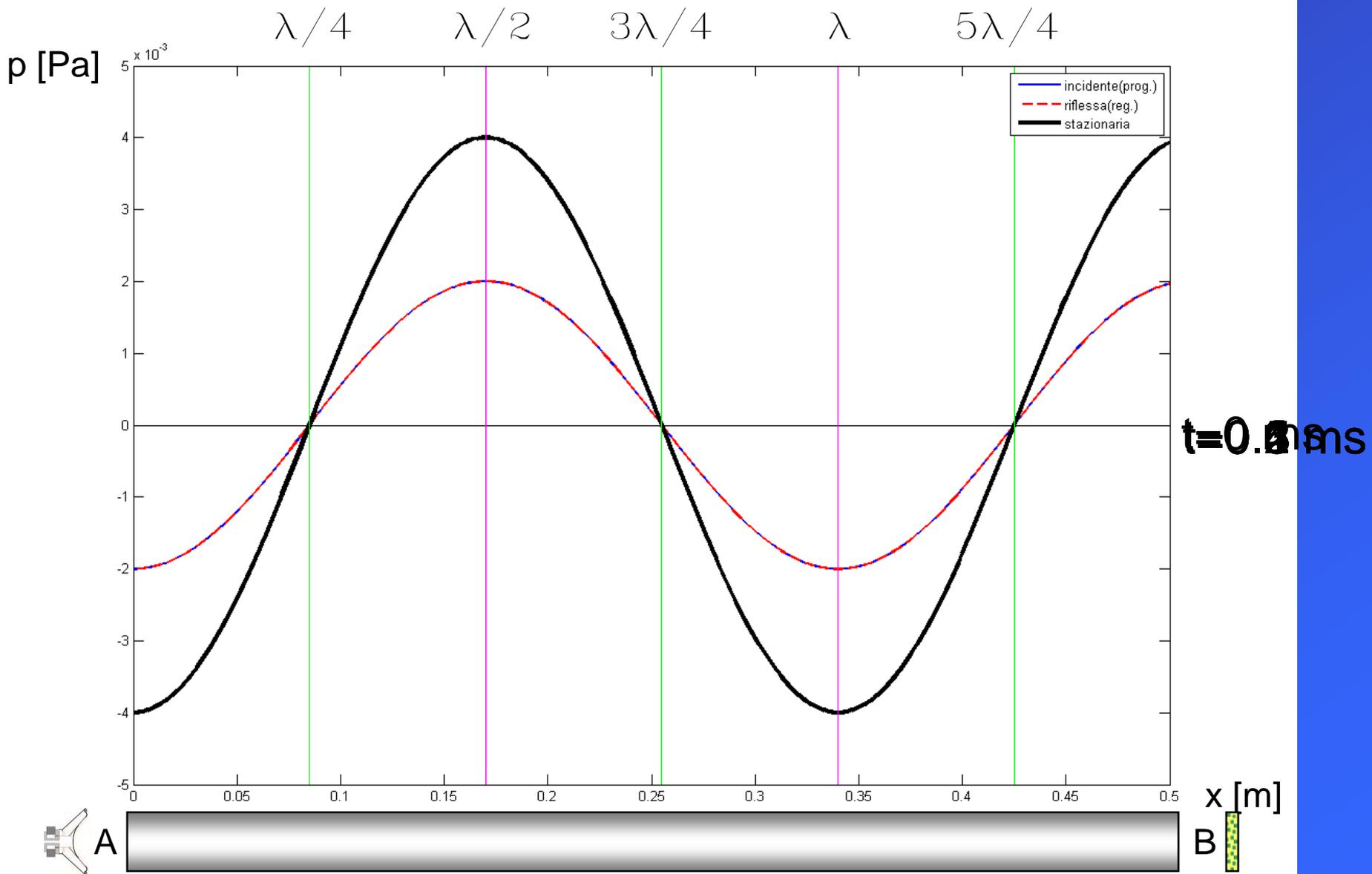


TUBO A ONDE STAZIONARIE (O TUBO DI IMPEDENZA)

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.



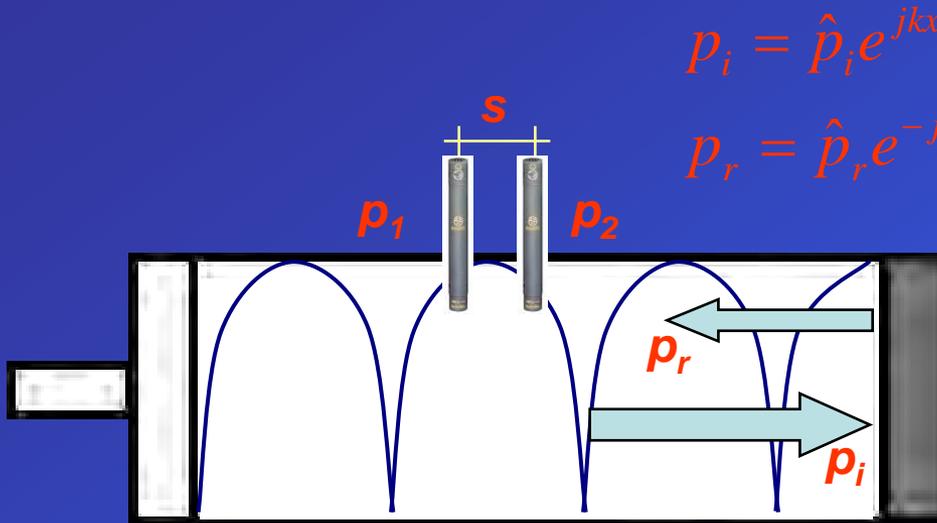


$f = 1000 \text{ Hz}$;
 $c = 340 \text{ m/s}$;
 $A = 0.002 \text{ Pa}$;
 $\lambda = c/f = 0.34 \text{ m}$.

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

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

Basi teoriche del principio



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

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

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

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

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

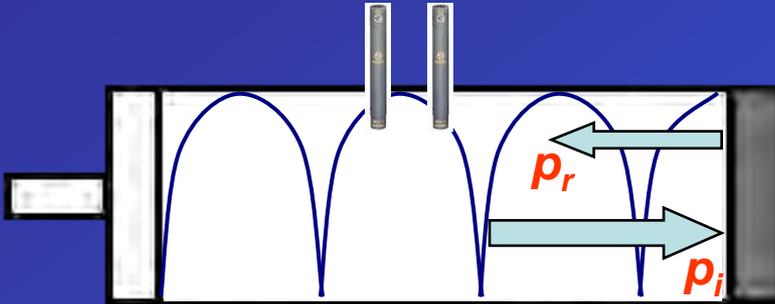
$$H_i = \frac{p_{2i}}{p_{1i}} = e^{-jk(x_2 - x_1)} = e^{-jks}$$

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

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

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

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.

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

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

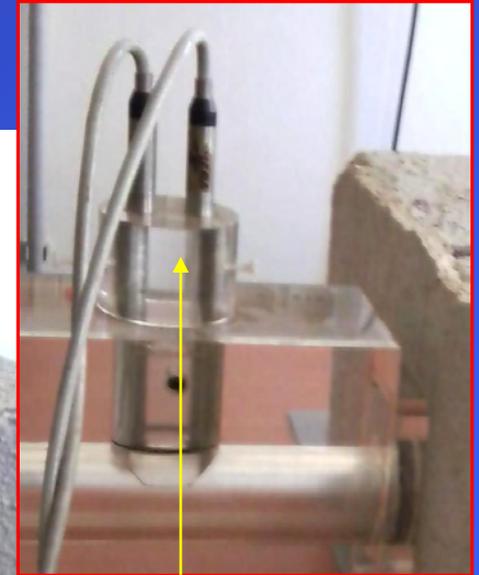
Coefficiente di assorbimento
acustico per incidenza normale

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

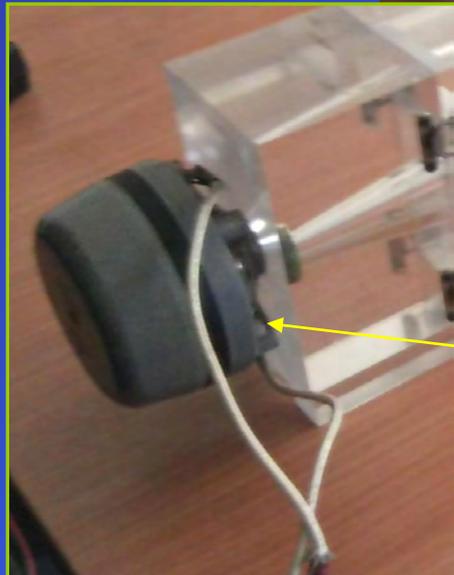
Impedenza acustica specifica

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

(RI) ALLESTIMENTO DELL'APPARATO DI LABORATORIO

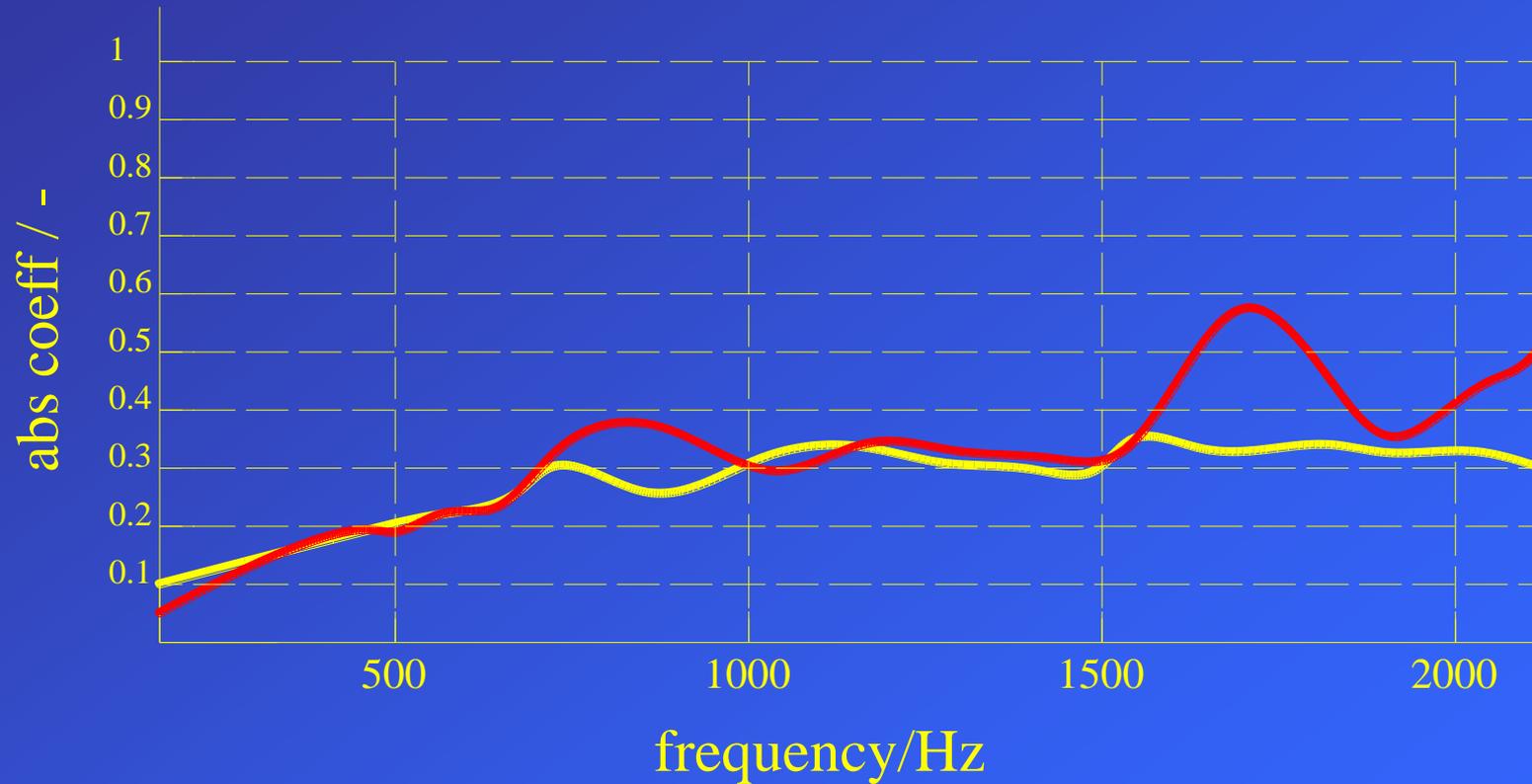


Microfoni 1/4"



Compression Driver

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 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

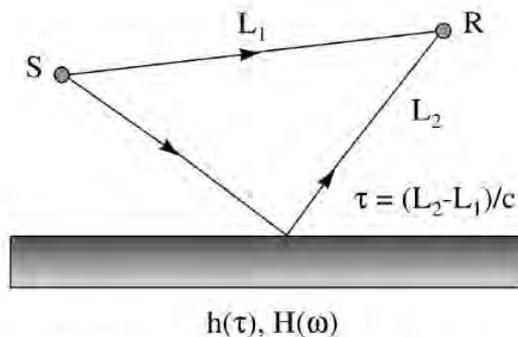
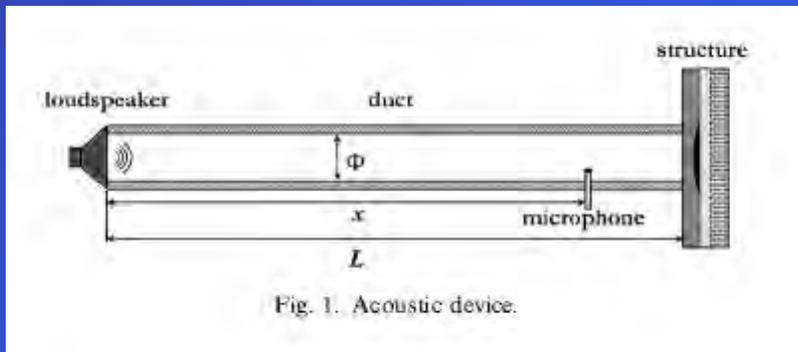


Fig. 1. Acoustic signal source and detector system for the study of surface anomalies.

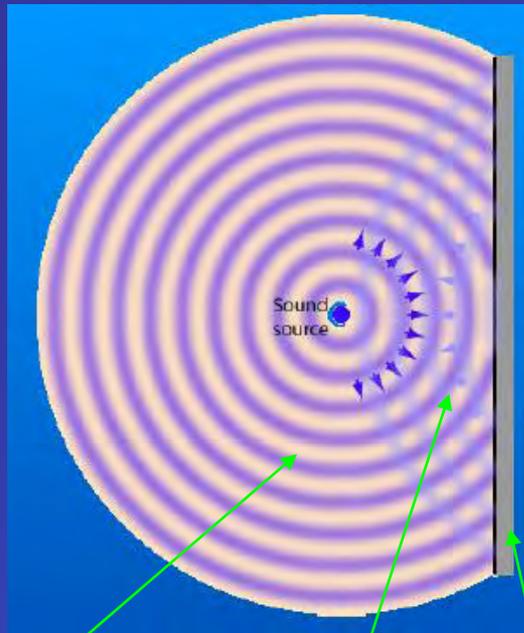
Questo metodo, che fornisce molte informazioni fisico-meccaniche, non è applicabile perchè la sorgente **S** e il ricevitore **R** devono essere collocati in campo libero; nel nostro caso la presenza delle statue nel campo crea riflessioni multiple.

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



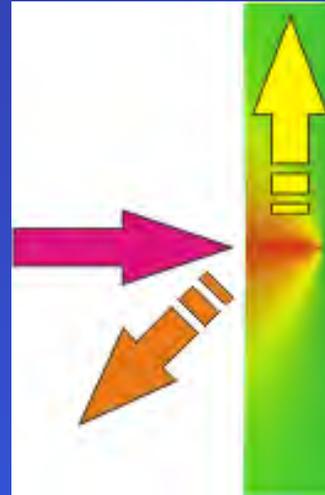
Energia
incidente



Energia
riflessa



Energia
Assorbita



ASSORBIMENTO ACUSTICO

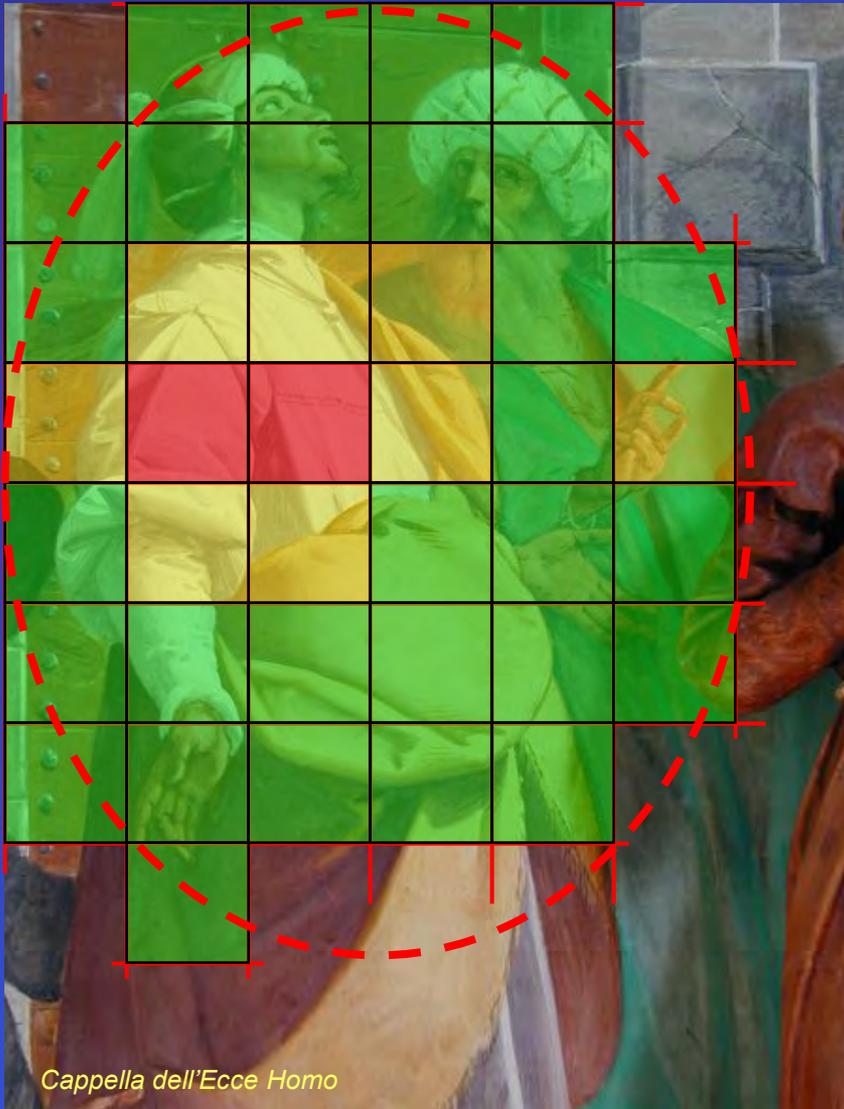
- Assorbimento per porosità
- Assorbimento per risonanza di cavità
- Assorbimento per risonanza di membrana

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

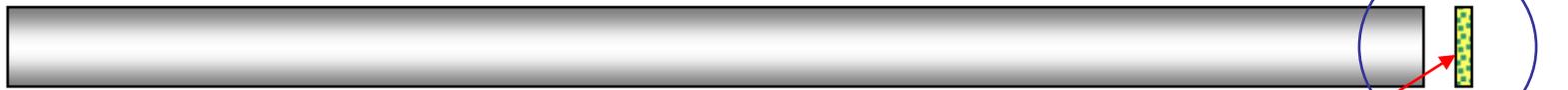
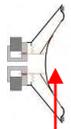
Esempio: Tecnica di intervento



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"



$x=0$

$x=l$ x [m]

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

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

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

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

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

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

$$d = l - x$$

$$\Phi_l = \Phi_0 + ikl$$

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

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

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

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

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

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

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

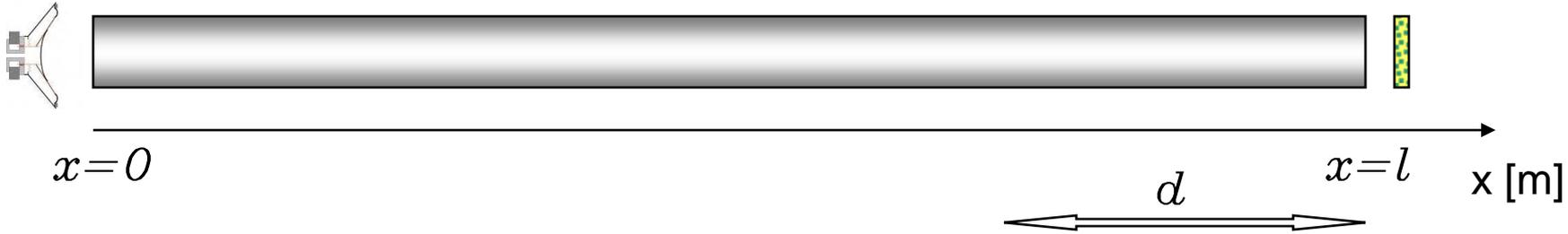
$$z_l = \left(\frac{p}{u}\right)_l = \rho c \zeta_l = \rho c(\vartheta - i\chi)$$

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

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:



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

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

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

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

Per misurare l'impedenza ζ_1 :

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

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

Il valore di α_l 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 α , λ , d_{\max})

Con α_l e β_l 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