

VII Workshop di Geofisica - Rovereto 10 Dicembre 2010

Geofisica e Microgeofisica:: strumenti per l'approccio e la risoluzione di problematiche non standard



**TECNICHE INNOVATIVE
DI MICROGEOFISICA
PER LO STUDIO ED
IL MONITORAGGIO
DEI BENI CULTURALI**



Pietro L. Cosentino

Dipartimento CFTA - Università di Palermo

e-mail: pietro.cosentino@unipa.it

La Microgeofisica

La microgeofisica è una disciplina il cui nome è entrato da pochi anni nel gergo di alcuni geofisici.

Essa comprende alcune metodologie della geofisica applicata, miniaturizzate ed adattate per essere applicate su piccola scala, a profondità più o meno limitate e (spesso) con una atipica geometria esterna del corpo da indagare (cioè non piana, come il suolo).

Questa disciplina si applica in vari campi di studi, tra i quali:

- ❑ Beni culturali: archeologici, monumentali, ecc.
- ❑ Ingegneria: edile, stradale, delle infrastrutture, ecc.
- ❑ Ambiente: inquinamento dei suoli, zone vadose, discariche, ecc.
- ❑ Botanica: studio di alberi, apparati radicali, ecc.

Per esempio:

- ❑ **Struttura e forma delle fondazioni**
- ❑ **Lesioni interne e stato del degrado (murature e strutture lignee)**
- ❑ **Limiti di zone di inquinamento nei suoli e nelle falde idriche**
- ❑ **Studio strutturale e del degrado di colonne, alberi, ecc.**

La Microgeofisica: metodologie

La microgeofisica utilizza nelle indagini prevalentemente metodologie tomografiche 2D o 3D.

La microgeofisica utilizza per le indagini sia campi di potenziale (elettrici e magnetici) sia campi d'onda (soniche, ultrasoniche ed elettromagnetiche).

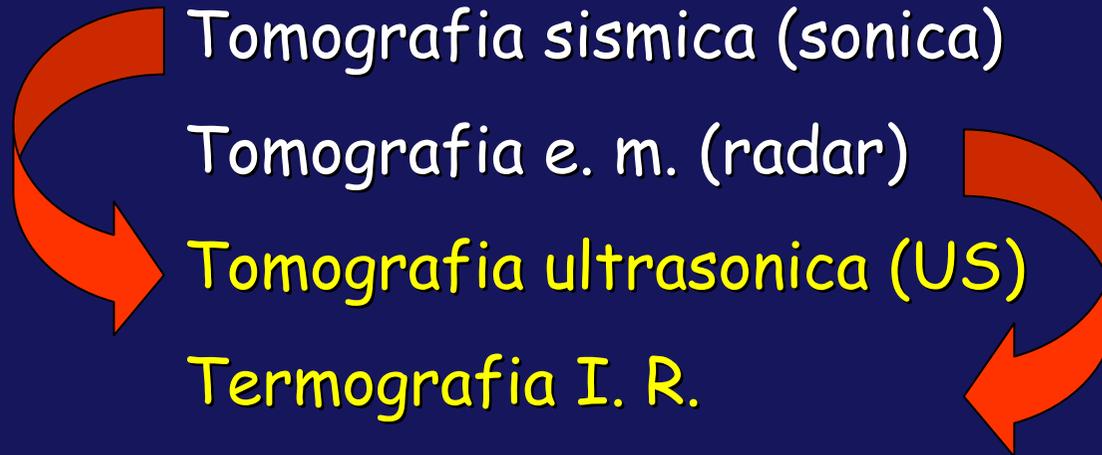
Tomografia elettrica c.c.

Tomografia sismica (sonica)

Tomografia e. m. (radar)

Tomografia ultrasonica (US)

Termografia I. R.



Che cosa è la Microgeofisica?

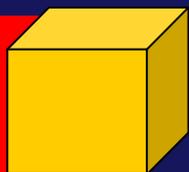
Metodologie: derivate dalla Geofisica

Applicazioni su: Manufatti Lapidei, ma anche su legni, materiali sintetici, metallici, ecc.

GEOFISICA

MICRO-GEOFISICA

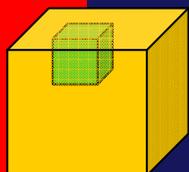
Dimensioni dei manufatti Indagati



da molti metri cubi all'"infinito"

da pochi decimetri cubi a pochi metri cubi

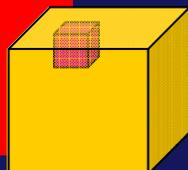
Volumi coinvolti nelle misure



da pochi metri cubi a centinaia di metri cubi

da pochi centimetri cubi a pochi metri cubi

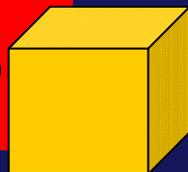
Risoluzione tipica



da pochi decimetri a molti metri

da pochi centimetri a pochi decimetri

Punto di vista tipico



Dalla sommità dei manufatti (superficie terrestre)

Da molte facce dei manufatti

Che cosa è la Microgeofisica?

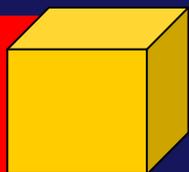
Metodologie: derivate dalla Geofisica

Applicazioni su: Manufatti Lapidari, ma anche su
materiali sintetici, metalli

GEOFISICA **GEOFISICA**

**Non distruttive,
poco o niente invasive**

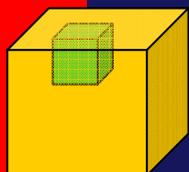
**Dimensioni dei
manufatti Indagati**



*da molti metri cubi
all'"infinito"*

*da pochi decimetri cubi a
pochi metri cubi*

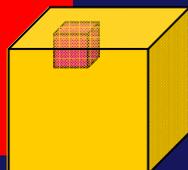
**Volumi coinvolti
nelle misure**



*da pochi metri cubi a
centinaia di metri cubi*

*da pochi centimetri cubi
a pochi metri cubi*

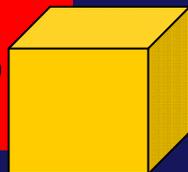
Risoluzione tipica



*da pochi decimetri a
molti metri*

*da pochi centimetri a
pochi decimetri*

Punto di vista tipico



*Dalla sommità dei
manufatti (superficie
terrestre)*

*Da molte facce dei
manufatti*

Come entra la Microgeofisica nel quadro delle indagini tecniche?

GEOFISICA

MICROGEOFISICA

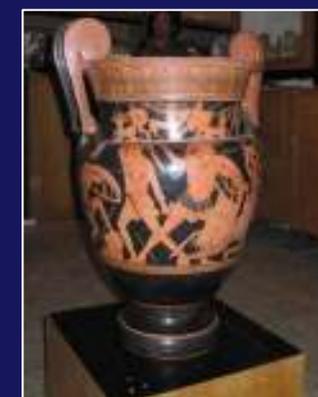
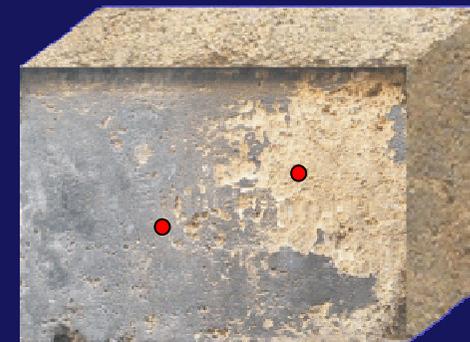
Analisi
chimiche e
microscopiche

Metodi NDT
per
l'ingegneria

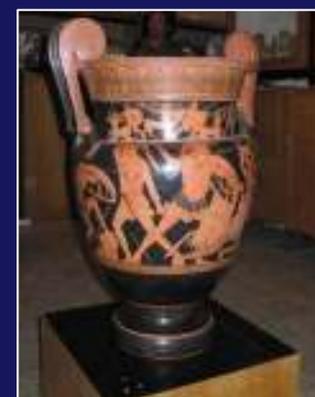
Come entra la Microgeofisica nel quadro delle indagini tecniche?



Microgeofisica



Microgeofisica



dalla Geofisica alla Microgeofisica

Hardware

Software

Maggiore densità
di campionamento

Miniaturizzazione delle
sorgenti e dei ricevitori

Miglioramento e
velocizzazione
dell'acquisizione

Metodi a campi
d'onda

Aumento del numero di
sorgenti e ricevitori

Aumento delle frequenze

Processing

Miglioramento e
velocizzazione dei
programmi di inversione

Obiettivo: maggiore risoluzione

Principali strumenti iniziali



Protovale Elcometer



Flir P40 Thermocamera



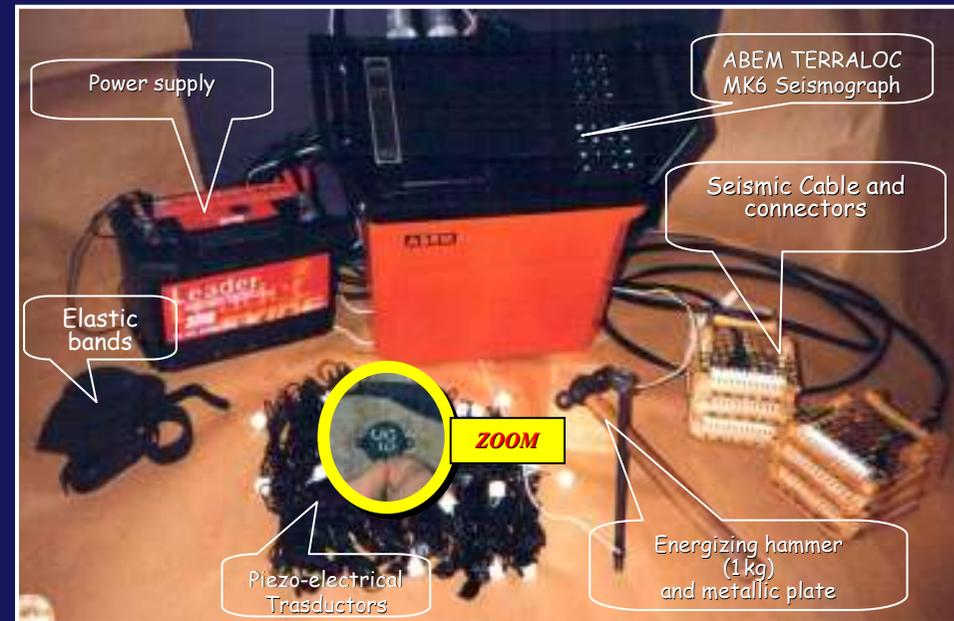
ERT MRS-256 GF Instruments



Boviar Multichannel Ultrasonic System



Ground Penetrating Radar GSSI SIR 3000



Sonic 48-channel System (micro-tomography)

Principali strumenti iniziali



Inserti metallici

Protovale Elcometer

Differenze nei materiali

Inserti superficiali

Caratterizzazione

Flir P40 Thermocamera



Zone umide

Fratture

Degrado

ERT MRS-256 GF Instruments



Degrado meccanico

Fratture



Boviar Multichannel Ultrasonic System



Fratture

Inserti

Cavità Interne

Ground Penetrating Radar GSSI SIR 3000



Power supply

ABEM TERRALOC MK6 Seismograph

Seismic Cable and connectors

Elastic bands

Analisi Spettrale

Caratterizzazione

Degrado meccanico

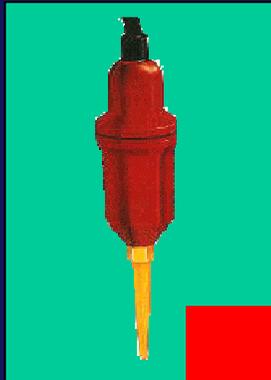
Fratture

Piezo-electrical Transducers

Energizing hammer (1kg) and metallic plate

Sonic 48-channel System (micro-tomography)

Sorgenti e ricevitori miniaturizzati



Cut-off frequency
larger than 6 kHz

Sonica

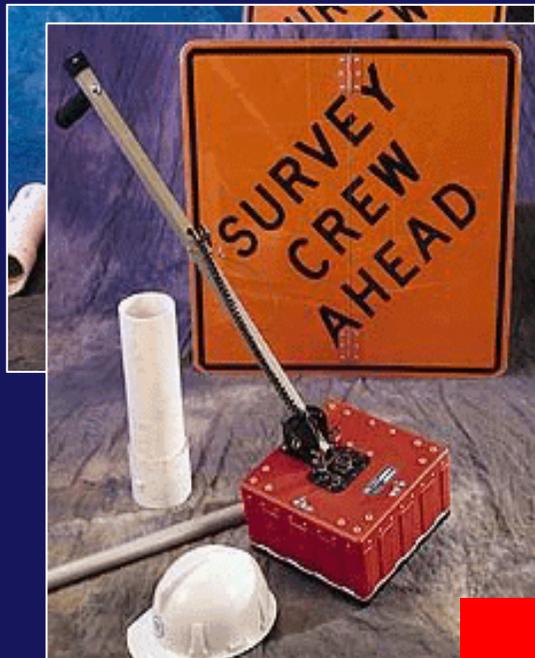


Engineering
(Concrete, etc.)



Disposable ECG electrodes
Wall contact resistance
5-10 M Ω

ERT



200 MHz

400 MHz



Diameter
4.5 cm

Ultrasuoni



Diameter
1 cm



1000 MHz
1500 MHz

Radar



Split antenna
1600 MHz

Microgeofisica ad alta risoluzione

Principali metodologie finalizzate allo studio ed alla caratterizzazione di materiali usati in Ingegneria civile (rocce, cemento , ecc.)

Principali obiettivi: rilevamento di strati sottili (patine e film esterni ed interni, strati di carbonatazione, ossidazione, fratture, fessure, ecc.)

➤ **Metodologie a campi d'onda, sia in modalità trasmissione sia in riflessione:**

- Tomografia multicanale sonica ed ultrasonica (0 - 80 kHz)
- Tomografia elettromagnetica ad alta-frequenza (900 MHz - 2 GHz)
- Termografia IR

➤ **Metodologie a campi di potenziale:**

- Potenziali spontanei, Resistività e Polarizzazione Indotta
- ERT multicanale (c.c. o frequenza bassa)

➤ **Microscopia elettronica ed analisi strutturale**

Microgeofisica ad alta risoluzione

Principali metodologie finalizzate allo studio ed alla caratterizzazione di materiali usati in Ingegneria civile (rocce, cemento , ecc.)

Principali obiettivi: rilevamento di strati sottili (patine e film esterni ed interni, strati di carbonatazione, ossidazione, fratture, fessure, ecc.)

➤ **Metodologie a campi d'onda, sia in modalità trasmessa sia in riflessione:**

- Tomografia multicanale sonica ed ultrasonica (0 - 80 kHz)
- Tomografia elettromagnetica ad alta-frequenza (900 MHz - 2 GHz)
- Termografia IR

Analisi cinematica e dinamica dei segnali

➤ **Metodologie a campi di potenziale:**

- Potenziali spontanei, Resistività e Polarizzazione Indotta
- ERT multicanale (c.c. o frequenza bassa)

Corrente continua o a bassa frequenza

➤ **Microscopia elettronica ed analisi strutturale**

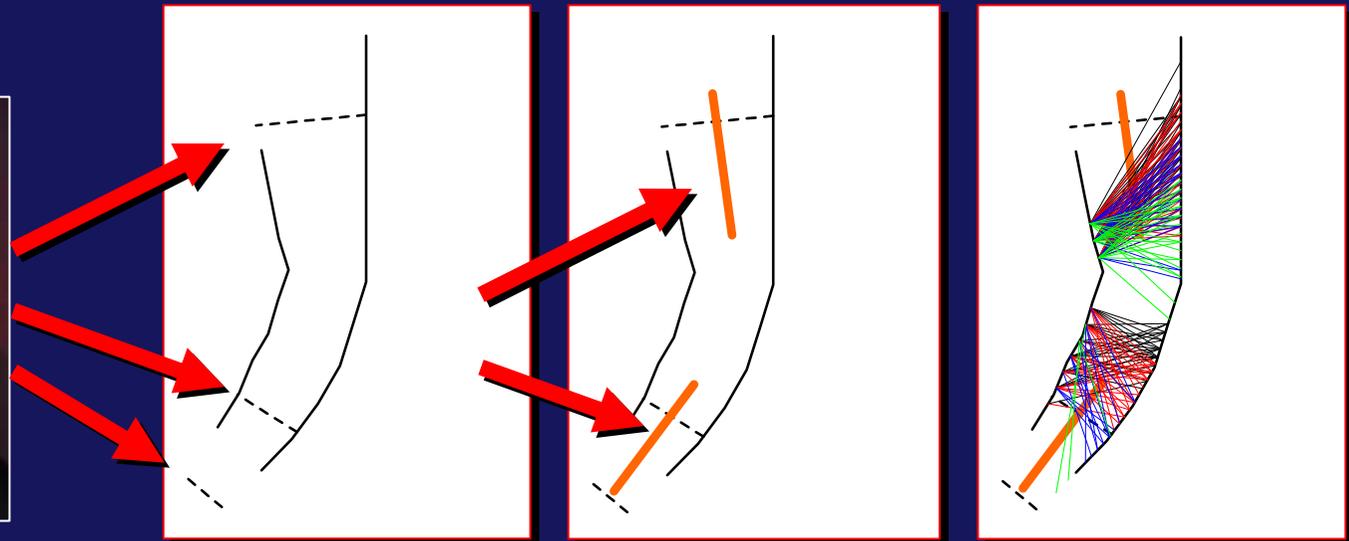
Venere "anadiomene" (P. Orsi Museum, Siracusa)



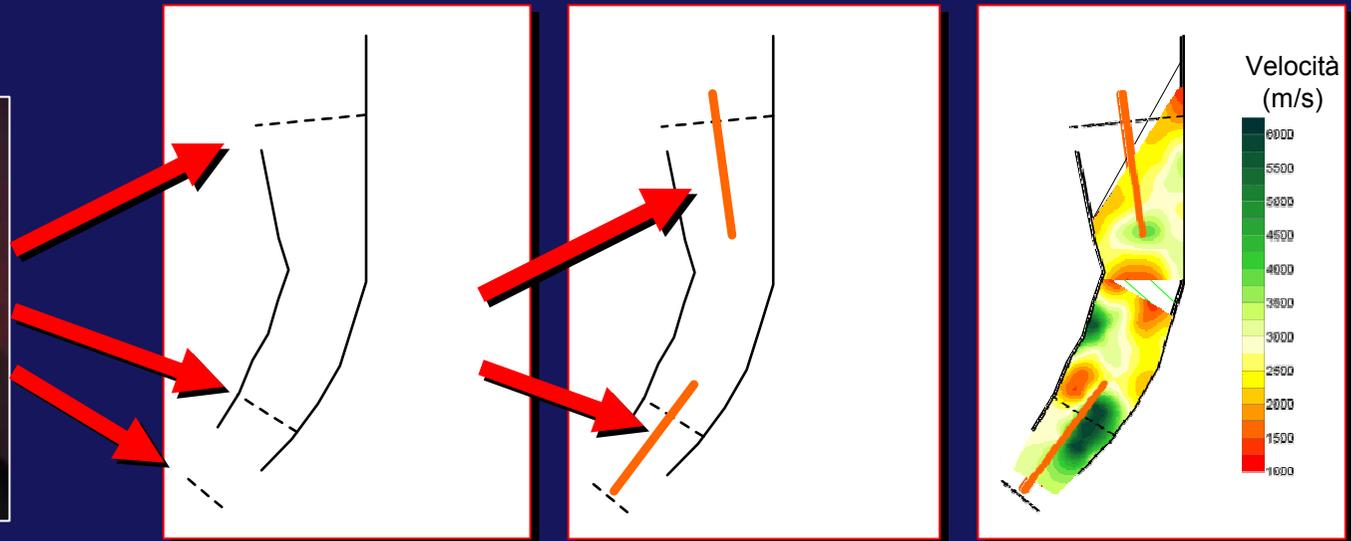
Venere "anadiomene" (P. Orsi Museum, Siracusa)



Venere "anadiomene" (P. Orsi Museum, Syracuse)



Venere "anadiomene" (P. Orsi Museum, Syracuse)



Venere "anadiomene" (P. Orsi Museum, Syracuse)



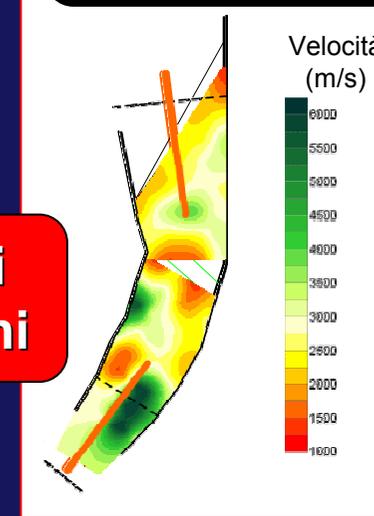
**Tomografia
cinematica**



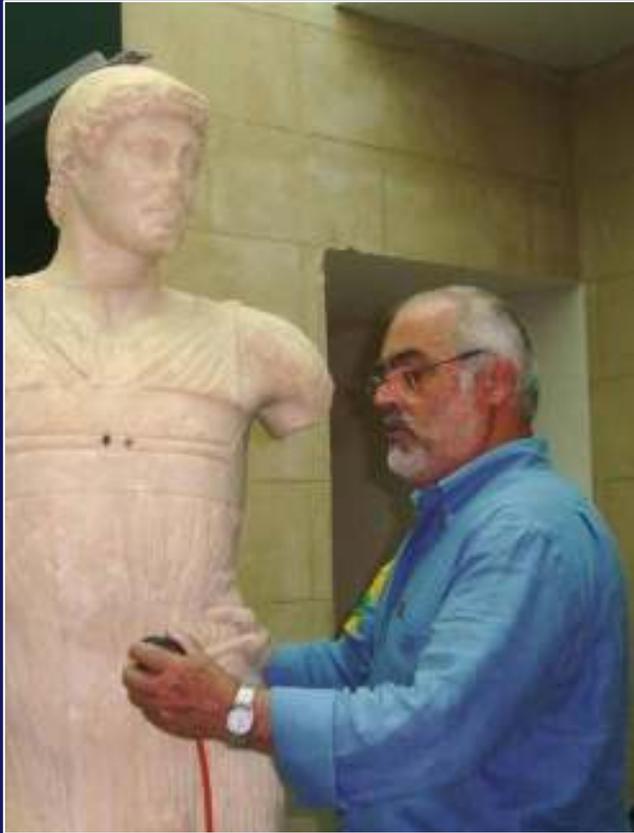
**Linee di
frattura**

**Posizione e
dimensioni inserti
metallici
(pacometro)**

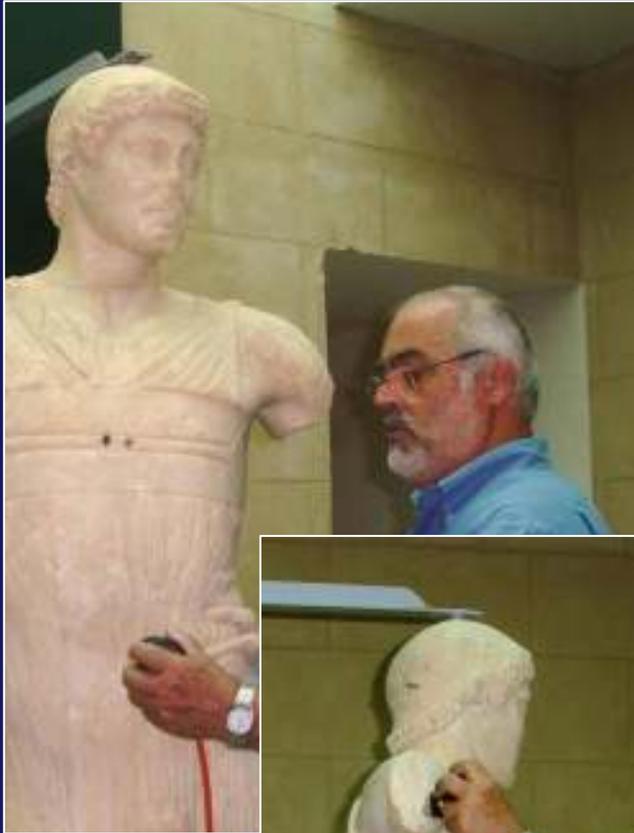
**Raggi di
ultrasuoni**



Giovinetto di Mothia



Giovinetto di Mothia



Dalla tomografia sonora all' ...

1. L'impronta Sonica



Microgeofisica ad alta risoluzione

Principali metodologie finalizzate allo studio ed alla caratterizzazione di materiali usati in Ingegneria civile (rocce, cemento , ecc.)

- **Metodologie a campi d'onda, sia in modalità trasmissione sia in riflessione:**
 - Tomografia multicanale sonica ed ultrasonica (0 - 20 MHz)
 - Tomografia elettromagnetica ad alta-frequenza (0.9 - 2 GHz)
 - Termografia IR
- **Metodologie a campi di potenziale:**
 - Potenziali spontanei, Resistività e Polarizzazione Indotta
 - ERT multicanale (c.c. ovvero bassa frequenza)
- **Microscopia elettronica ed analisi strutturale**

Microgeofisica ad alta risoluzione

Principali metodologie finalizzate allo studio ed alla caratterizzazione di materiali usati in Ingegneria civile (rocce, cemento , ecc.)

➤ Metodologie a campi d'onda, sia in modalità trasmissione sia in riflessione:

- Tomografia multicanale sonica ed ultrasonica (0 - 20 MHz)
- Tomografia elettromagnetica ad alta-frequenza (0.9 - 2 GHz)
- Termografia IR

Analisi cinematica e dinamica dei segnali

➤ Metodologie a campi di potenziale:

- Potenziali spontanei, Resistività e Polarizzazione
- ERT multicanale (c.c. ovvero bassa frequenza)

Corrente continua o a bassa frequenza

➤ Microscopia elettronica ed analisi strutturale

Interventi di Microgeofisica

Gli scopi degli interventi possono essere suddivisi in tre categorie principali:

1. Studio ed analisi dei beni per la loro caratterizzazione fisica, anche finalizzato alla preparazione di schede tecniche d'archivio, più o meno ricche di parametri analizzati e misurati.
2. Studio ed analisi delle condizioni di degrado dei beni (cioè "diagnostica"), anche come supporto tecnico dei progetti e degli interventi di restauro e di messa in sicurezza.
3. Monitoraggio delle condizioni fisiche e chimico-fisiche dei beni, al variare di particolari parametri correlati ad alcune condizioni ambientali.

Svantaggi delle metodologie classiche

Invasività

Alcune sono addirittura distruttive, anche se per campioni piccoli o piccolissimi

Precisione

Alcune, anche consentendo grandi precisioni, risultano di limitata rappresentatività volumica

Costo

Alcune richiedono apparecchiature di grande costo e lunghi tempi di analisi

La microgeofisica è precisa, economica e rappresentativa di grandi parti, o addirittura, di tutto il volume dell'oggetto indagato

SERENDIPITY!

si studia come analizzare un bene da movimentare



SERENDIPITY!

si studia come analizzare un bene da movimentare

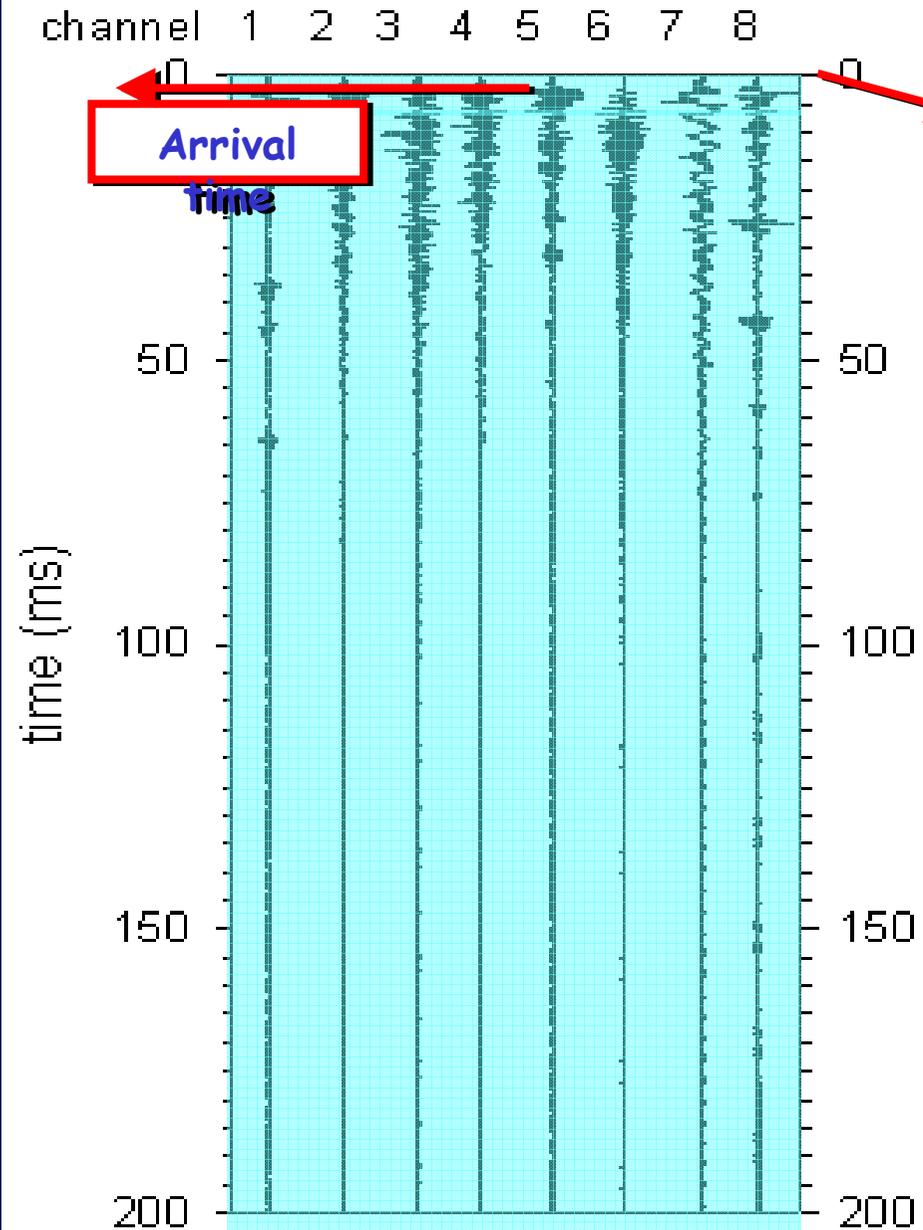


Che cosa possiamo fare per valutare l'integrità di questo cratere?

Facciamo una tomografia sonora molto ricca, registrando tutto il segnale in arrivo

SEPPENDIPITY!

un bene da movimentare



Facciamo una tomografia sonora molto ricca, registrando tutto il segnale in arrivo

Tecnica di applicazione dei sensori



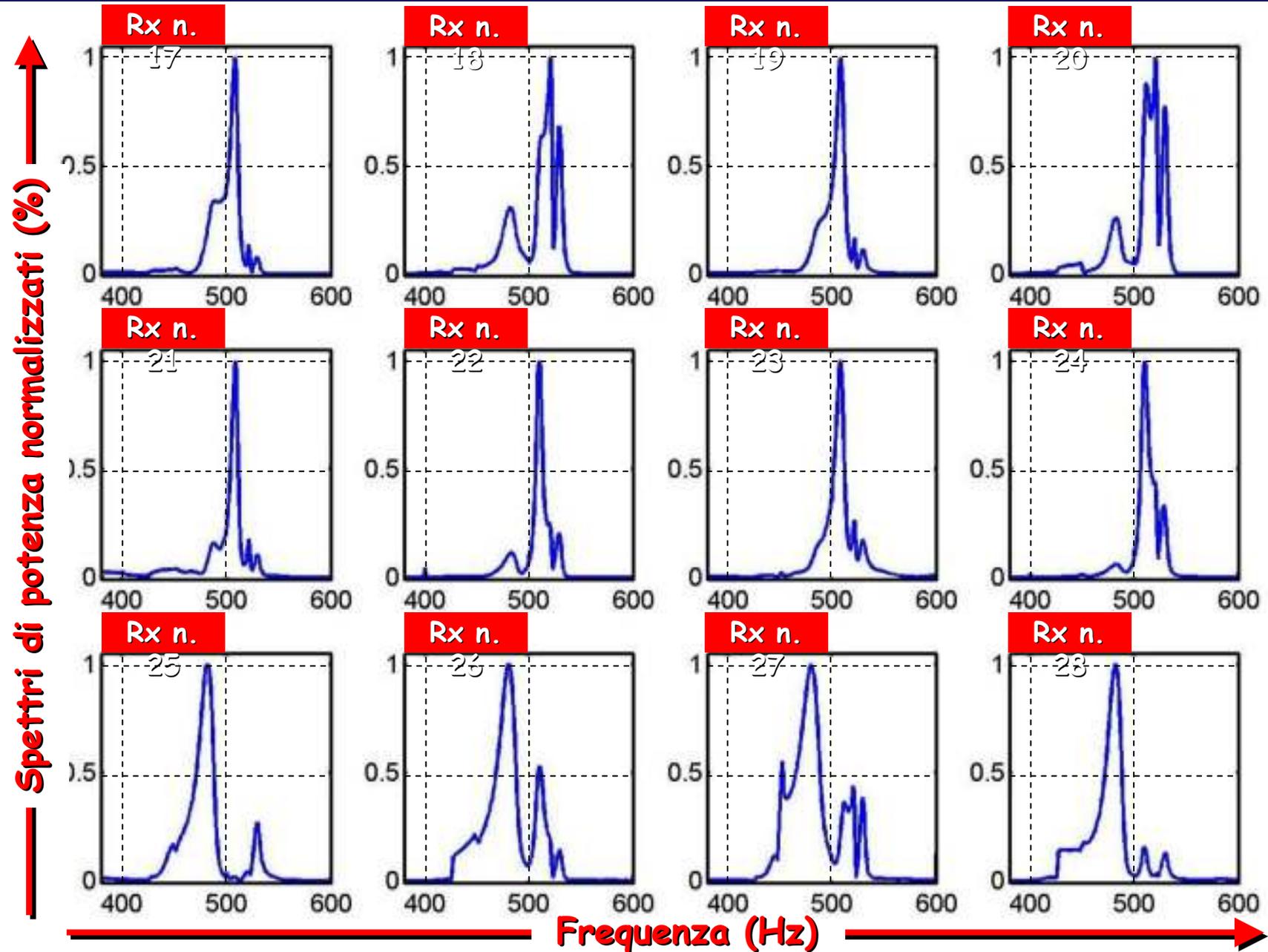
Cratere V sec. a. C.



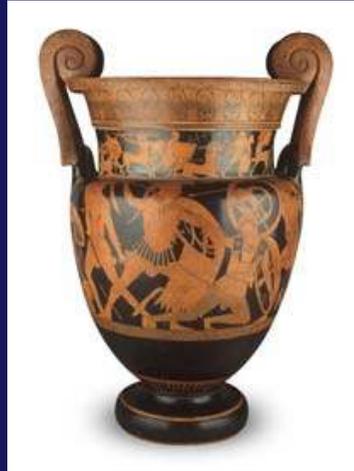
Cratere Attico (V sec. a. C.)

Amazonomachia,
pittore dei Niobidi

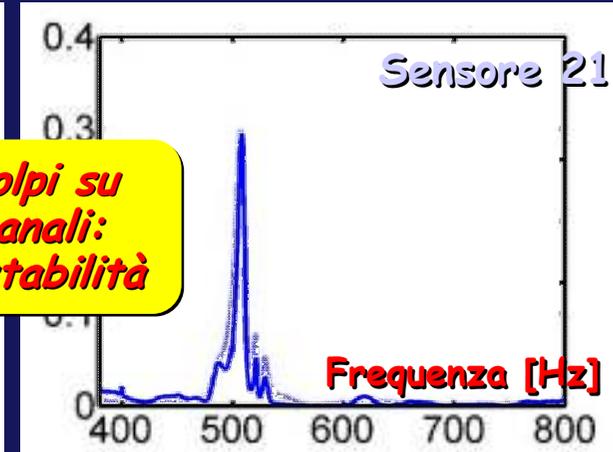
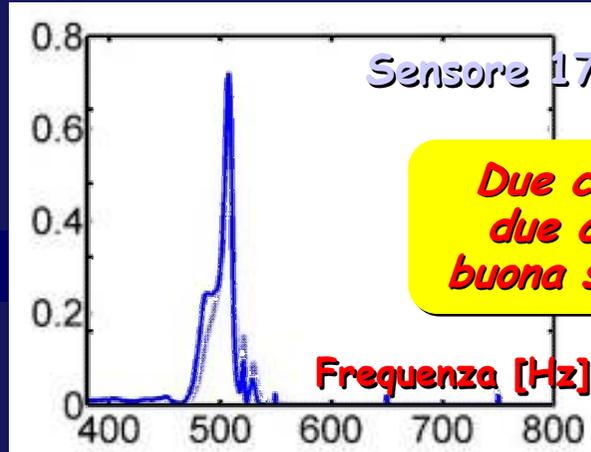
Spettri di 12 sensori



Cratere *Impronta sonora*

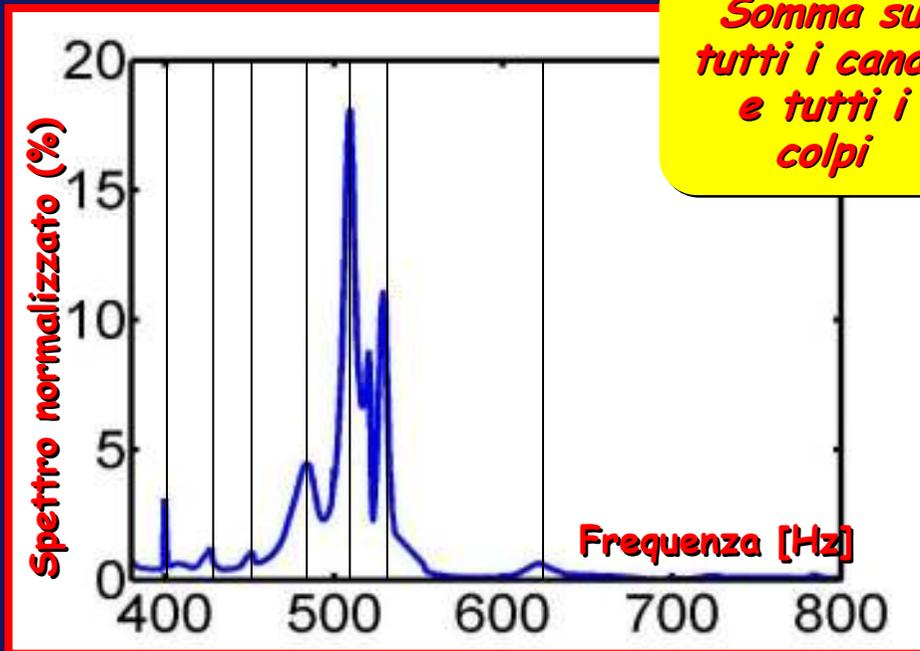


0.78 m



*Due colpi su
due canali:
buona stabilità*

510Hz



*Somma su
tutti i canali
e tutti i
colpi*



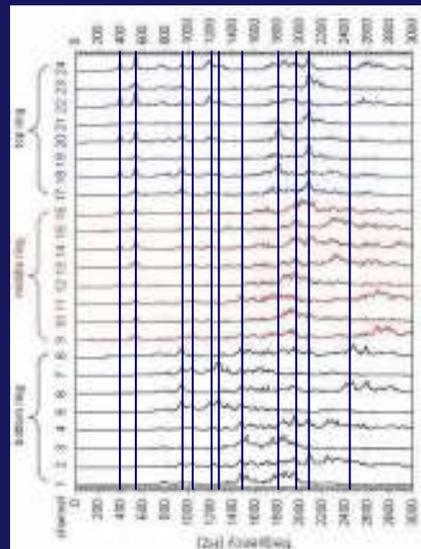
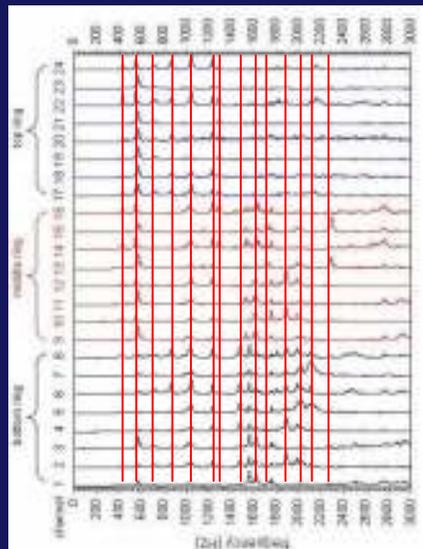
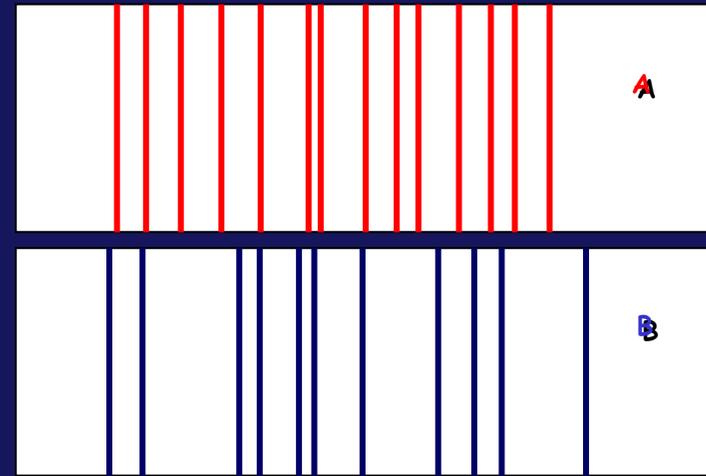
Un codice a barre?

Impronta sonora? L'uovo di Colombo



All'orecchio i suoni dei due
bicchieri possono risultare
uguali
per gli strumenti, no!

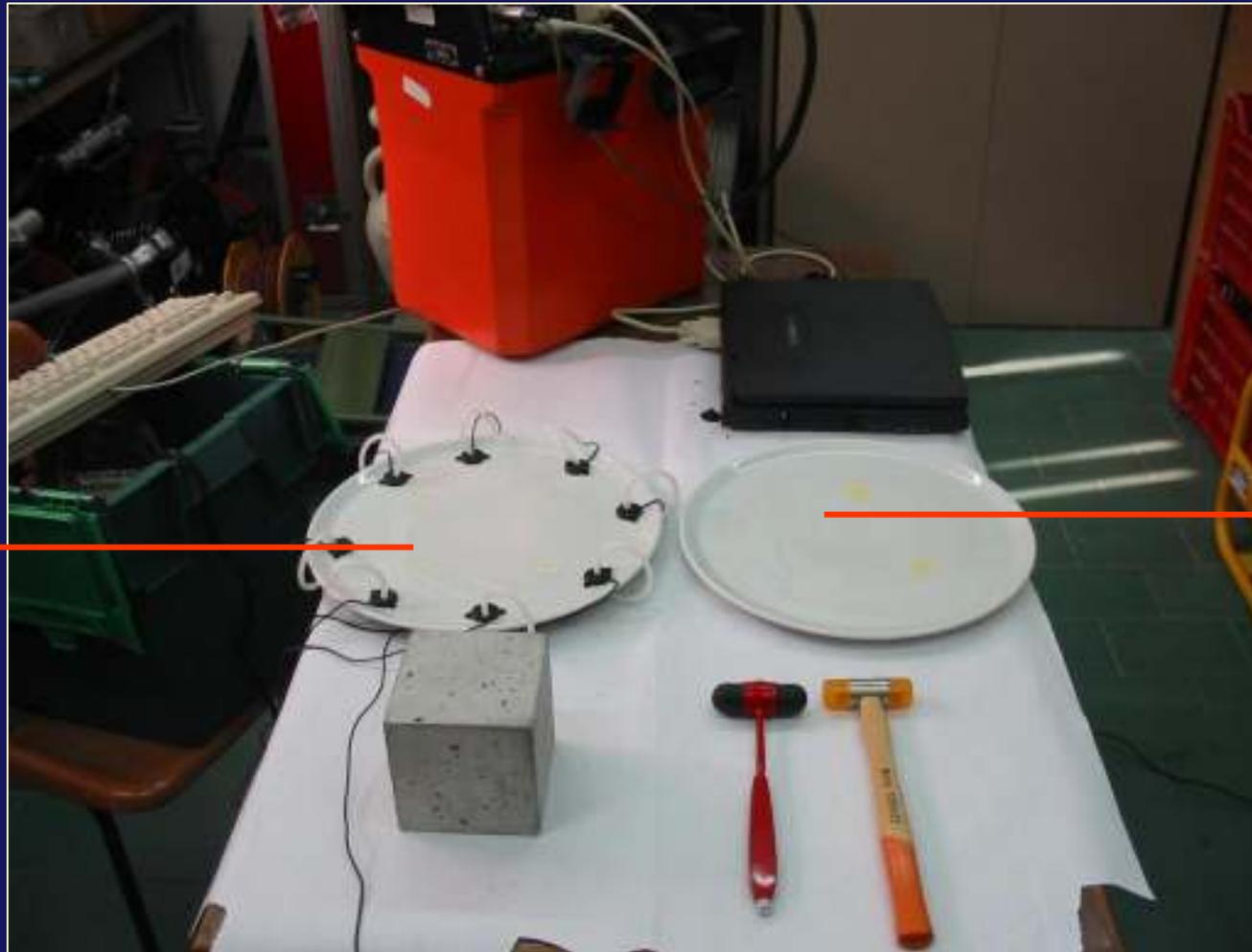
Due vasi, artigianato tunisino: sono uguali?



La forma e le dimensioni
sì, gli spettri (e quindi le
impronte sonore) sono
completamente differenti!

L'impronta sonora può cambiare solo
per un forte degrado (lesioni,
fratture, imbibizione, ecc.) che
modifichino le caratteristiche
geometriche o elastiche dell'oggetto.

Si provano due piatti da pizza dello stesso servizio "industriale"

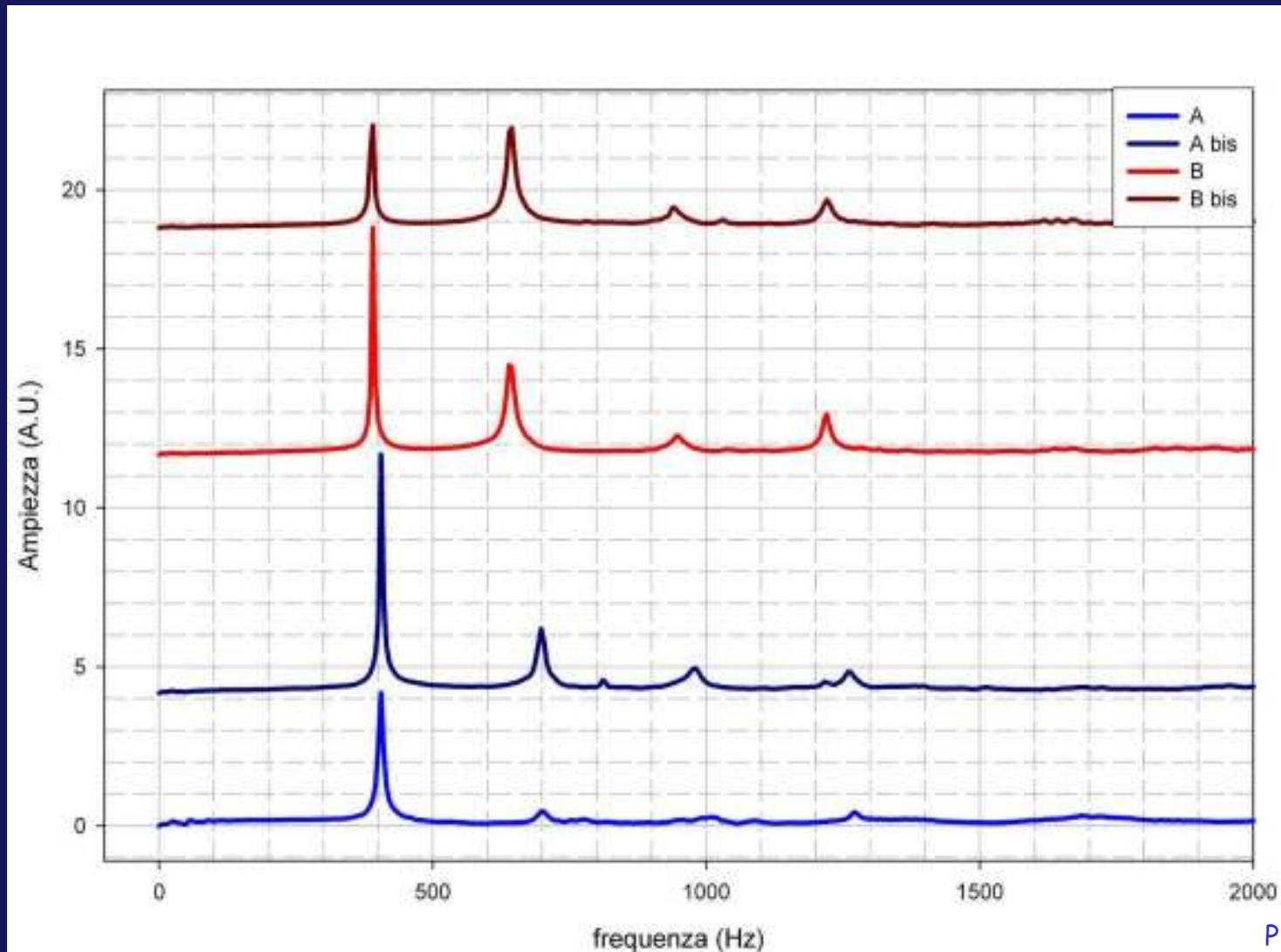


PIATTO
A

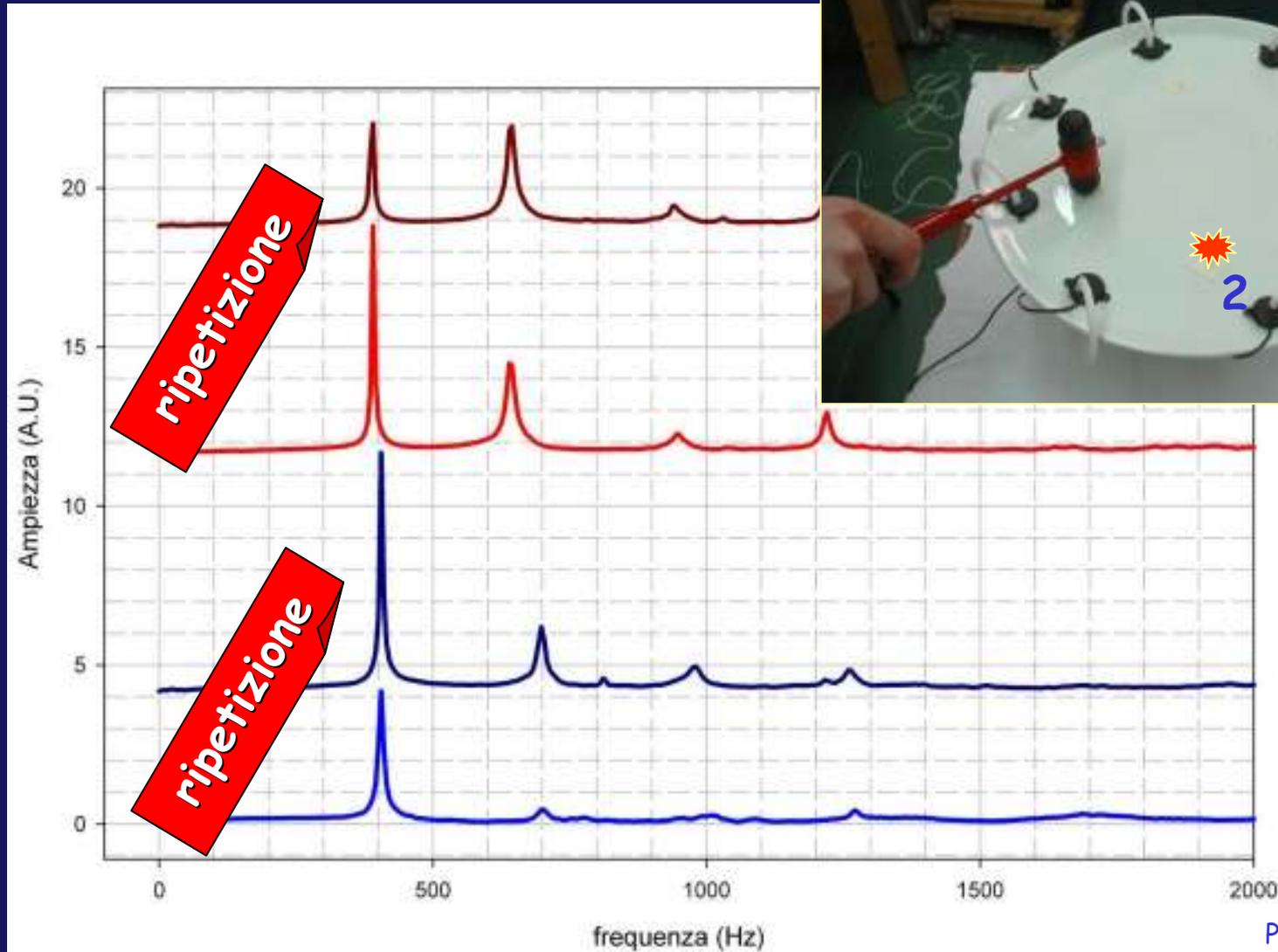
PIATTO
B

Impronta Sonica Piatti A e B

Posizione 2

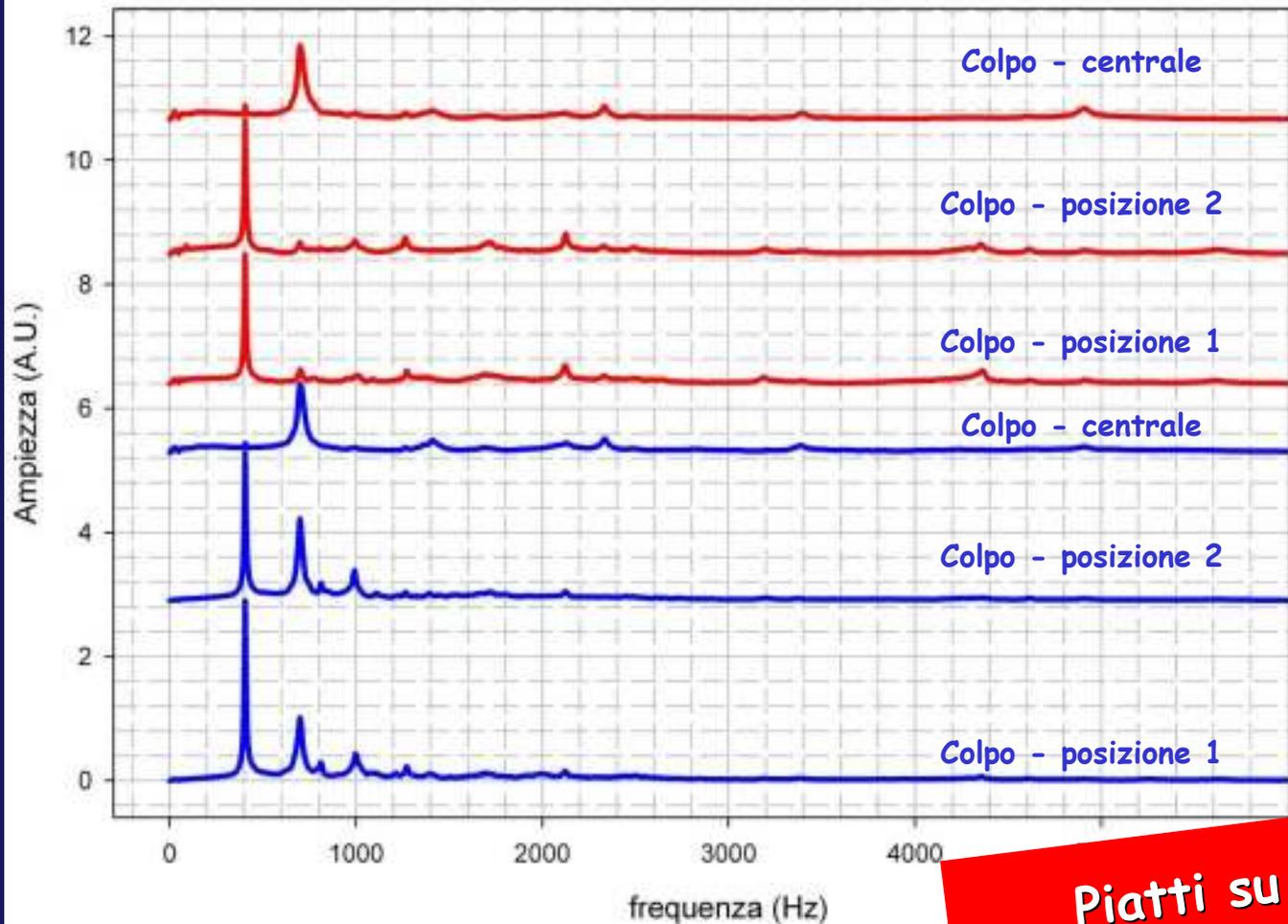


Impronta Sonica Piatti A e B Posizione 2



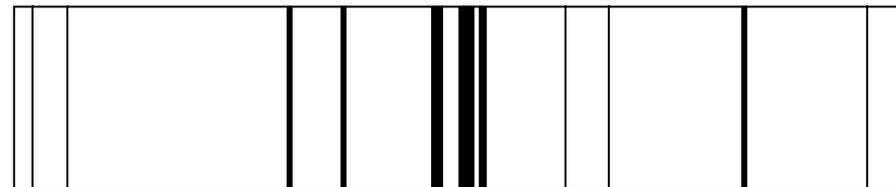
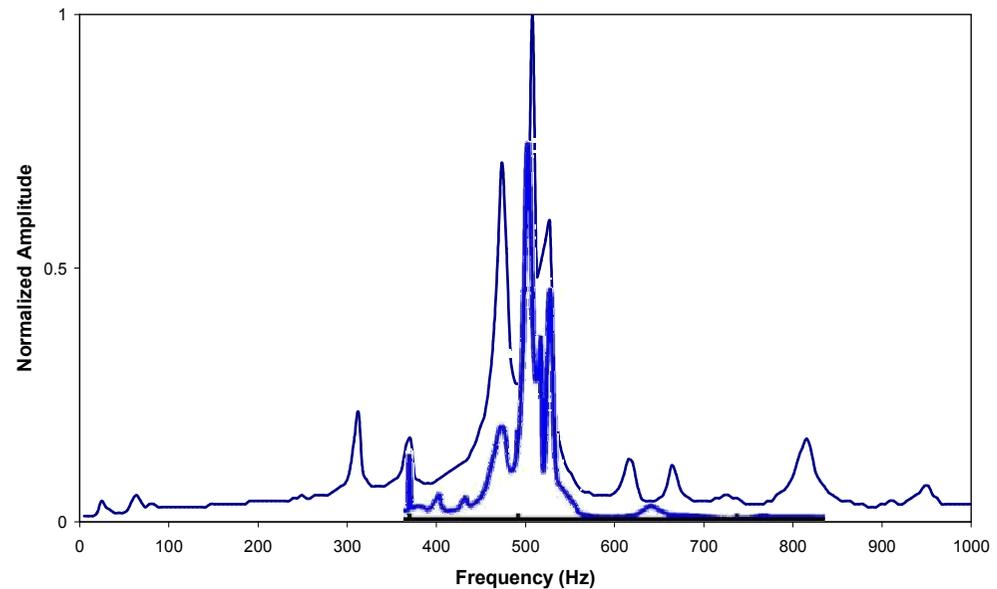
Differenze tra sorgenti

Impronta Sonica - Piatto A



Piatti su gommapiuma

Ancora Cratere V sec. a. C. dopo il rientro ad Agrigento



Cratere dei Niobidi (V cent. b.C.), Museo Archeologico - Agrigento
9/11/2007

Un piatto di ceramica siciliana

Due pesci verdi nel mare



Diametro esterno = 43.3 cm

Diametro interno = 31 ± 0.5 cm

Spessore della ceramica = 9.05 ± 0.3

Peso = $2850.8 \text{ g}^{\text{mm}}$

Velocità_{transp} US = 2900 m/s

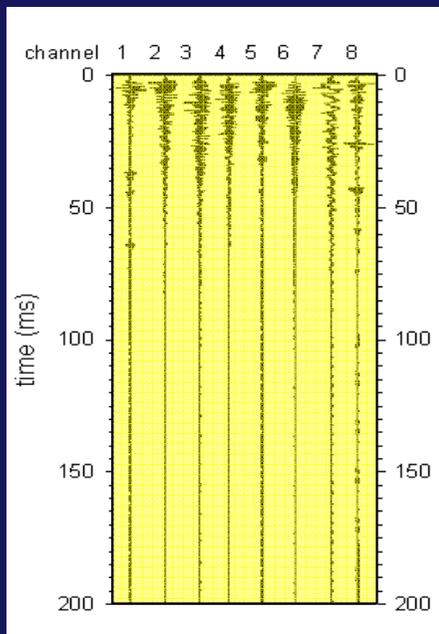
Velocità_{radial} US = 3300 m/s



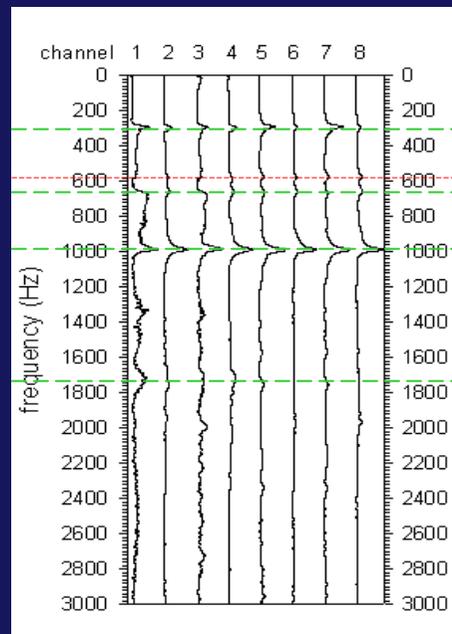
1/01/2004

Pietro L. Cosentino,
Università di Palermo

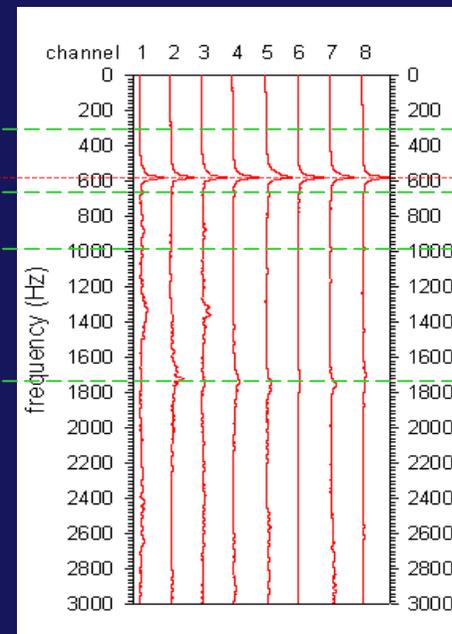
Rilievo impronta sonora del piatto di ceramica



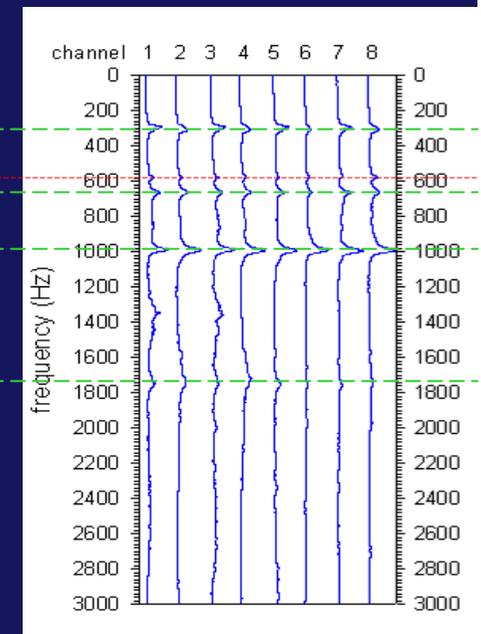
Colpo #1



Spettri per il colpo #1

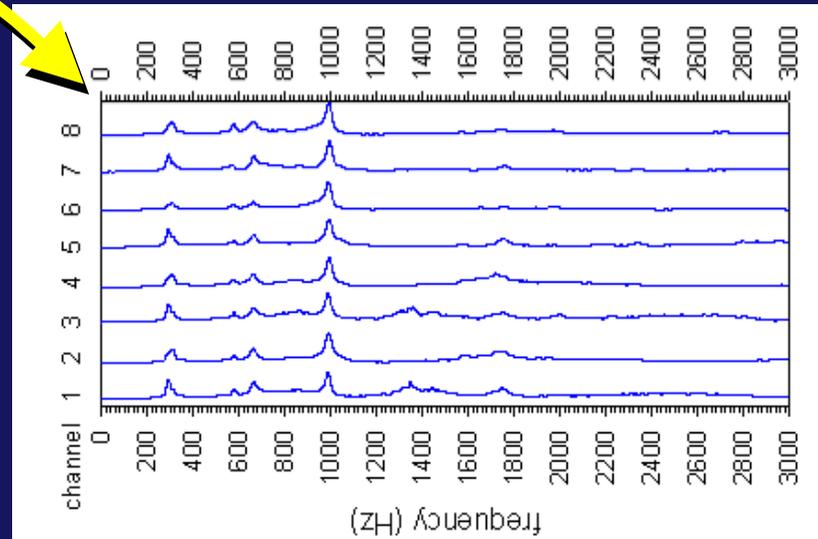


Spettri per il colpo centrale

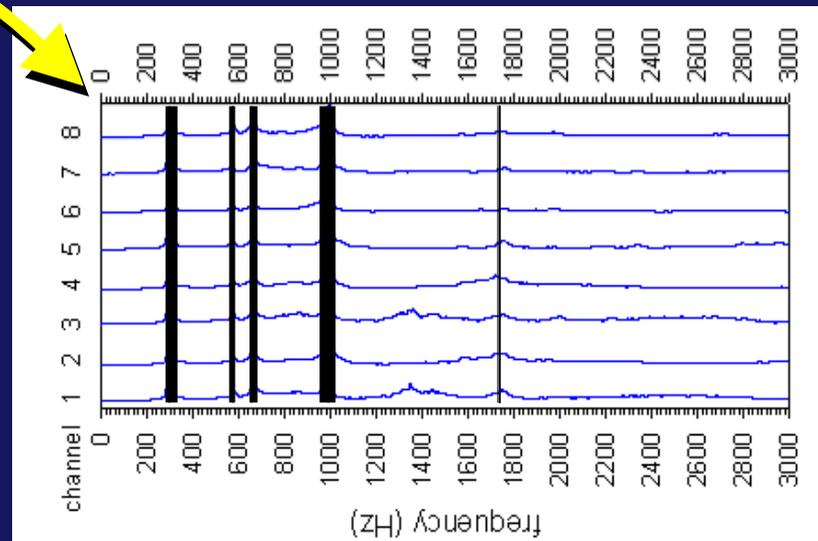


Spettri medi su 8 colpi

Impronta sonora del piatto di ceramica



Impronta sonora del piatto di ceramica



Impronta sonora del piatto di ceramica

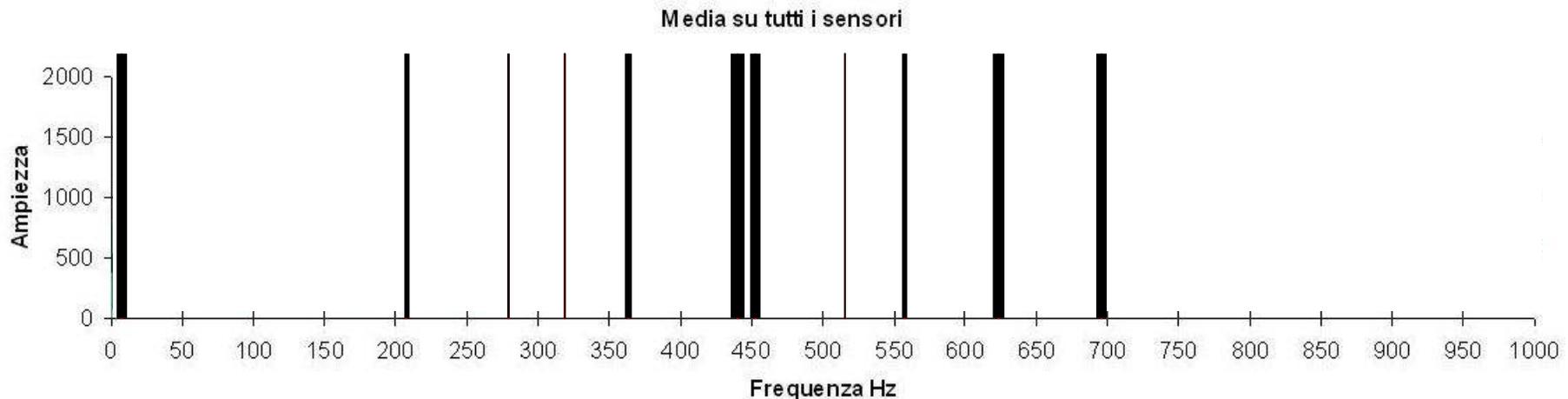


Fonte battesimale in ottone, dalla Madrice Greca S. Nicolò di Mira, Mezzojuso, Palermo (XVI sec.)

In lamina (4.8 mm) di ottone sbalzata e martellata, con applicazioni di bronzo a fusione



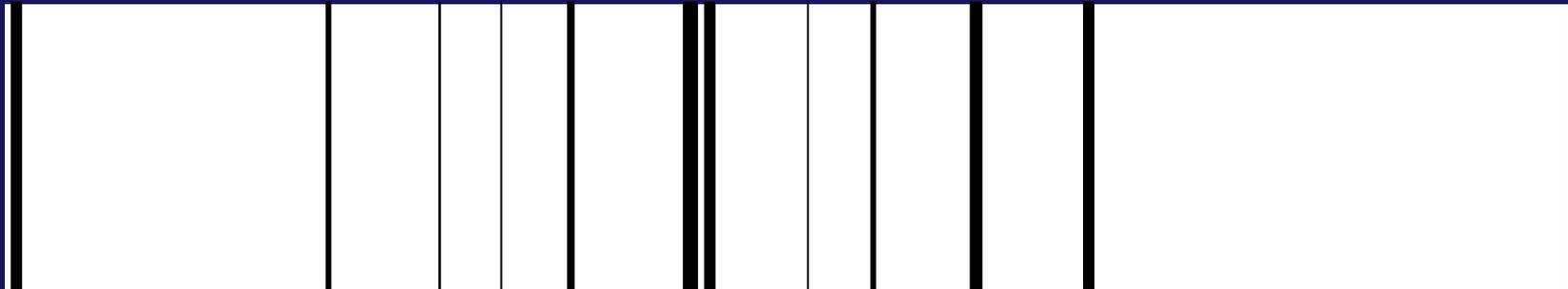
Diametri: bordo = 74.5 cm, corpo = 78.8 cm
Altezza totale = 32 cm
(corpo = 29 cm, piedi = 13 cm)
Peso = ? kg



Fonte battesimale in ottone, dalla Chiesa di Mezzojuso, Palermo (XVII sec.)



Mezzojuso - Fon batt 77052



Madonna in legno di Salina

Altezza = 78
cm



Velocità u_s comprese
tra 780 e 2600 m/s,
con forte anisotropia
e disomogeneità

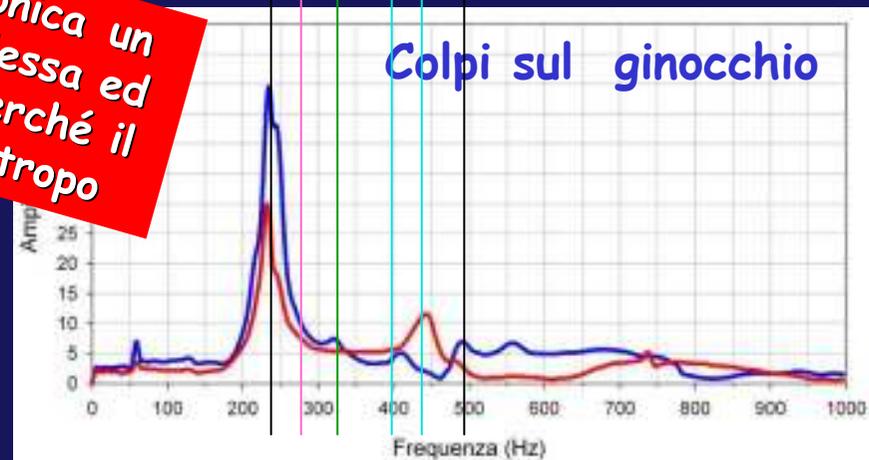
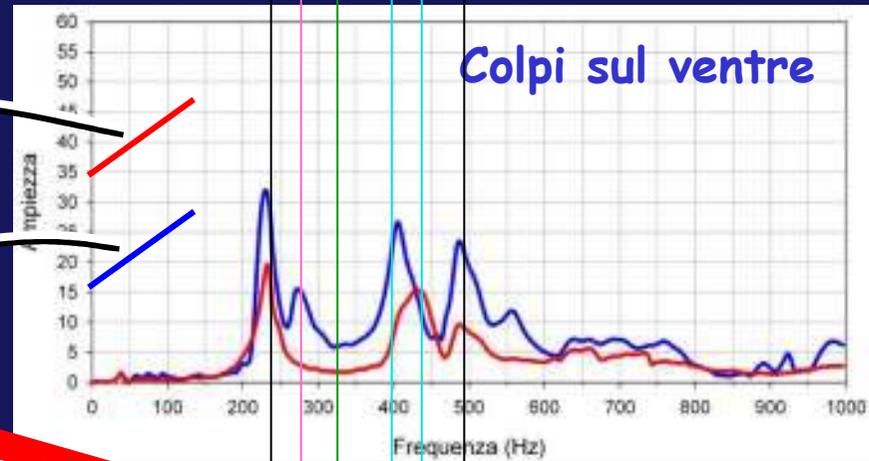
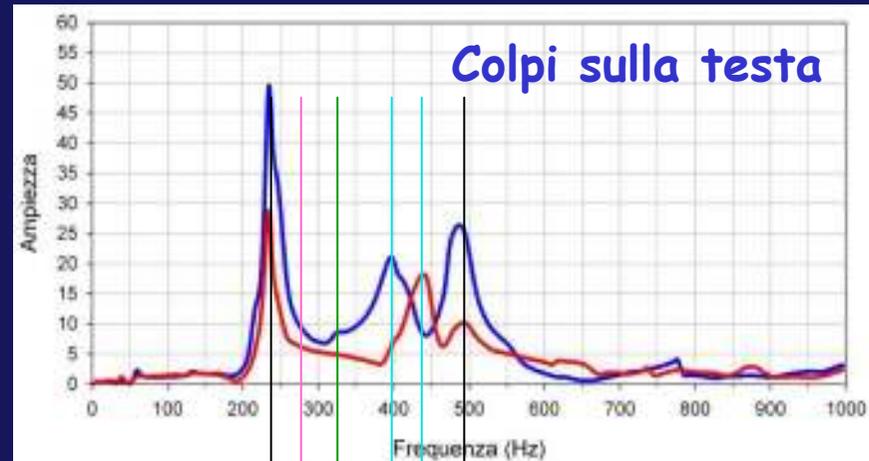


Madonna in legno, di Salina: l'impronta sonora



Impronta sonora un po' più complessa ed articolata, perché il legno è anisotropo

Comportamento disomogeneo e anisotropo del legno

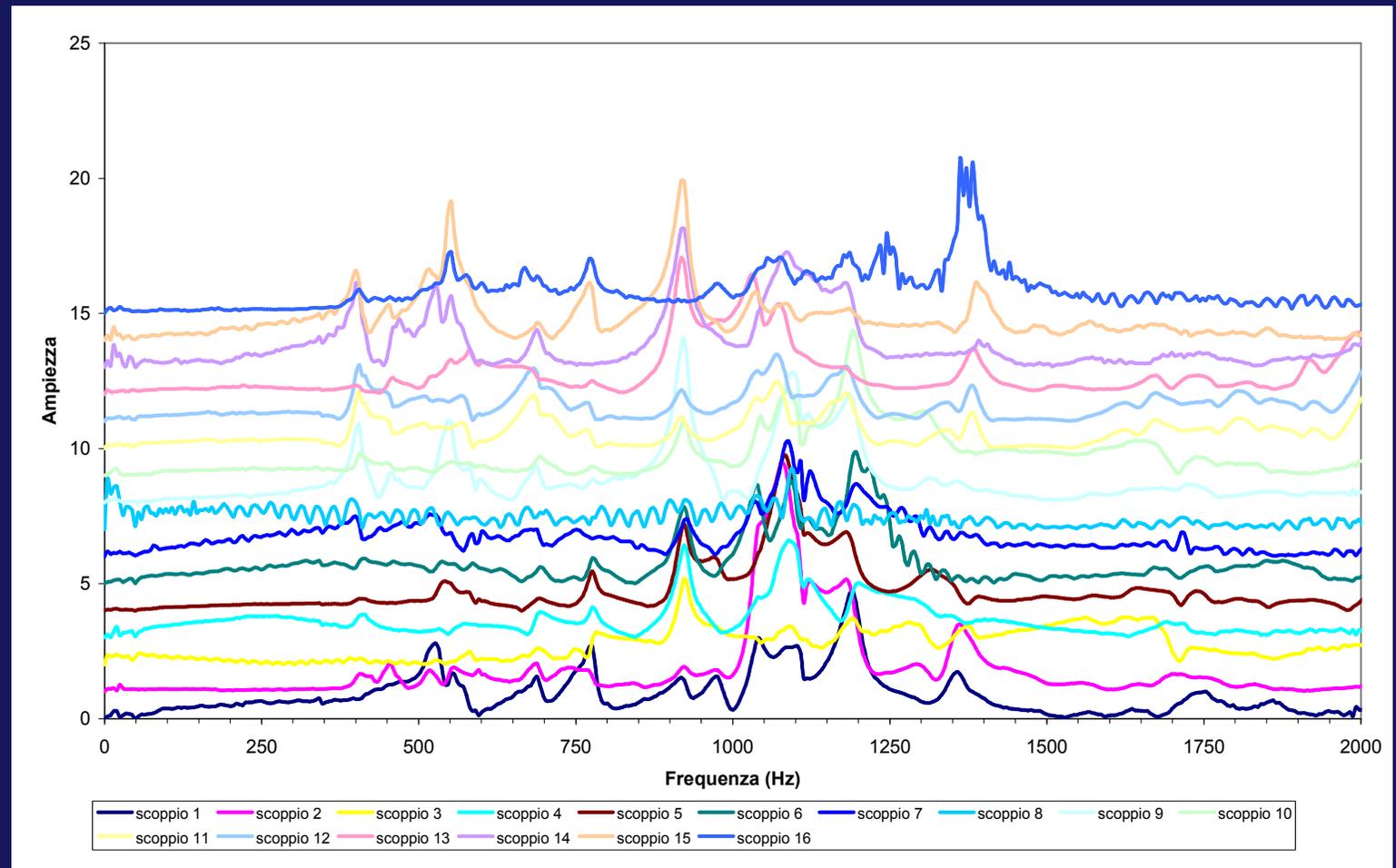


San Michele Arcangelo *(Antonello Gagini?)*



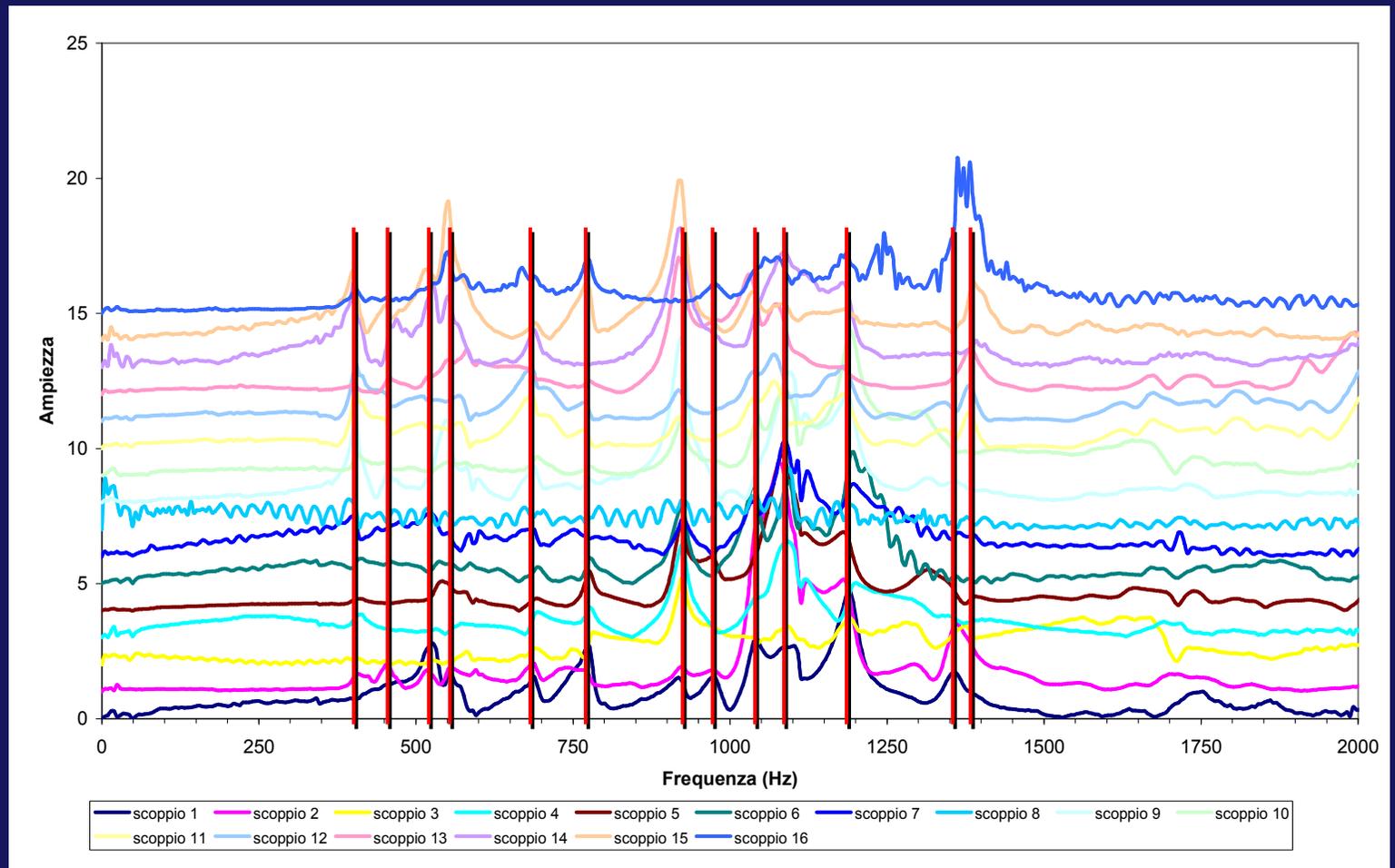
San Michele Arcangelo

Spettri relativi al sensore n° 2 (sterno) per 16 punti energizzanti



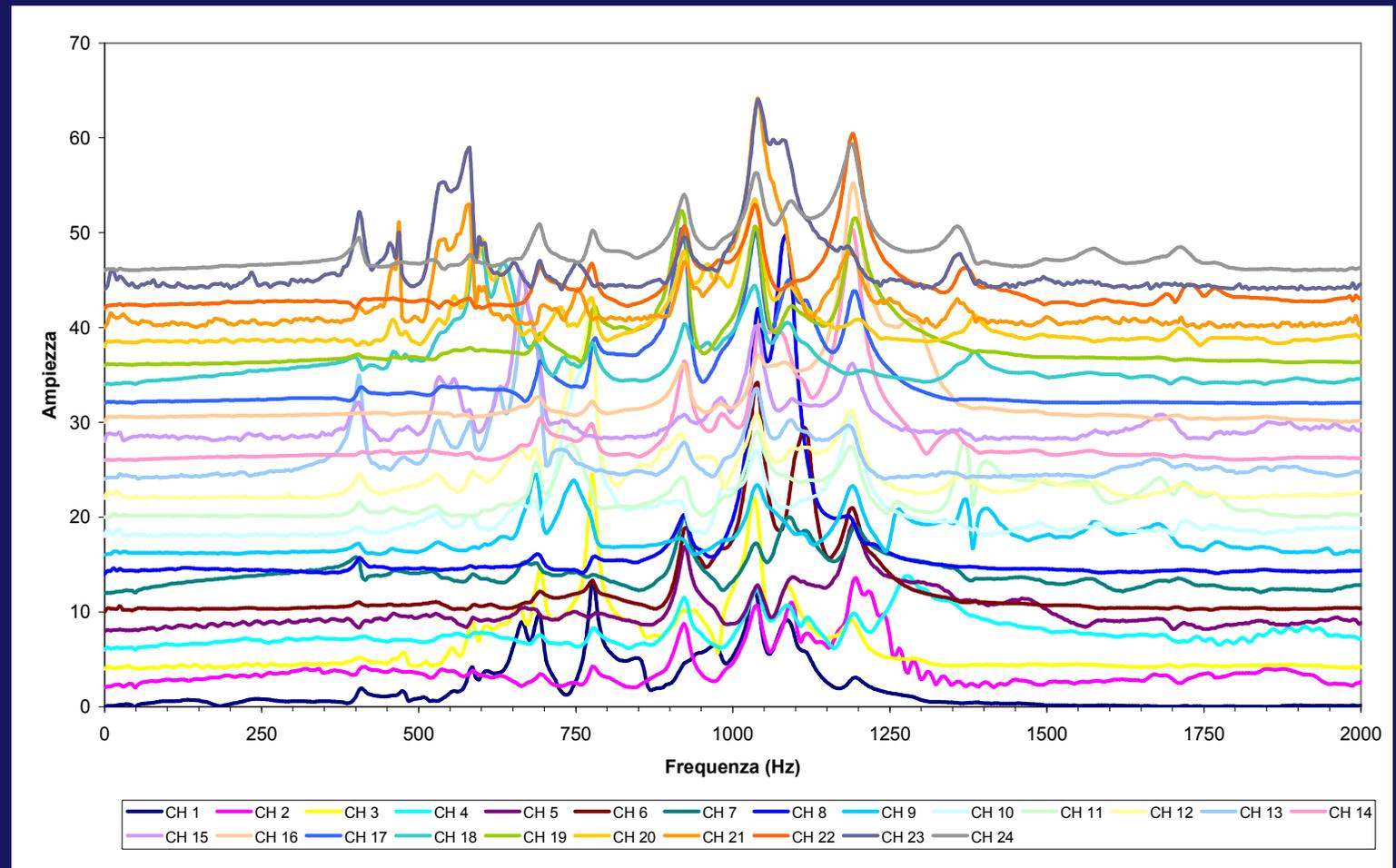
San Michele Arcangelo

Spettri relativi al sensore n° 2 (sterno) per 16 punti energizzanti



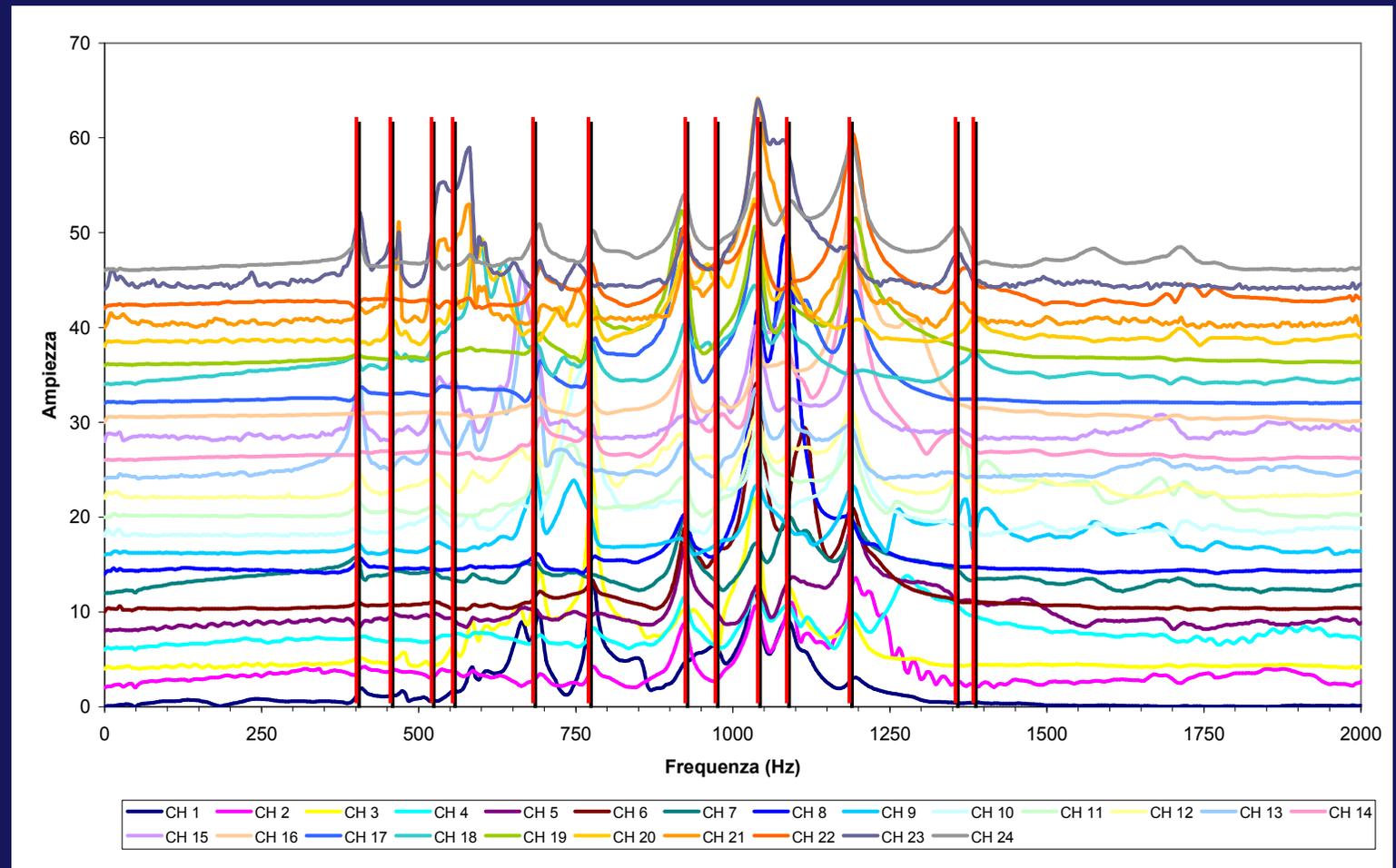
San Michele Arcangelo

Colpo in posizione 6 (sterno) - spettri relativi ai 24 sensori



San Michele Arcangelo

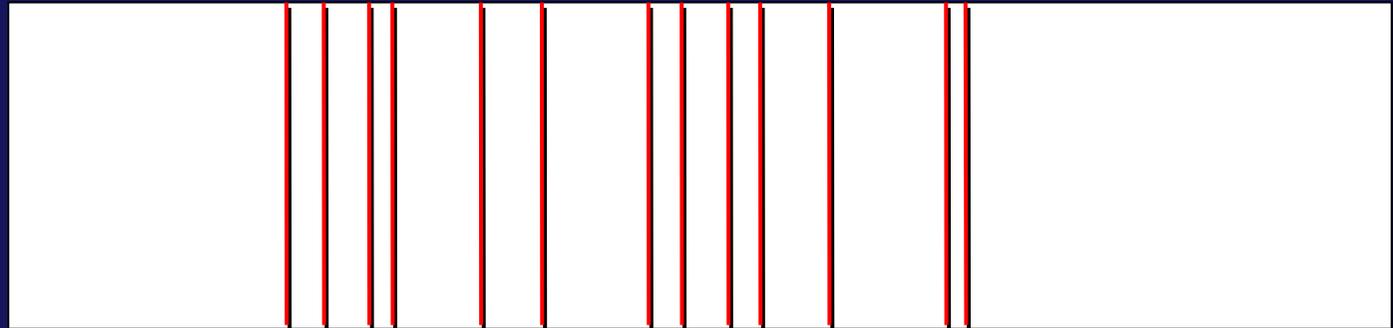
Colpo in posizione 6 (sterno) - spettri relativi ai 24 sensori



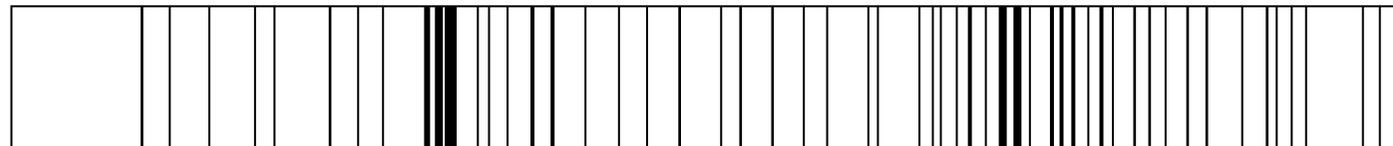
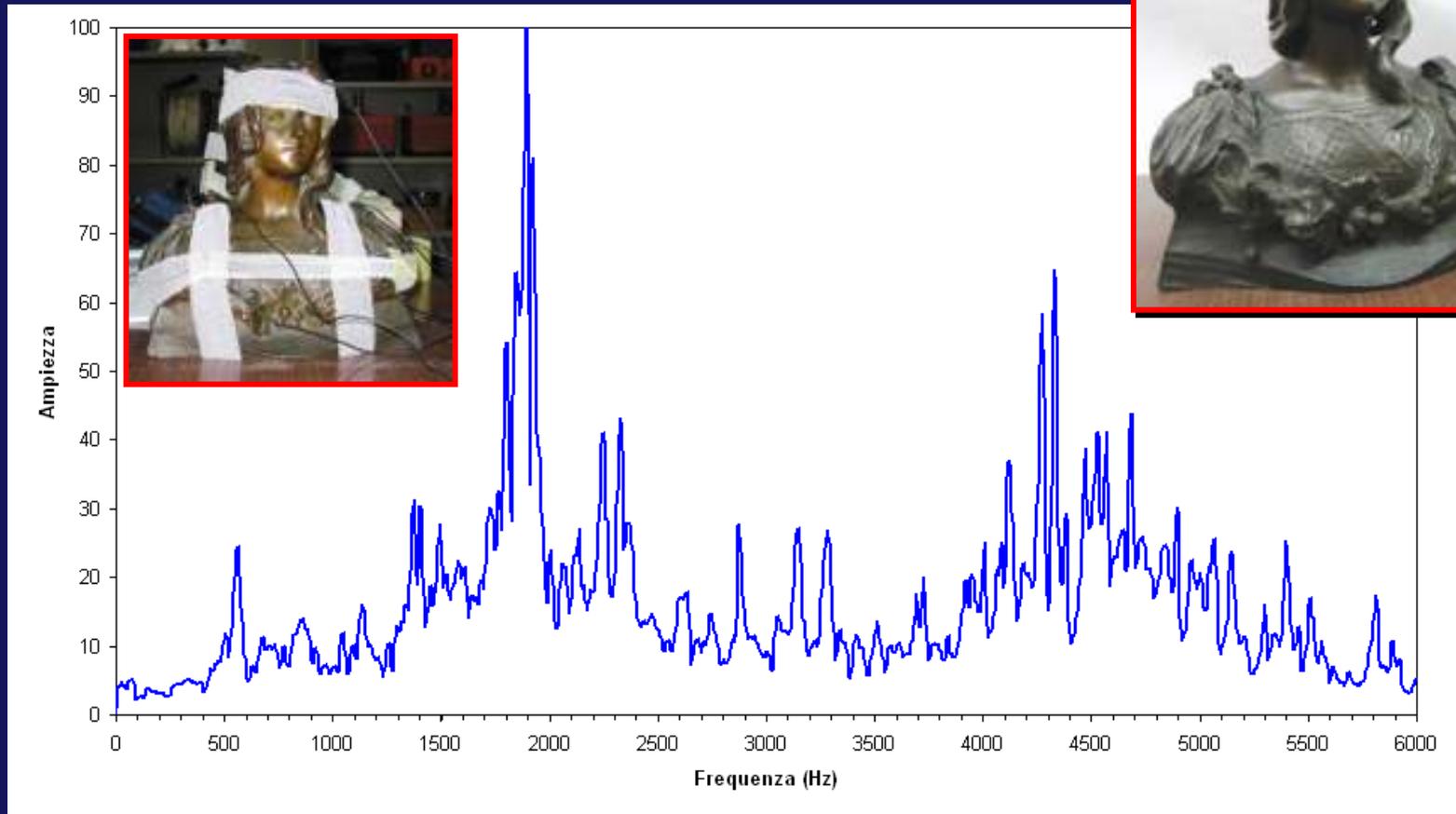
San Michele Arcangelo

Colpo in posizione 6 (sterno) - spettri relativi ai 24 sensori

Ecco l'impronta sonora dell'Arcangelo !



Spettro signora (A. Ugo)



Sicilian Milady, A. Ugo (1930)

08/01/2007

H27.5 W27 T12.5 W4180 p.c.

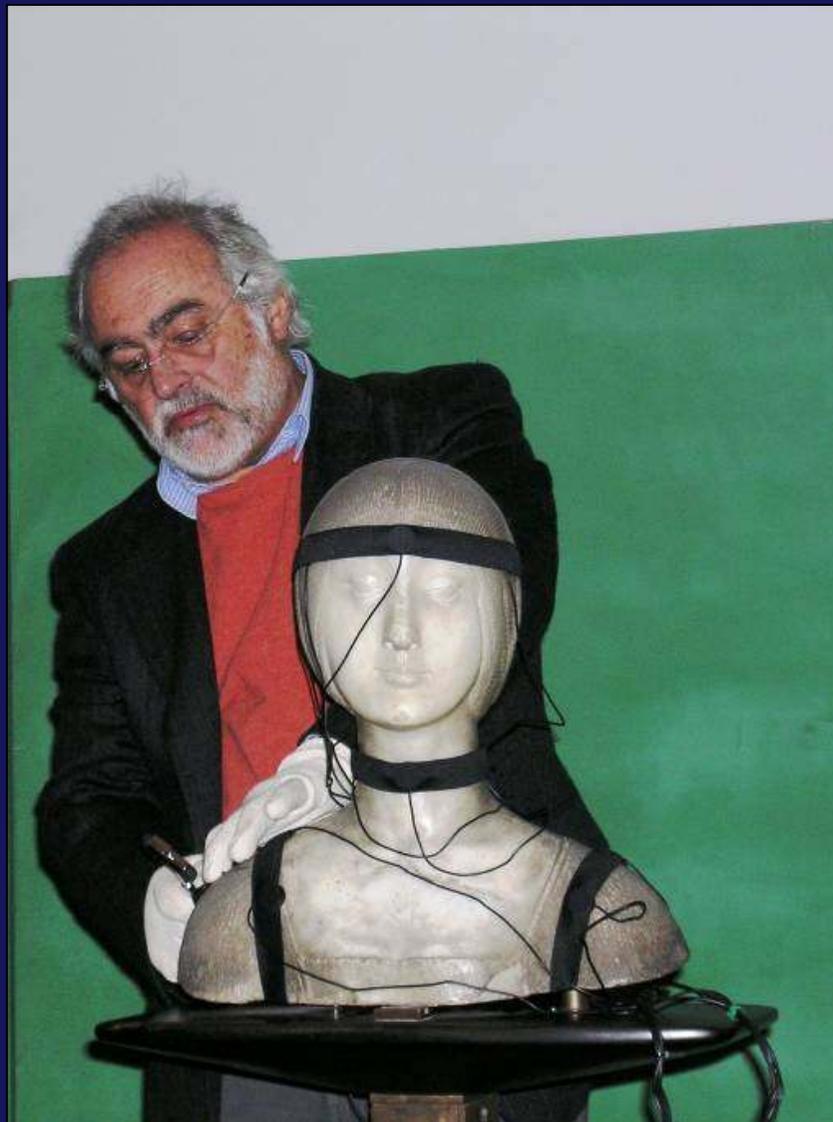
Spettro Eleonora d'Aragona

Francesco Laurana 1471 - Museo Abatellis, Palermo



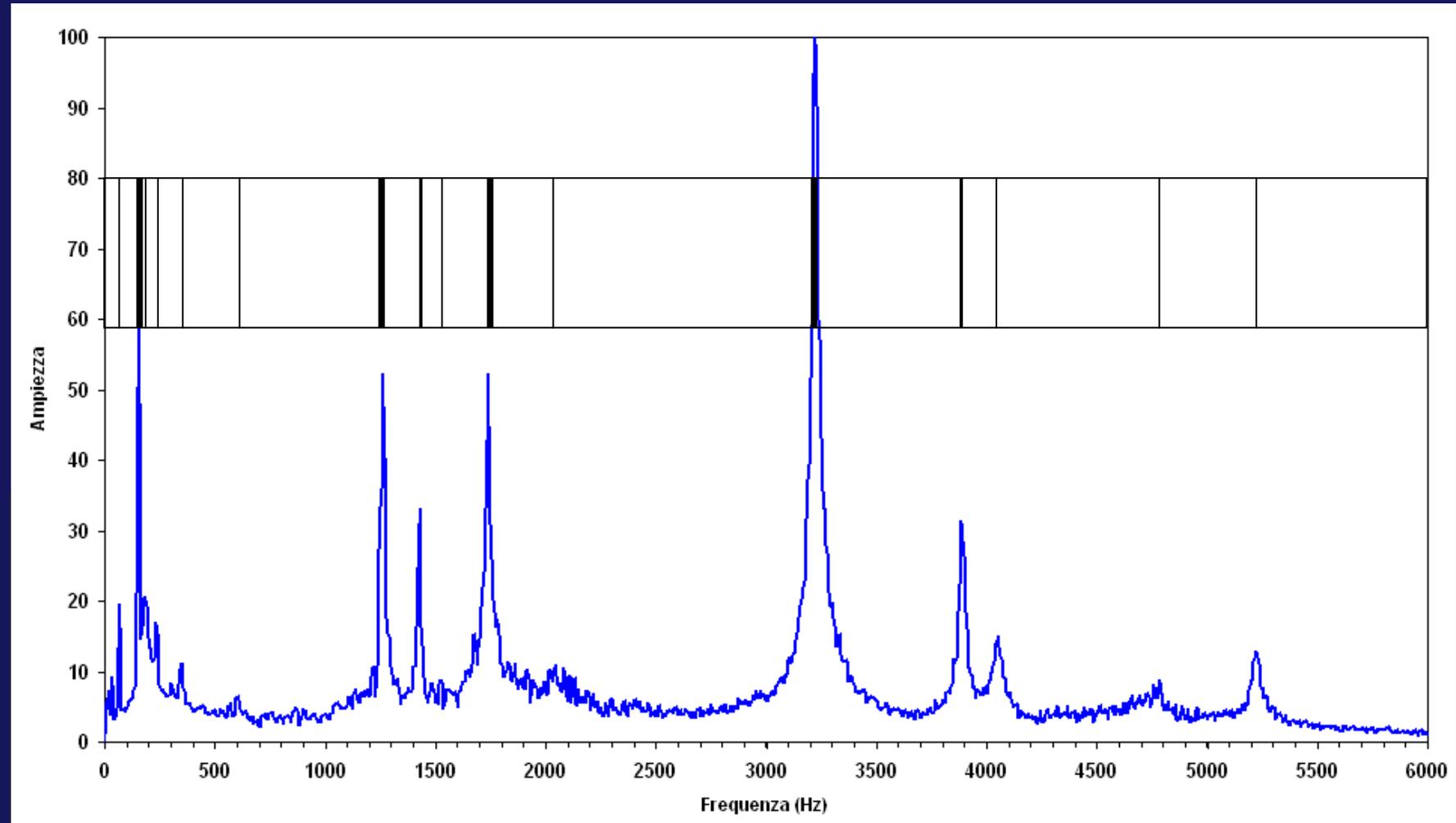
Spettro Eleonora d'Aragona

Francesco Laurana 1471 - Museo Abatellis, Palermo



Spettro Eleonora d'Aragona

Francesco Laurana 1471 - Museo Abatellis, Palermo



Spettro Eleonora d'Aragona

Francesco Laurana 1471 - Museo Abatellis, Palermo



Eleonora d'Aragona, F. Laurana (1471)
H48 W41 T20 Abatellis

25/01/2007

Questa opera è stata certificata con il metodo dell'Impronta sonora



*Galleria Regionale della Sicilia Palazzo Abatellis
Direttore: Dott. Vincenzo Abbate*

*I dati sono stati acquisiti con la statua posta
sul suo piedistallo in legno, utilizzando sedici
sensori piezoelettrici e cinque punti di
percussione.*

Il modulo del codice a barre è 0-6000.



Rilievo del 25/01/2007

*Università degli Studi di Palermo
Dipartimento di Chimica e Fisica della Terra ed Applicazioni
Prof. P. L. Cosentino*

Questa opera è stata certificata con il metodo dell'Impronta sonica



Questo è il certificato dell'Impronta

*Galleria Regionale del Palazzo Abatellis
Direttore: Vincenzo Abbate*

Sonica

*dati sono stati acquisiti con la statua posta
sul suo piedistallo in legno, utilizzando sedici
sensori piezoelettrici e cinque punti di
percussione.*

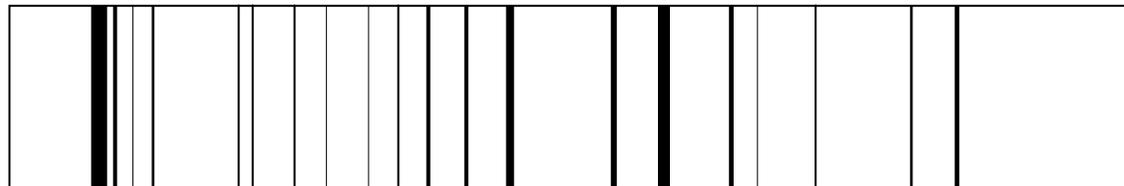
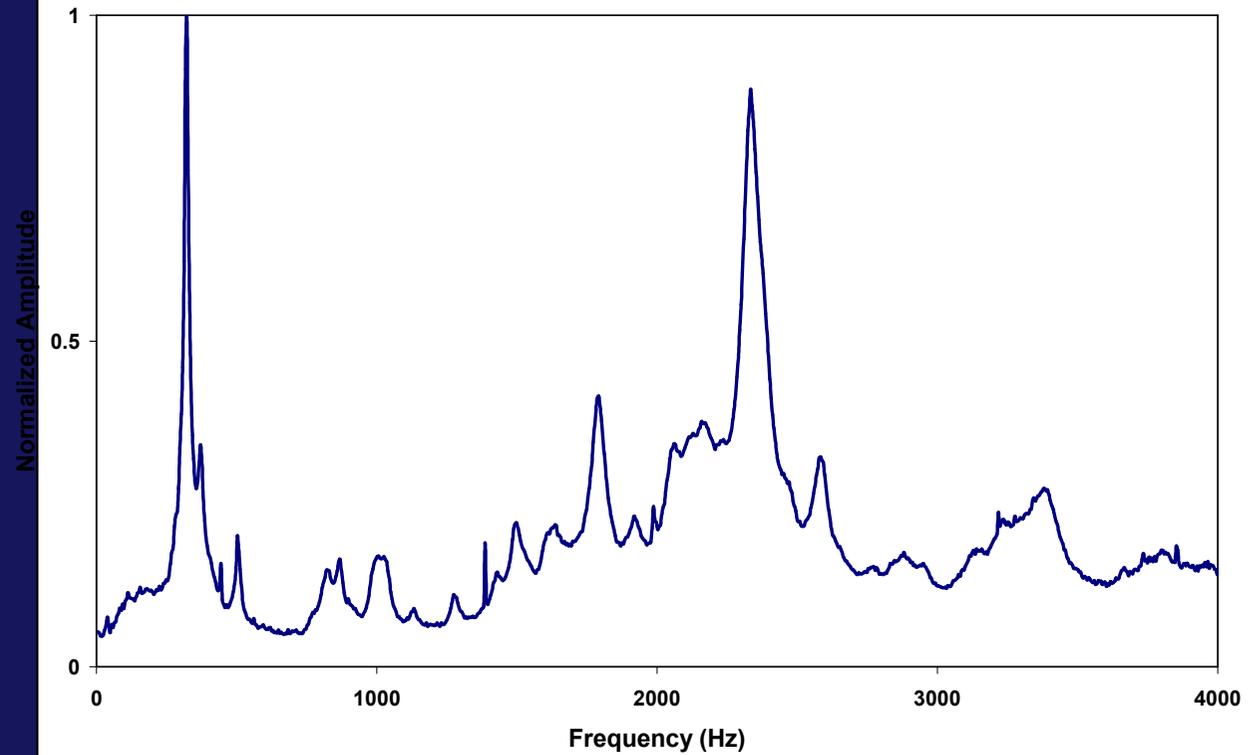
Il modulo del codice a barre è 0-6000.



Rilievo del 25/01/2007

*Università degli Studi di Palermo
Dipartimento di Chimica e Fisica della Terra ed Applicazioni
Prof. P. L. Cosentino*

Venere Anadiomene (Landolina), II sec. d. C. Museo P. Orsi, Siracusa



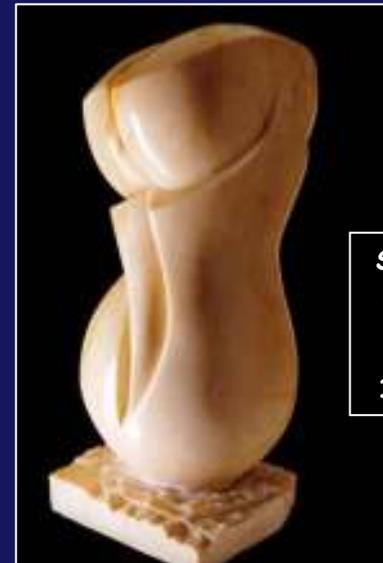
Venere Anadiomene (II sec. d. C.),
28/04/2008

Museo Paolo Orsi - Siracusa

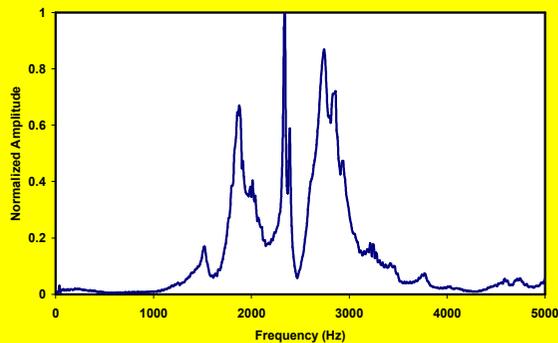
Le due ultime impronte soniche sono state prelevate da due "sex symbol" di epoca molto differente



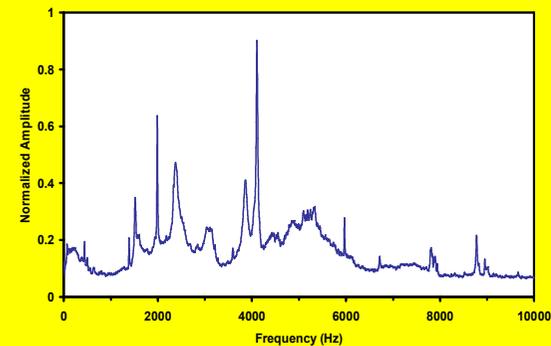
Vaso del Dio Bes
(ceramica, IV se.
a.C.) altezza 34 cm



Statua di Venere
(marmo rosa del
Portogallo),
Rita Sajeva,
1994, 68 x 32 x
31.4 cm

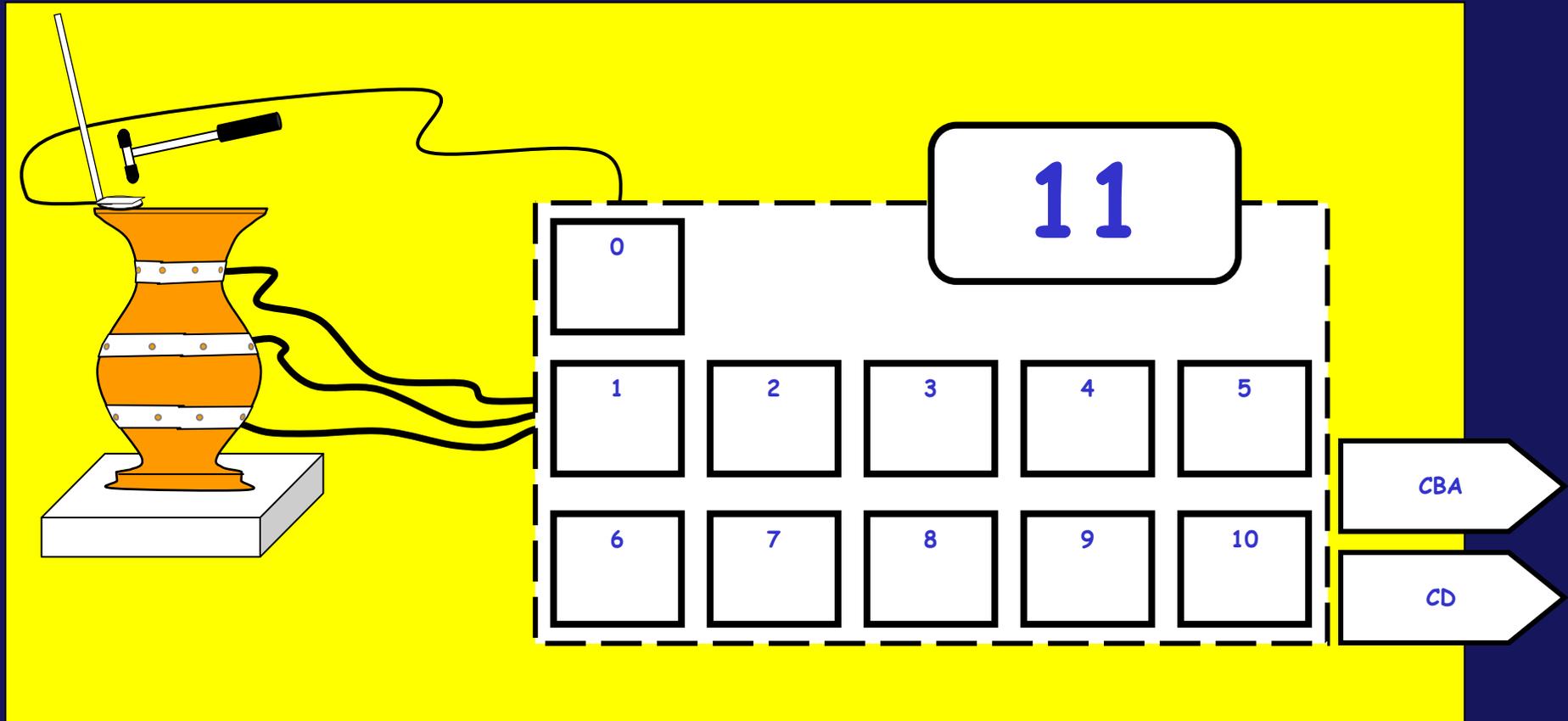


Bes (IV sec. b.C.), Museo Archeologico Agrigento
9/11/2007



Venus (1994), R. Sajeva Biotos
22/04/2008

Schema generale



0 Starter

1 Scheda d'acquisizione multicanale

2 Convertitore A/D

3 Registratore in memoria

4 Analisi segnali ed eventuali rigetti

5 Stacking

6 Analisi spettrale dei segnali già "mediati"

7 Comparazione tra gli spettri ottenuti

8 Selezione e composizione del(i) codice(i)

9 Preparazione codice(i) analogico(i)

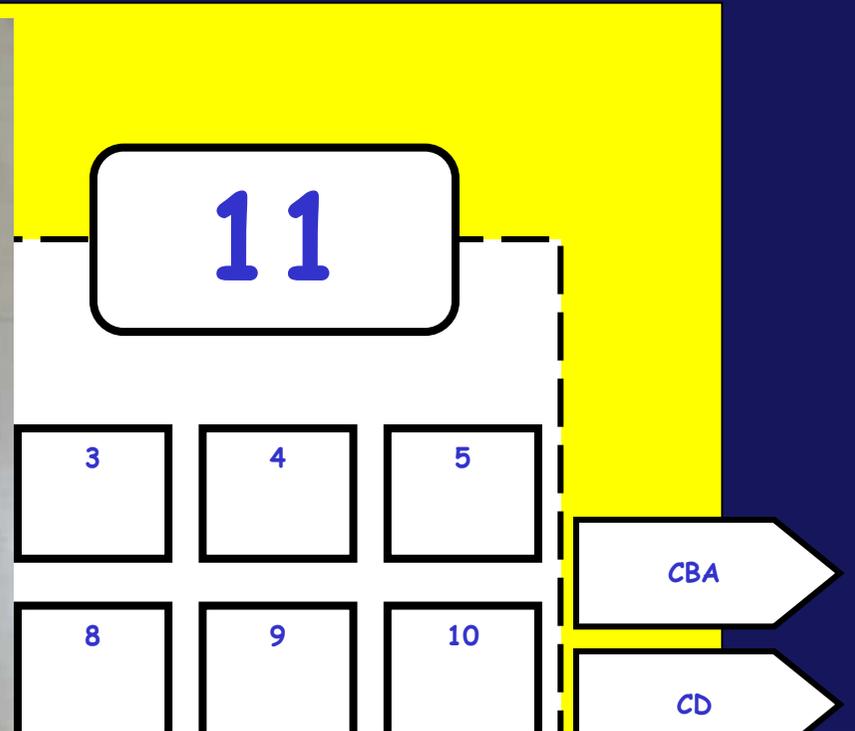
10 Preparazione codice(i) digitale(i)

11 Schermo (interattivo) per eventuali scelte

CBA Codice a barre analogico

CD Codice digitale

Schema generale



Identificazione certa di un manufatto

➤ L'identità viene "normalmente" controllata attraverso:

- Geometria del manufatto
- Peso del manufatto
- Colori delle superfici
- Tessitura



Oggi, la tecnologia Laser riesce a riprodurre con grande precisione tutte le caratteristiche sopradette! La Comet 5 della Steinbichler (interferenza) raggiunge la precisione di 1.2 μm !

Identificazione certa di un manufatto

➤ L'identità viene "normalmente" controllata attraverso:

- ~~• Geometria del manufatto~~
- ~~• Peso del manufatto~~
- ~~• Colori delle superfici~~
- ~~• Tessitura~~



Oggi, la tecnologia Laser riesce a riprodurre con grande precisione tutte le caratteristiche sopradette! La Comet 5 della Steinbichler (interferenza) raggiunge la precisione di 1.2 μm !

Cos'altro, allora, di affidabile, facile, poco costoso ed eseguibile in situ?

Identificazione certa di un manufatto

➤ L'identità viene "normalmente" controllata attraverso:

- ~~• Geometria del manufatto~~
- ~~• Peso del manufatto~~
- ~~• Colori delle superfici~~
- ~~• Tessitura~~

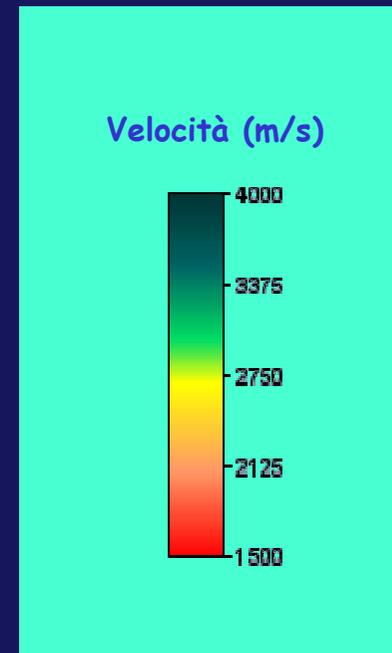
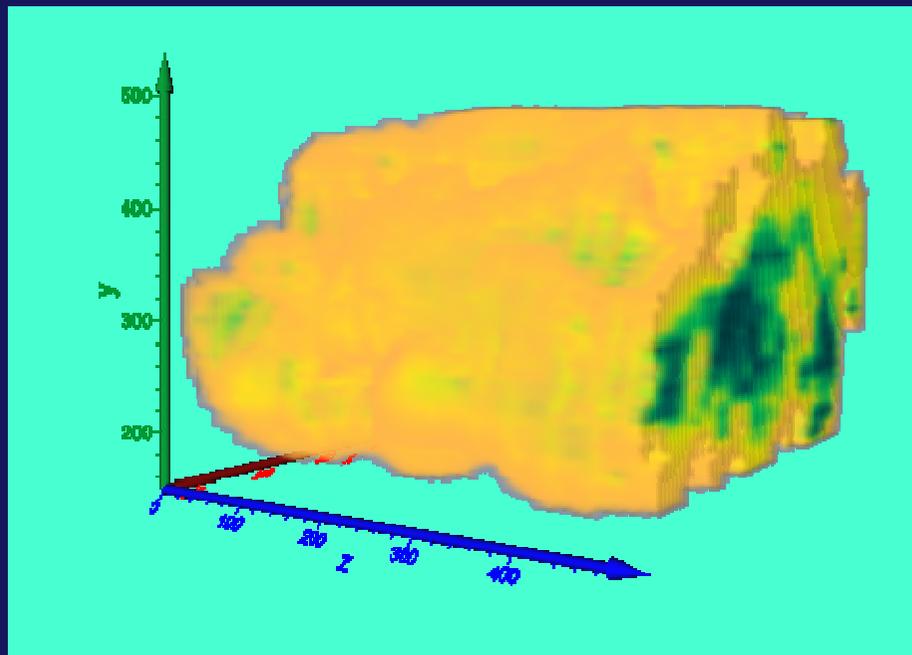


Oggi, la tecnologia Laser riesce a riprodurre con grande precisione tutte le caratteristiche sopradette! La Comet 5 della Steinbichler (interferenza) raggiunge la precisione di 1.2 µm!

➤ **Impronte "fisiche", connesse con proprietà fisiche caratteristiche dell'interno dei manufatti, che possono essere rilevate usando tecniche non invasive (per esempio, microgeofisiche):**

- Impronta sonora (o ultrasonica) (*tomografia sonora* o *spettro sonico*);
- Impronta elettrica (ERT, *tomografia elettrica*);
- Impronta elettromagnetica (*tomografia radar* sia in modalità di *trasmissione* sia in quella di *riflessione*).

Dalla tomografia sonora alla ... 2. La tomografia ultrasonica (US)



Intervento per il restauro



Togato di Petrarà (I sec. d.C.)

Ritrovata nel 2003, a Locri (RC),
spezzata in tre parti
alta circa m 2,16

Dal marzo al luglio 2008 sono state eseguite le operazioni di restauro del manufatto per ricomporre la statua e porla nuovamente in posizione eretta.

Intervento per il restauro



di Petrarcha (I sec. d.C.)

nel 2003,
pezzata in tre
alta circa m

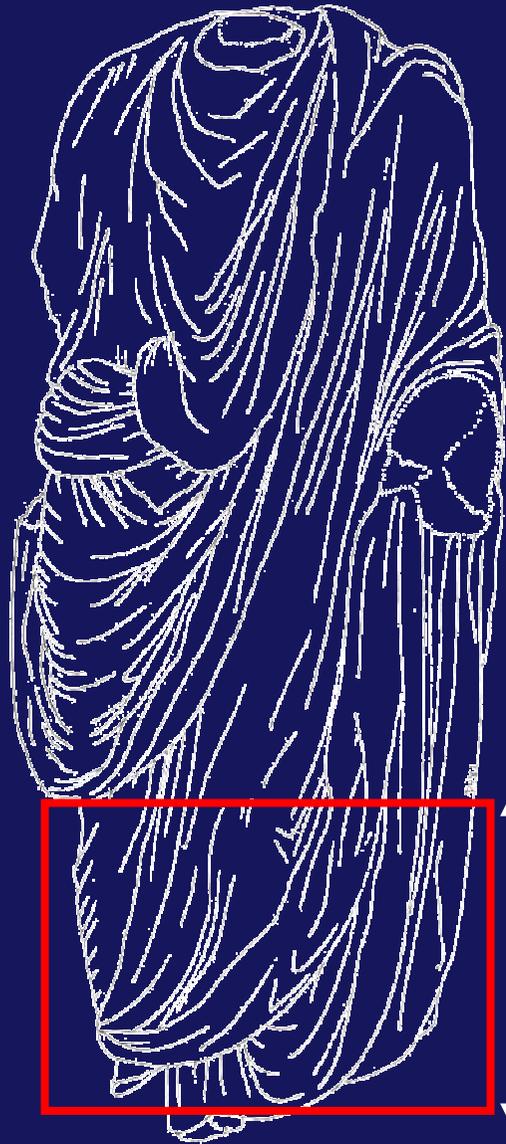


Dal marzo al luglio 2008 sono state svolte le
operazioni di restauro del manufatto.
La statua è stata pulita e
statua e porla nuovamente in



la

Tomografia sonica ed ultrasonica



49 cm

sonica



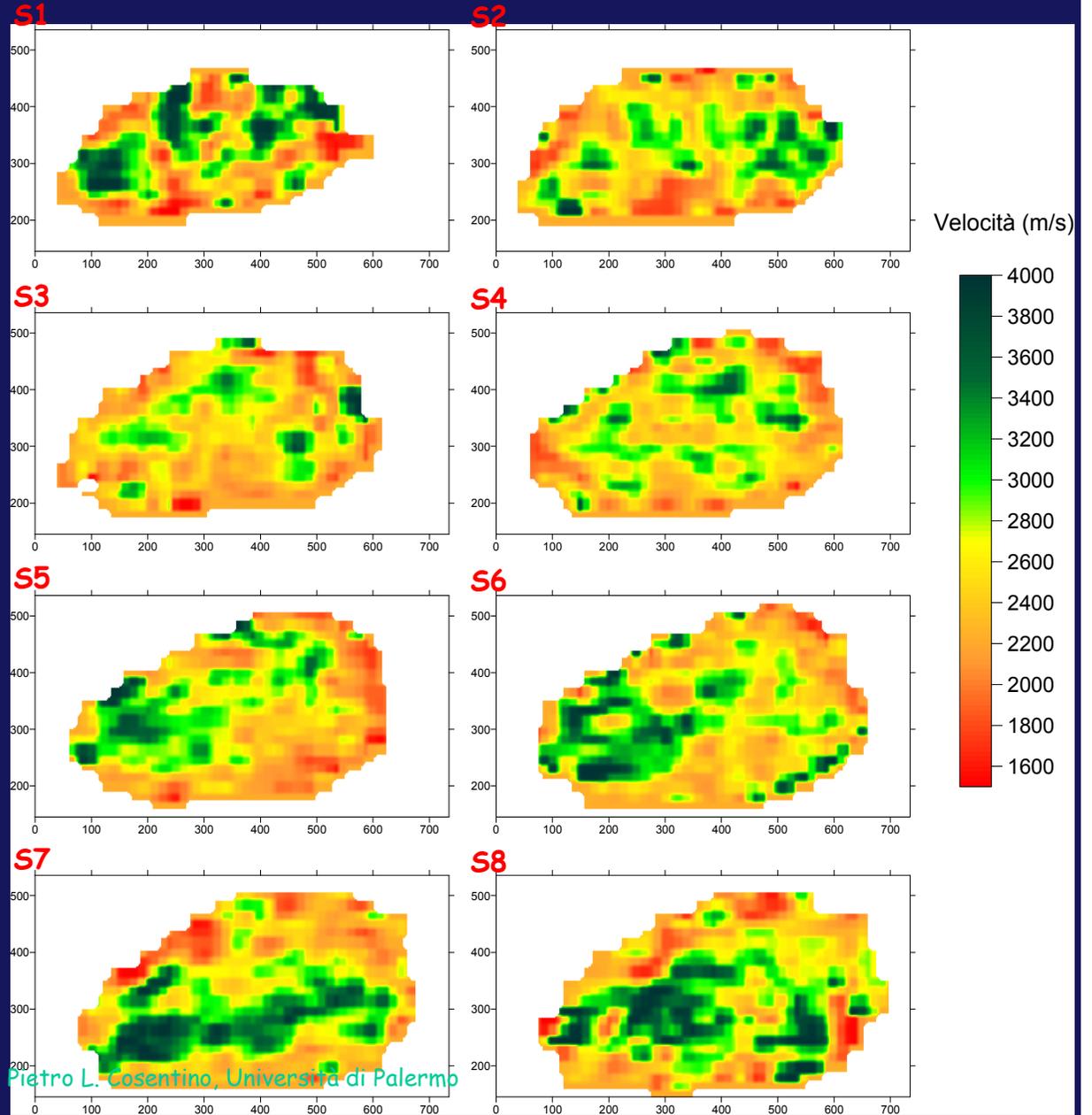
ultrasonica



L'inversione con software GeotomCG



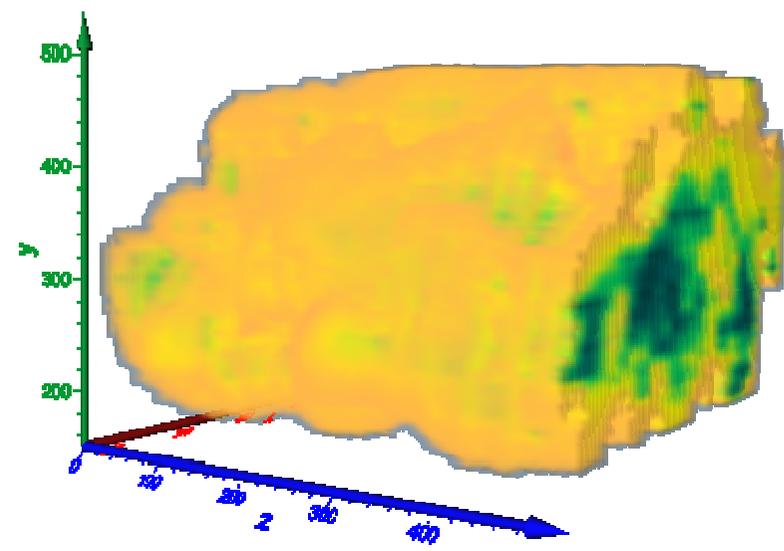
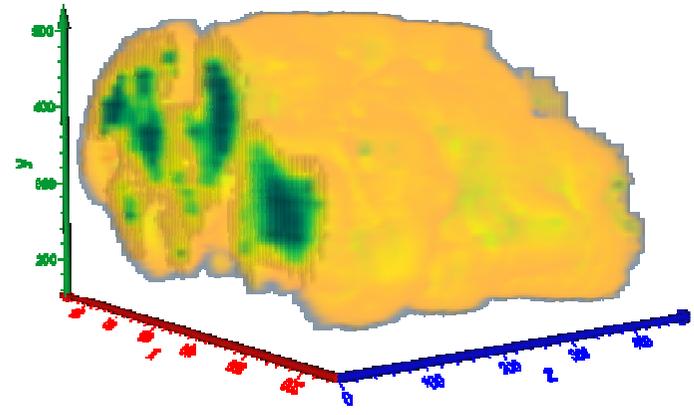
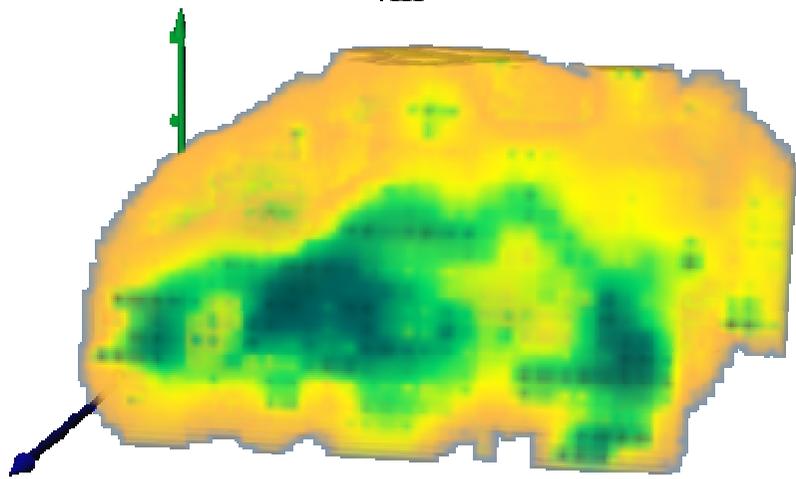
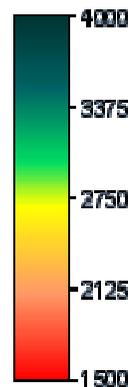
1/01/2004



Modello 3D

(Voxler software)

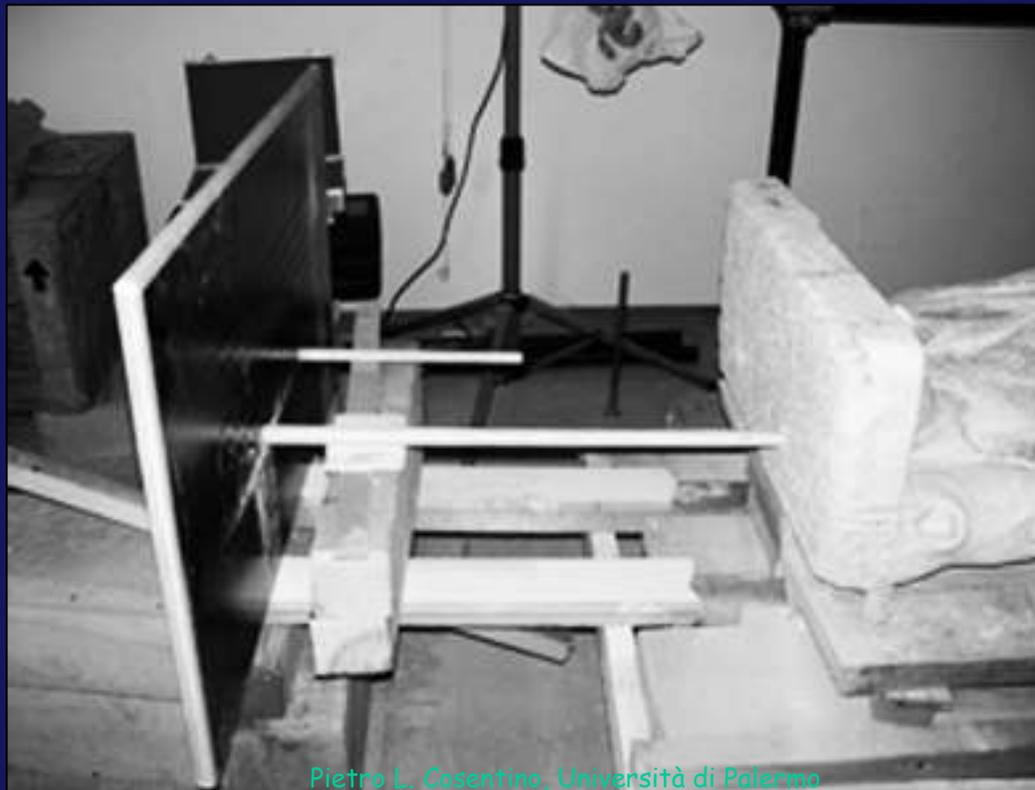
Velocità (m/s)



Intervento di restauro

Sono stati eseguiti due fori:

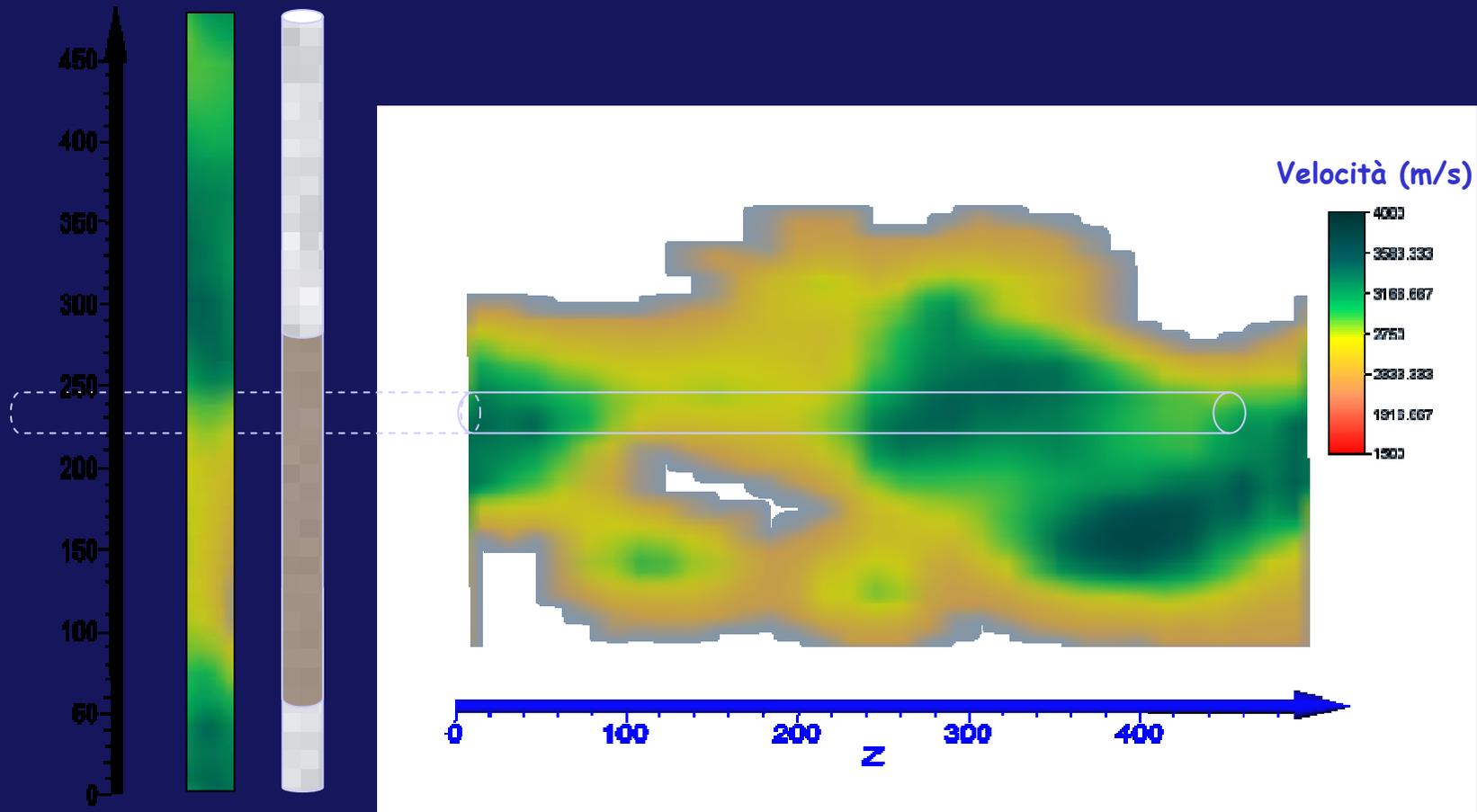
- il foro più grande (per il perno) è stato realizzato con una profondità di 720 mm per superare la lesione e raggiungere una zona solida del marmo;
- il foro del tenone antirotazione è stato limitato a 350 mm.



1/01/2004

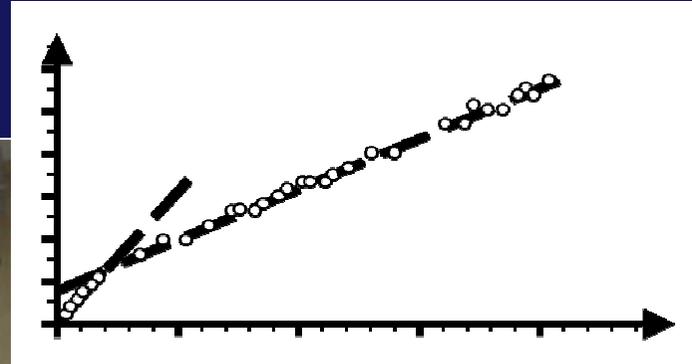
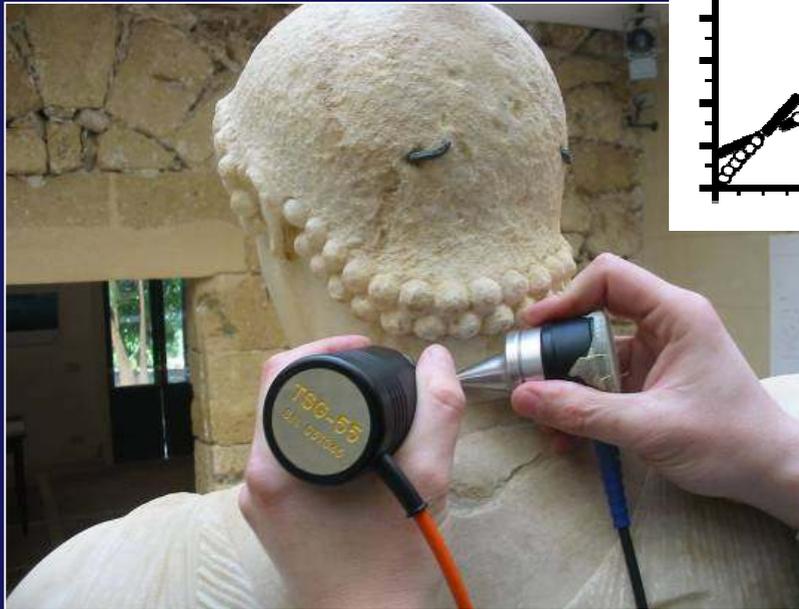
Pietro L. Cosentino, Università di Palermo

Carota prelevata per l'inserimento del perno



Dalla Tomografia US e dalla sismica a
rifrazione a ...

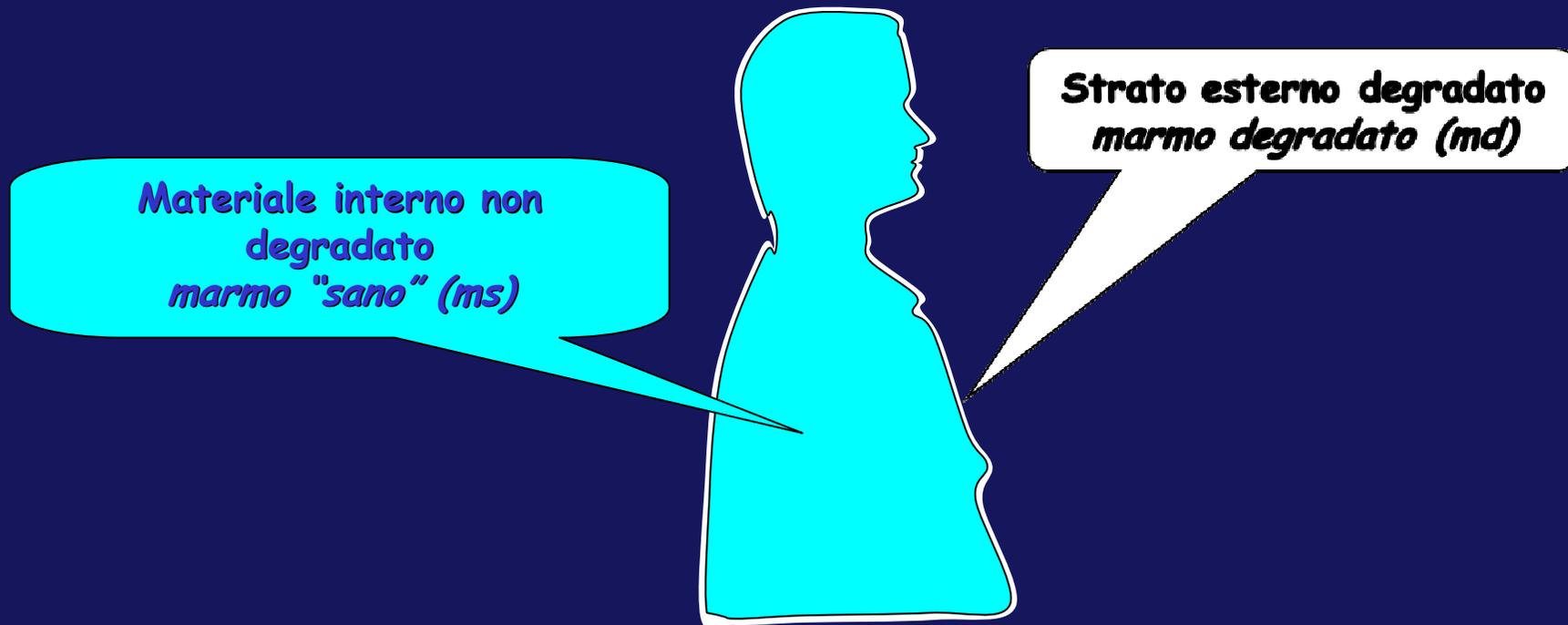
3. La dromocrona tomografica globale



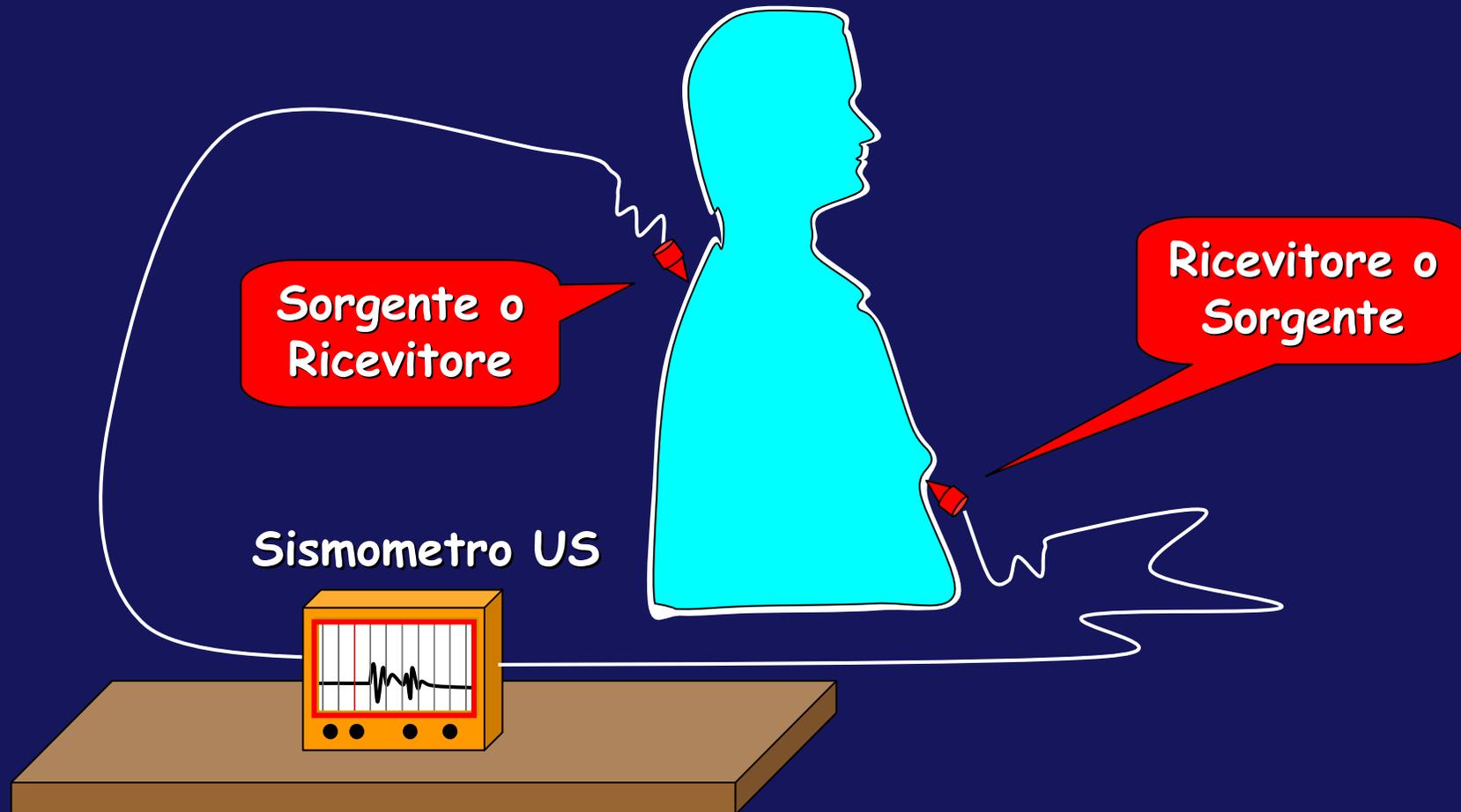
Misura non invasiva dello strato esterno degradato di un oggetto (statua in marmo, pietra, ecc.)

Premodello: corpo omogeneo (velocità delle onde elastiche) con uno strato esterno degradato, a velocità più bassa. Si ipotizza che velocità e spessore dello strato siano omogenee (o quasi) su tutto l'oggetto.

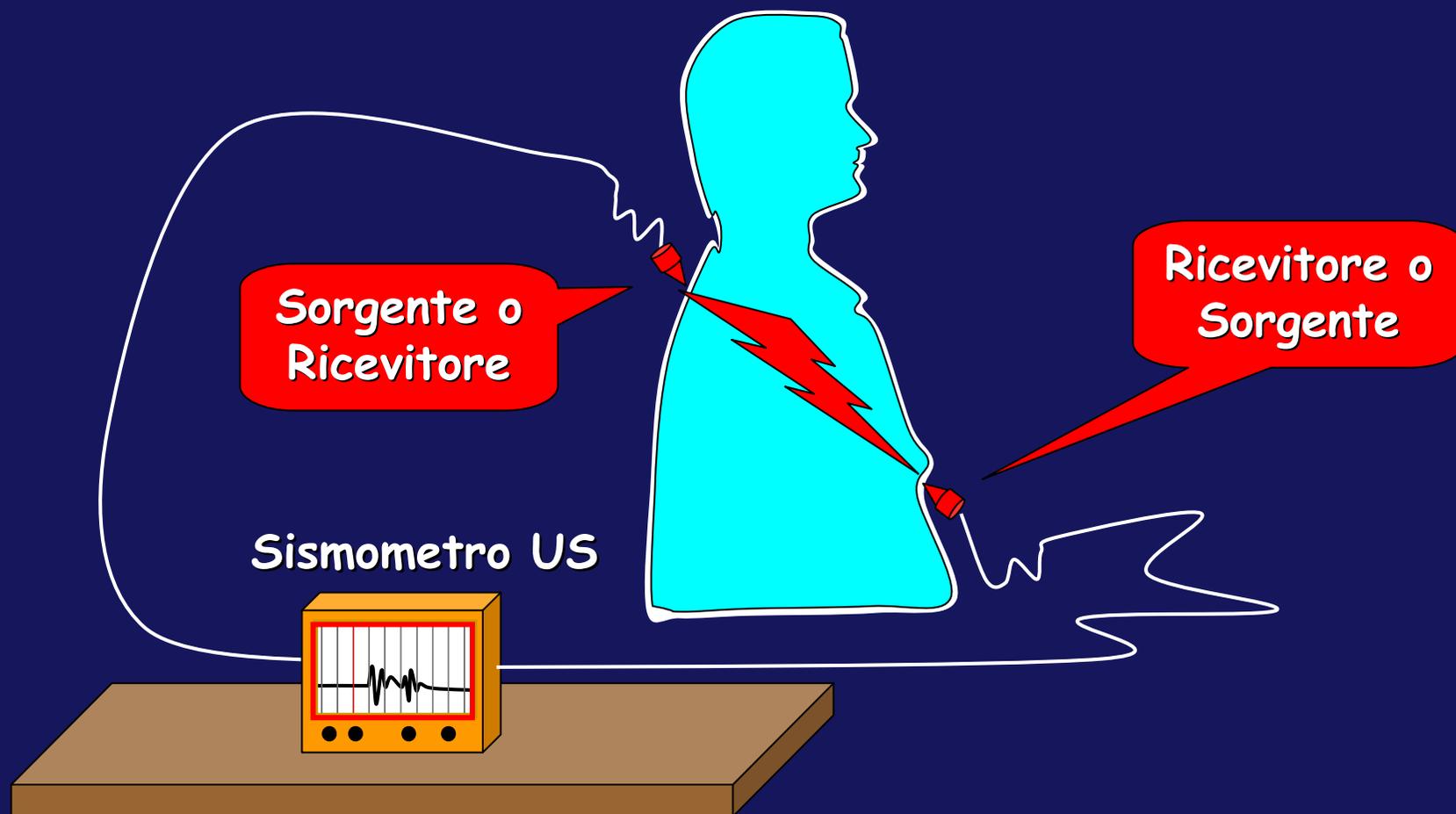
Parametro indagato: Velocità delle onde elastiche, a frequenza sonica (1.000 - 10.000 Hz) o ultrasonica (20 - 60 kHz).



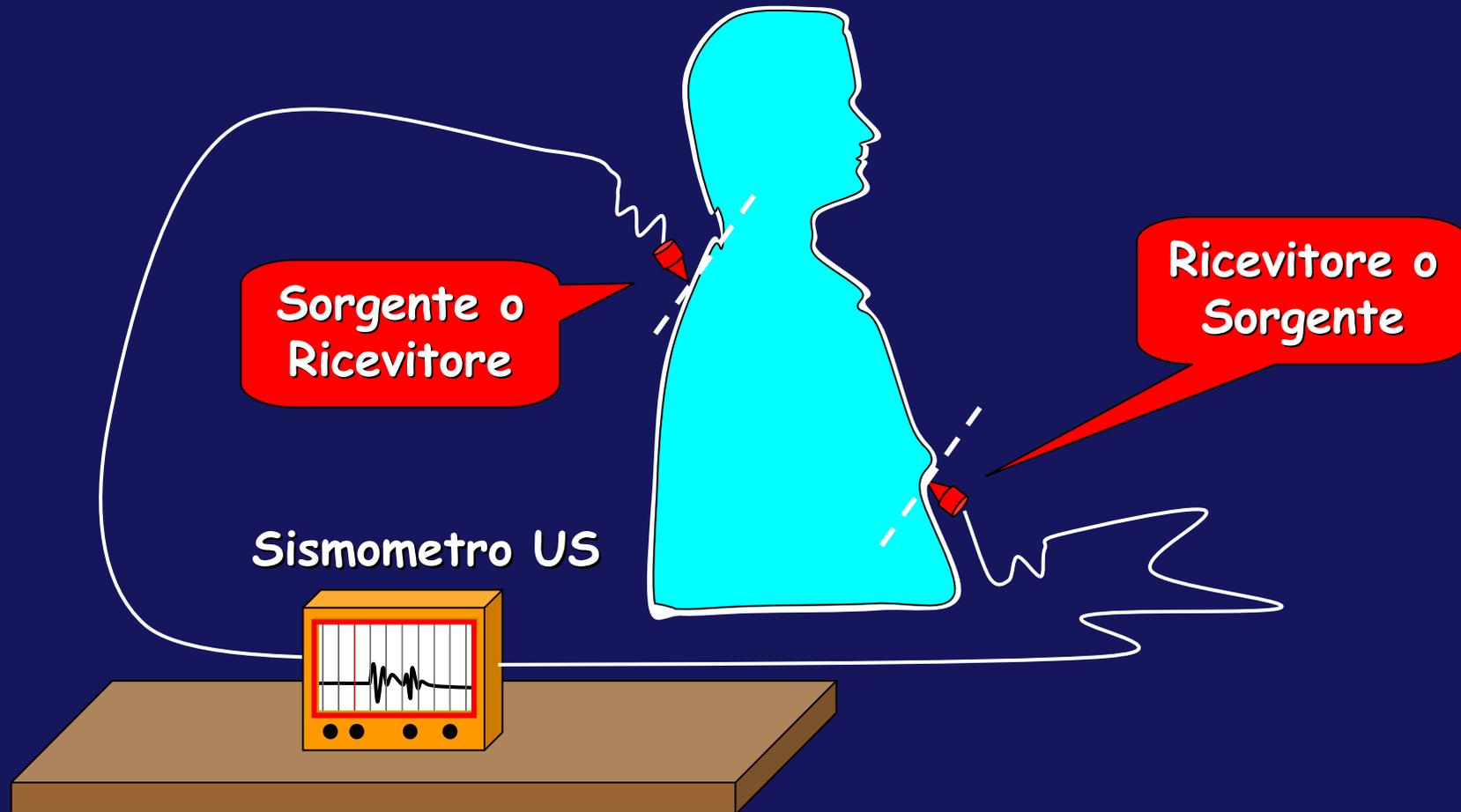
Tecnica delle misure "lontane"



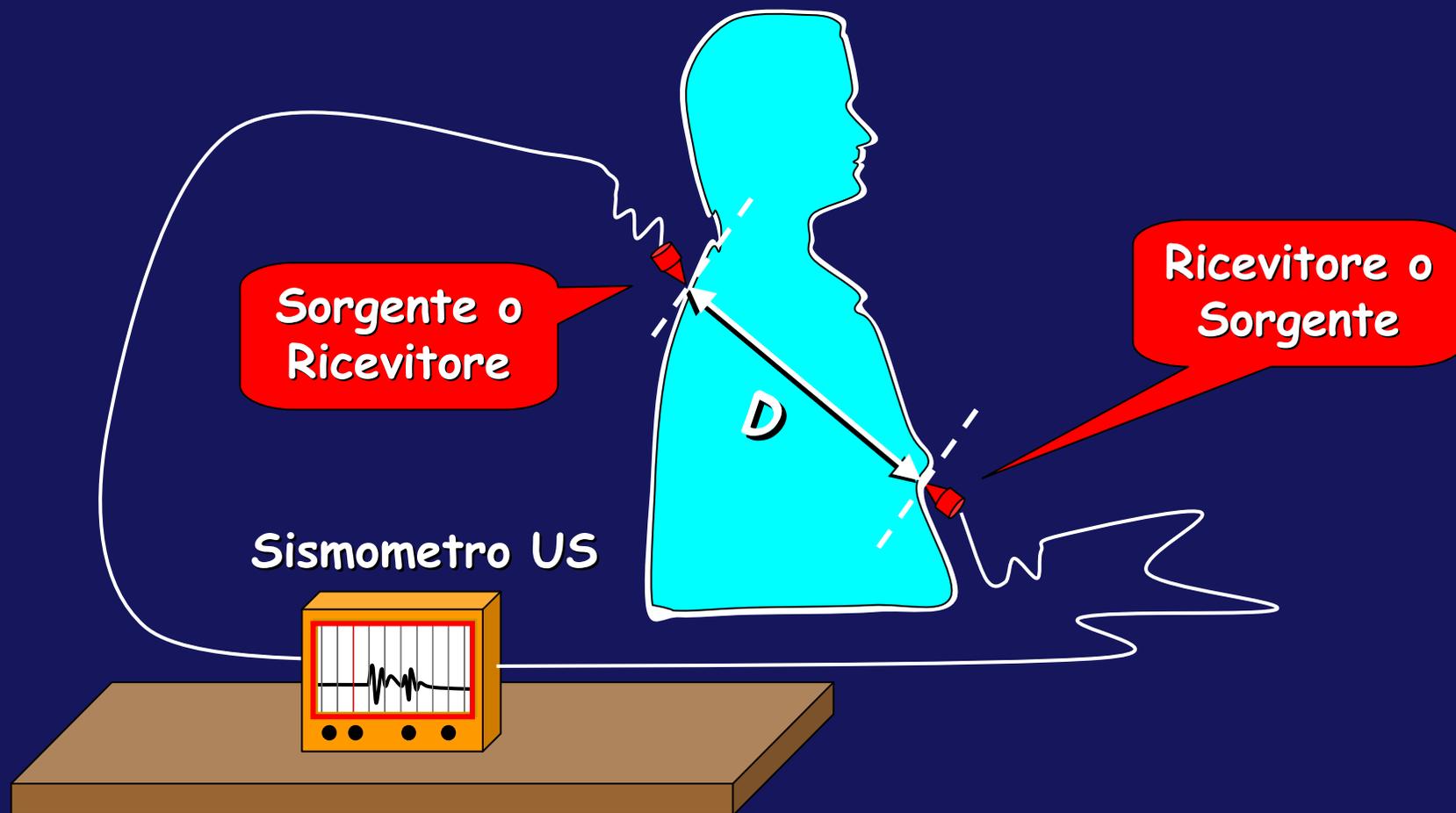
Tecnica delle misure "lontane"



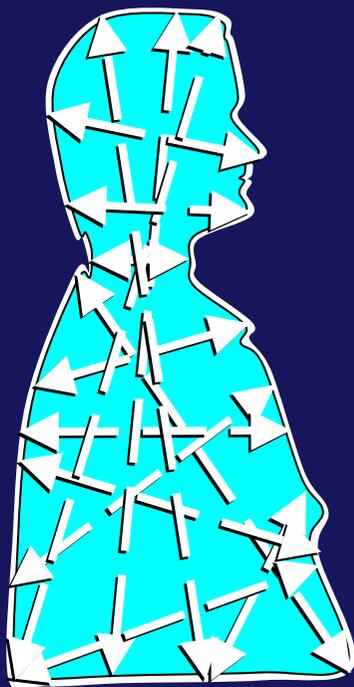
Tecnica delle misure "lontane"



Tecnica delle misure "lontane"



Misura dei percorsi "lontani" che trapassano due volte lo strato degradato



Se la retta passa per l'origine non c'è lo strato esterno "lento"



$$T = (X - 2 S_{md}) / V_{ms} + 2 S_{md} / V_{md}$$



$$T = X / V_{ms} + 2 S_{md} / V_{md} - 2 S_{md} / V_{ms}$$

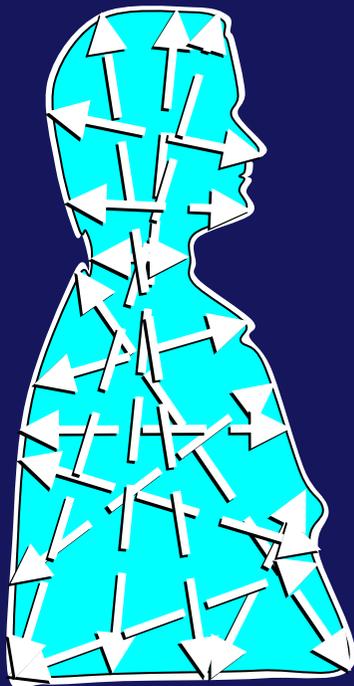
$$T = X / V_{ms} + 2 S_{md} (1/V_{md} - 1/V_{ms})$$



$$T = 2 S_{md} (V_{ms} - V_{md}) / V_{md} V_{ms} + X / V_{ms}$$



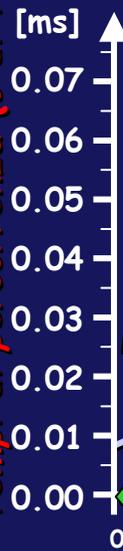
Misura dei percorsi "lontani" che trapassano due volte lo strato degradato



$$T_i = 2 \cdot S_{md} \cdot (V_{ms} - V_{md}) / V_{ms} \cdot V_{md}$$

... che non
... strato esterno "lento"

Tempi di percorrenza (o di volo)



Impossibile

Campo delle distanze

Dimensioni manufatto

Distanze del ricevitore dalla sorgente

$$T = (X - 2 S_{md}) / V_{ms} + 2 S_{md} / V_{md}$$

$$T = X / V_{ms} + 2 S_{md} / V_{md} - 2 S_{md} / V_{ms}$$

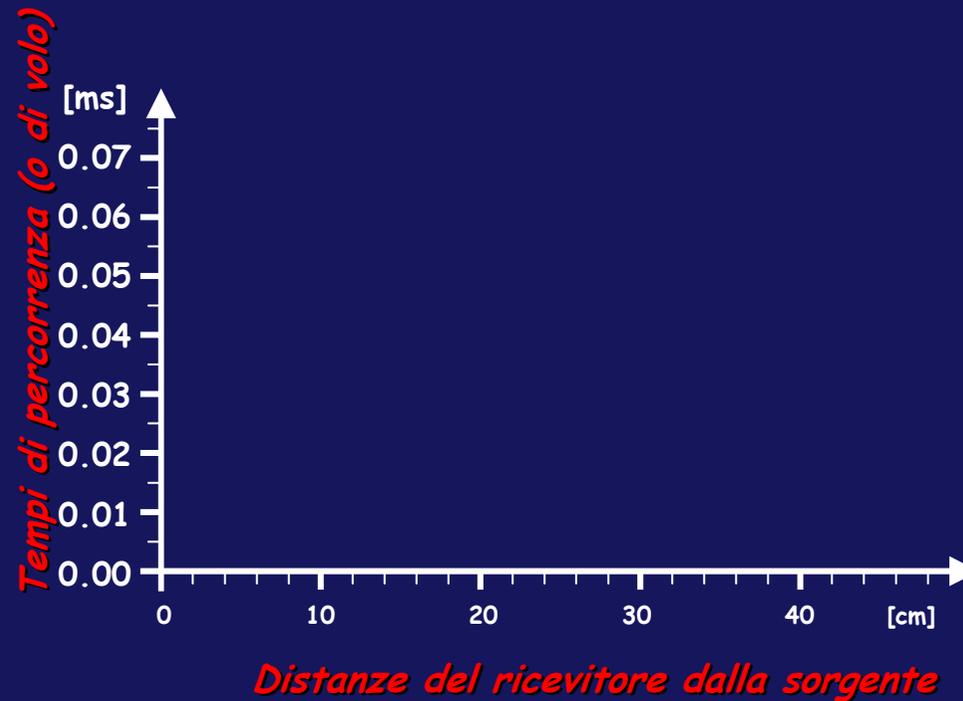
$$T = X / V_{ms} + 2 S_{md} (1 / V_{md} - 1 / V_{ms})$$

$$T = 2 S_{md} (V_{ms} - V_{md}) / V_{md} V_{ms} + X / V_{ms}$$

Misura dei percorsi "vicini" che viaggiano nello strato degradato

(si acquisisce anche qualche arrivo di onde criticamente rifratte)

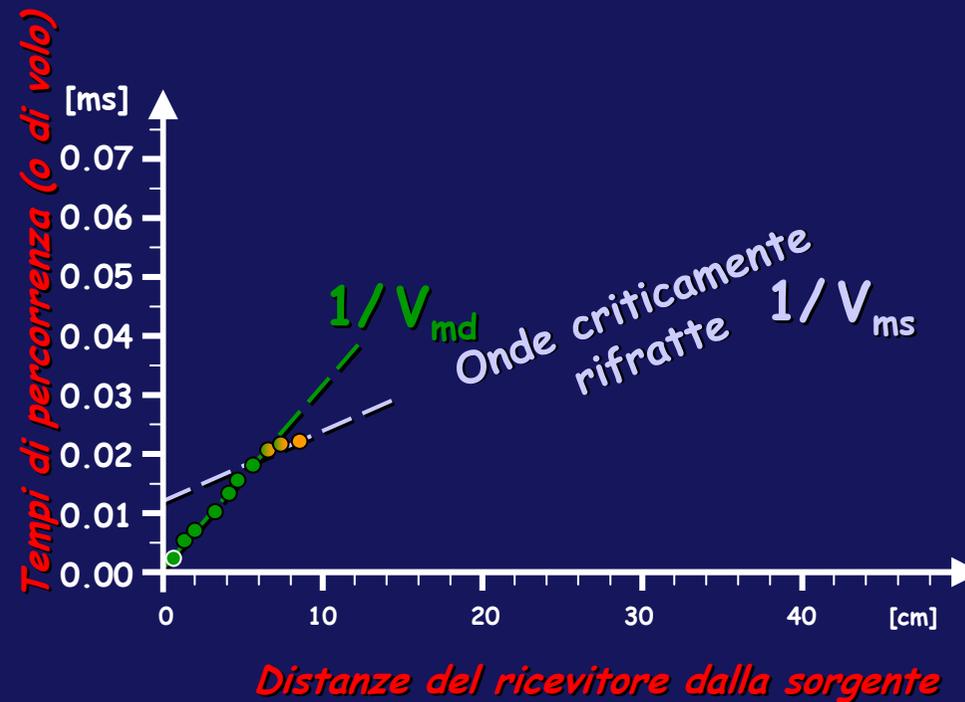
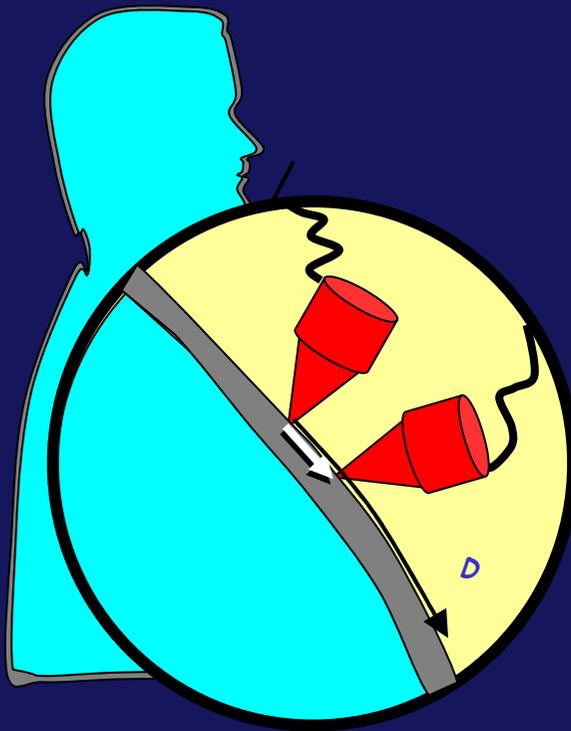
$$T = X / V_{md}$$



Misura dei percorsi "vicini" che viaggiano nello strato degradato

(si acquisisce anche qualche arrivo di onde criticamente rifratte)

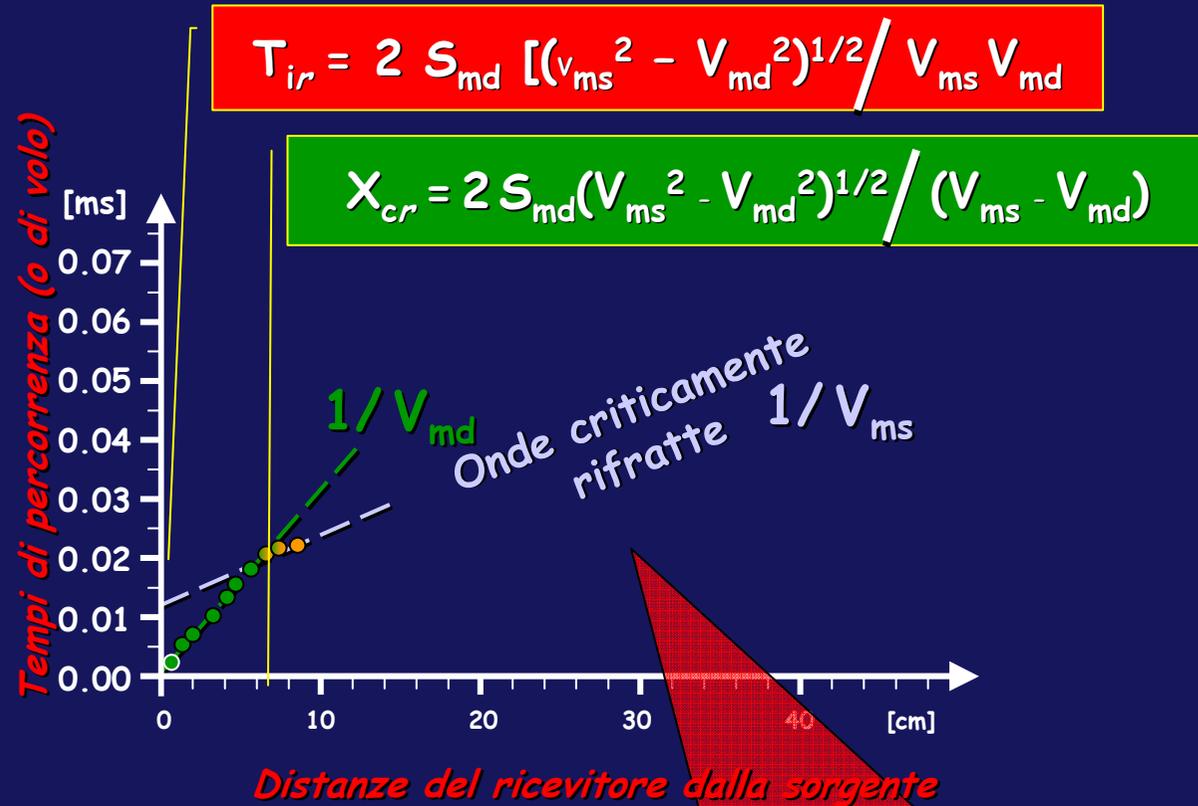
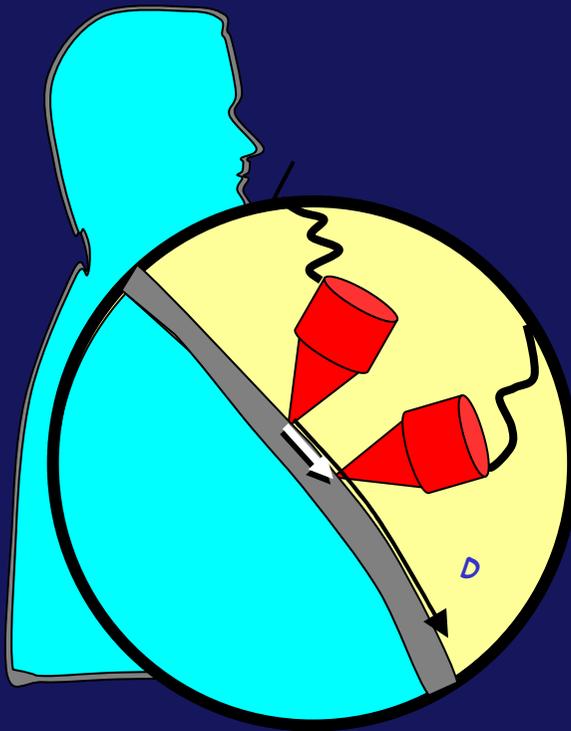
$$T = X / V_{md}$$



Misura dei percorsi "vicini" che viaggiano nello strato degradato

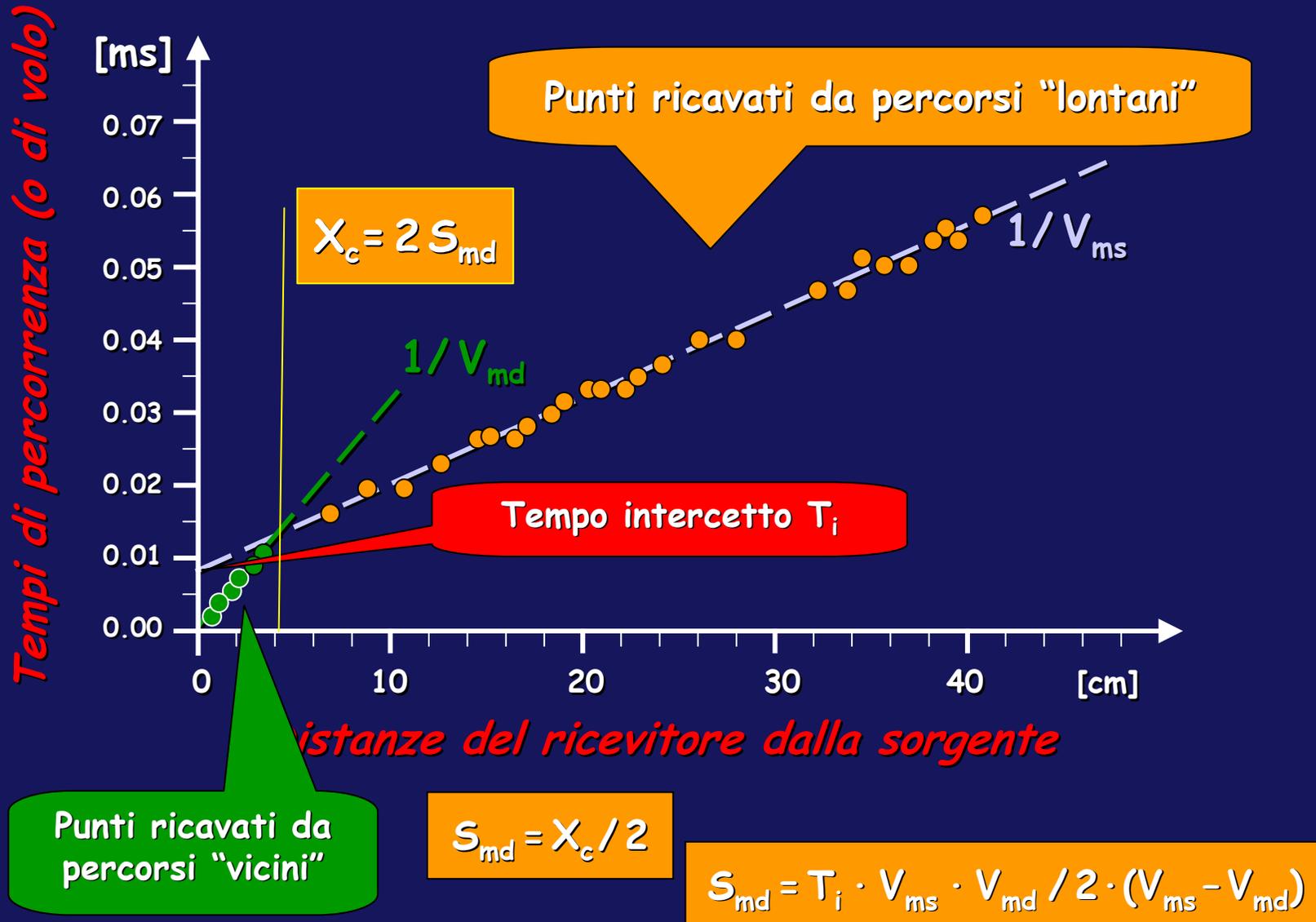
(si acquisisce anche qualche arrivo di onde criticamente rifratte)

$$T = X / V_{md}$$

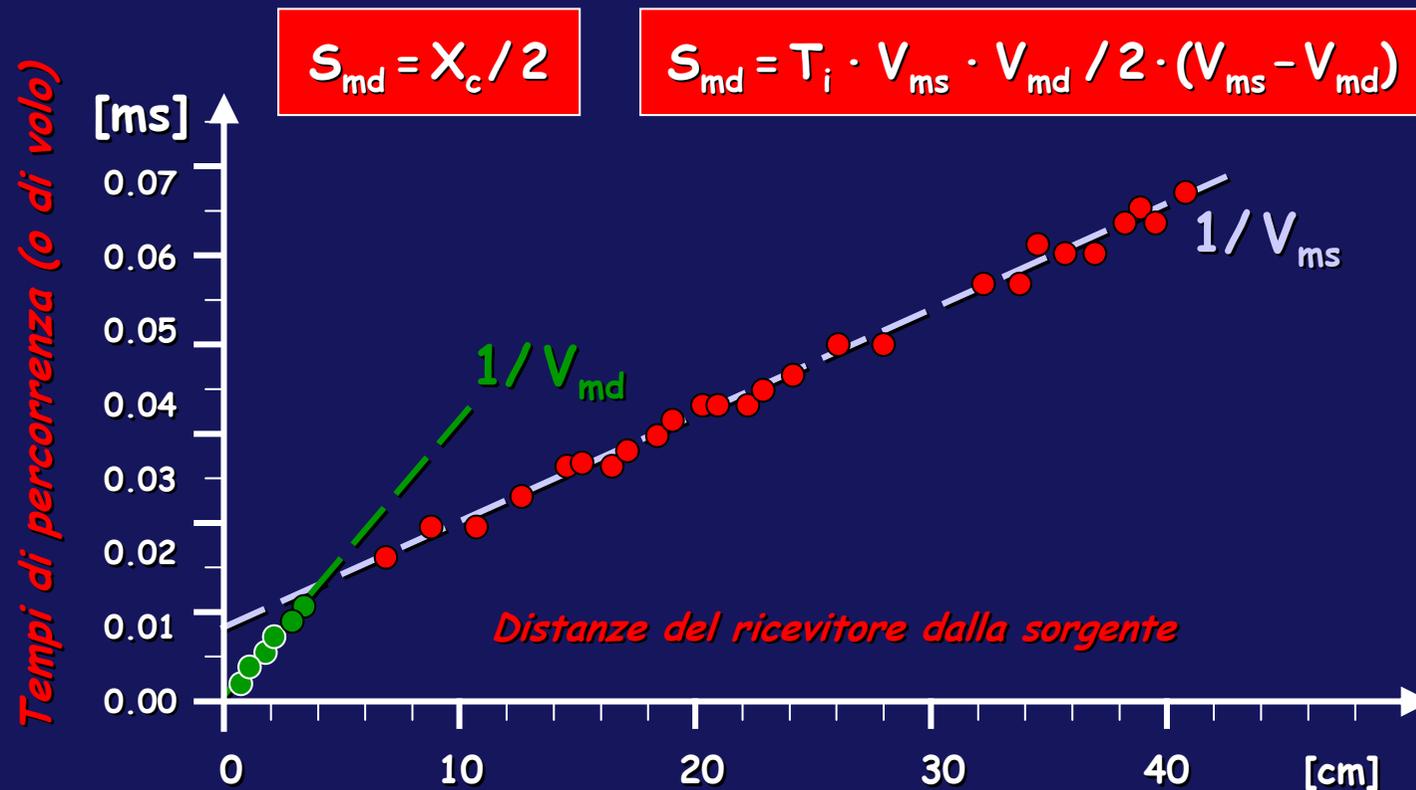


Stessa pendenza dei tragitti "lontani" con tempo di intercetta T_{ir} e punto critico X_{cr} differenti

Dromocrona Tomografica Globale



Ulteriori informazioni dalla deviazione standard

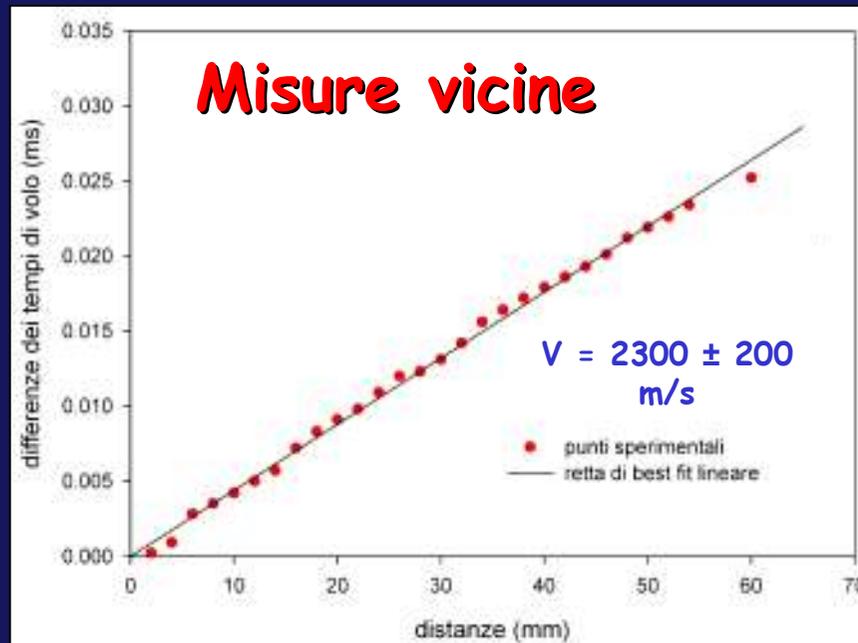


Infine, il valore della deviazione standard dei punti relativi alla linea azzurra (punti lontani) dipende sia dalla disomogeneità del marmo interno "sano" sia dalle disomogeneità dello spessore dello strato esterno.

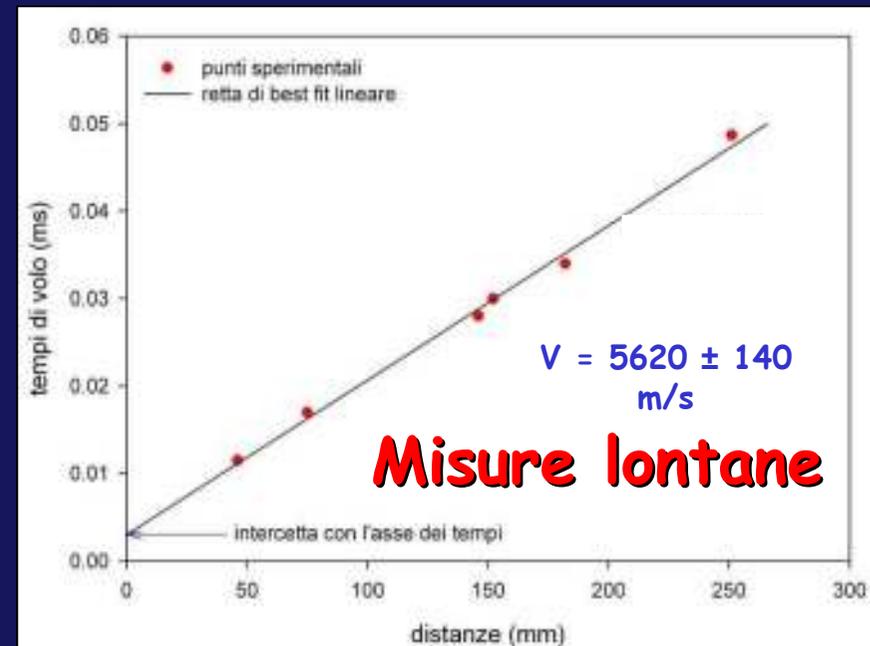
Il valore della deviazione standard dei punti relativi alla linea verde dipende invece dalle disomogeneità di velocità dello strato esterno, peraltro abbastanza "normali".

Possono infine valutarsi disomogeneità specificamente localizzate (analizzando la localizzazione sul campione dei punti di maggiore deviazione).

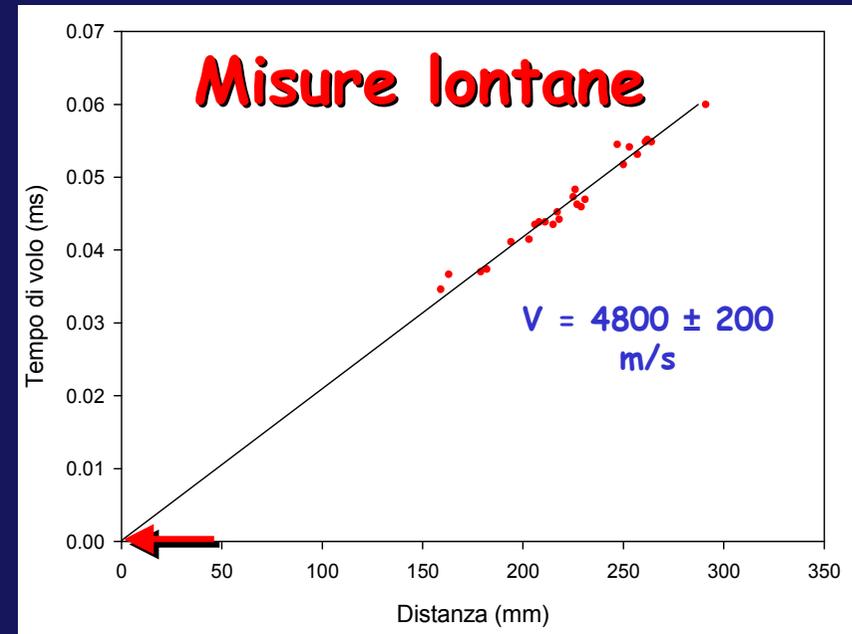
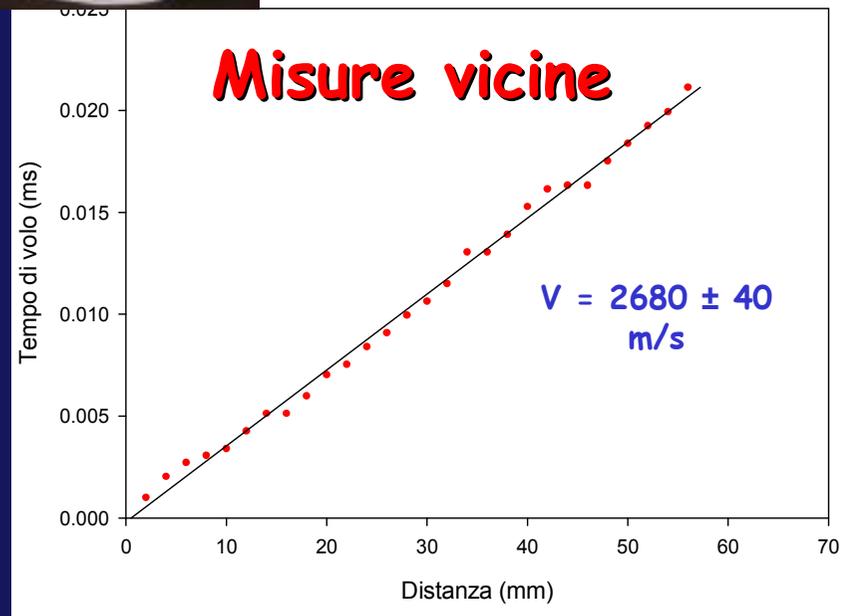
DTG sul S. Michele Arcangelo (Scuola Gaginiana, XVI sec.)



Spessore_{md} = 6 ± 2 mm

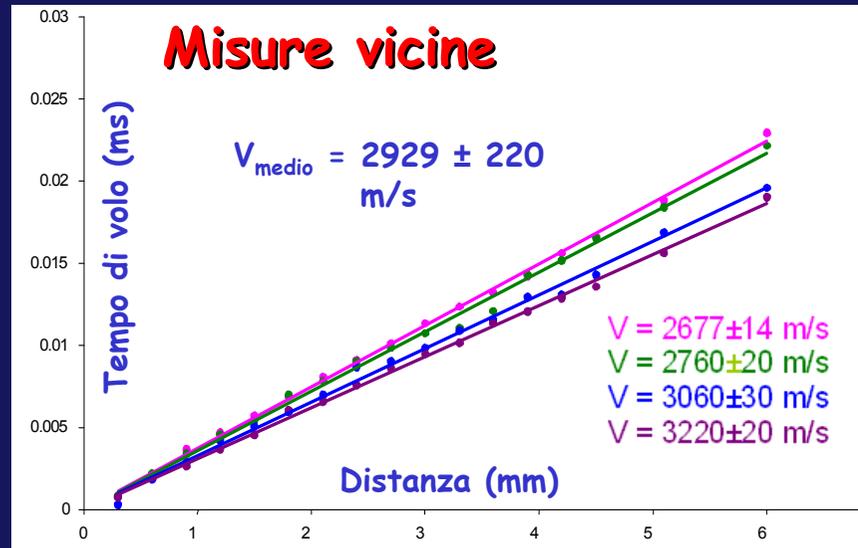


DTG sulla Venere Anadiomene (II sec. d. C.)

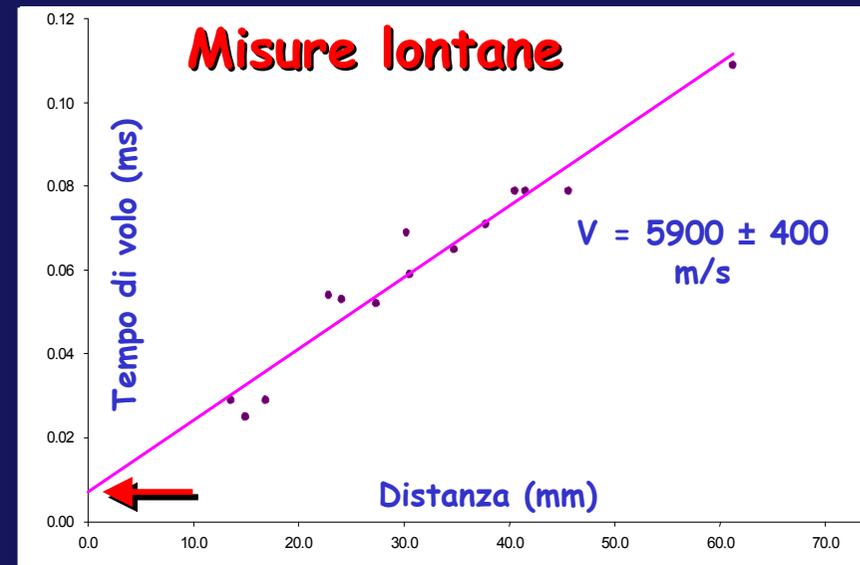


Spessore_{md} = 0 ± 2 mm

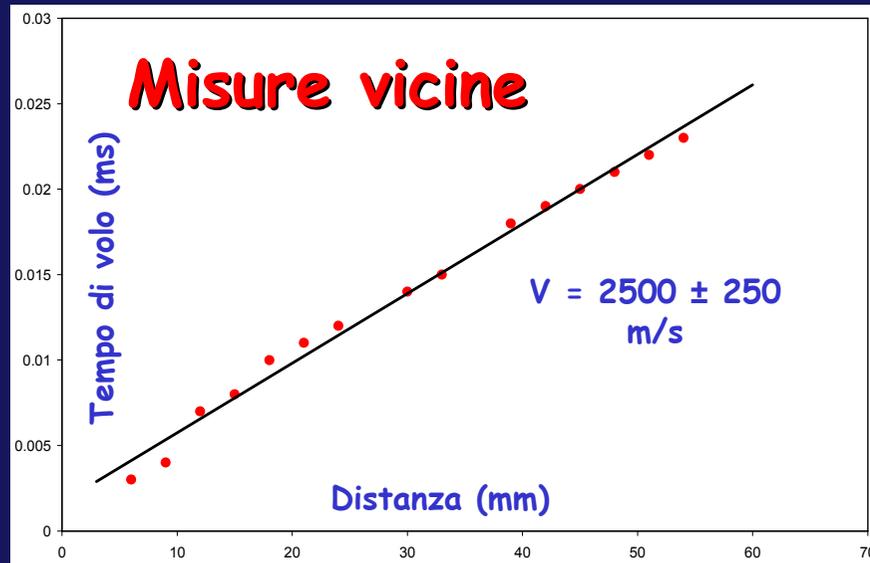
DTG sul giovinetto di Mothia



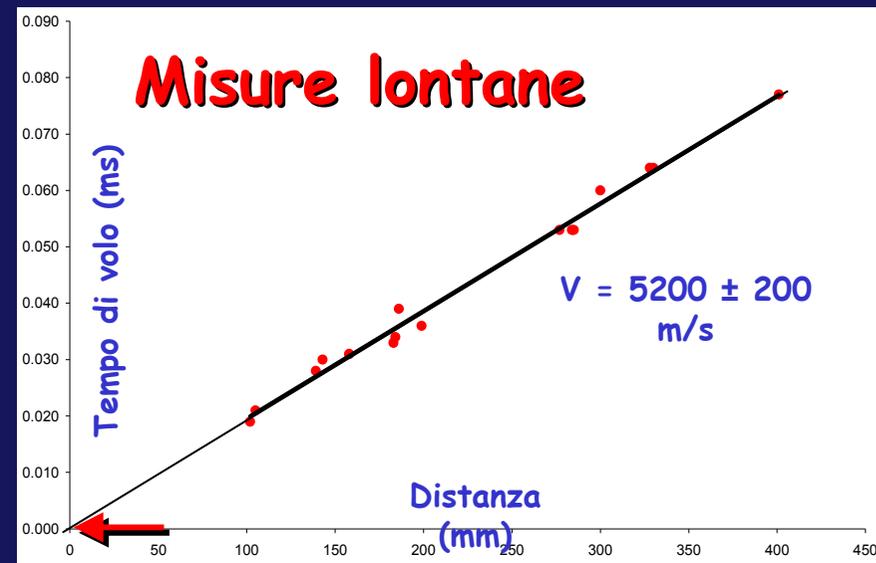
Spessore_{md} = 20 ± 12 mm



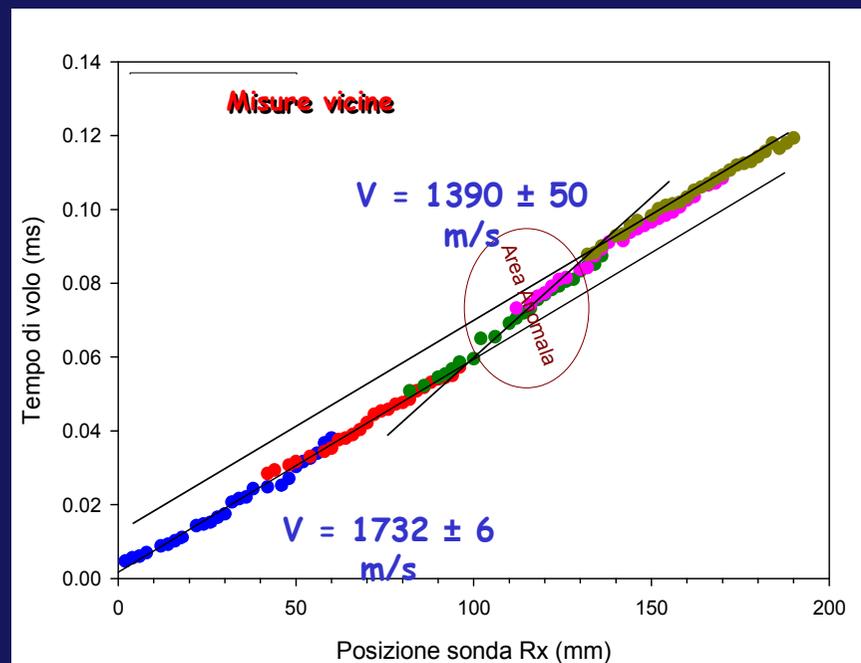
GTT sull'Eleonora d'Aragona (F. Laurana, XV sec.)



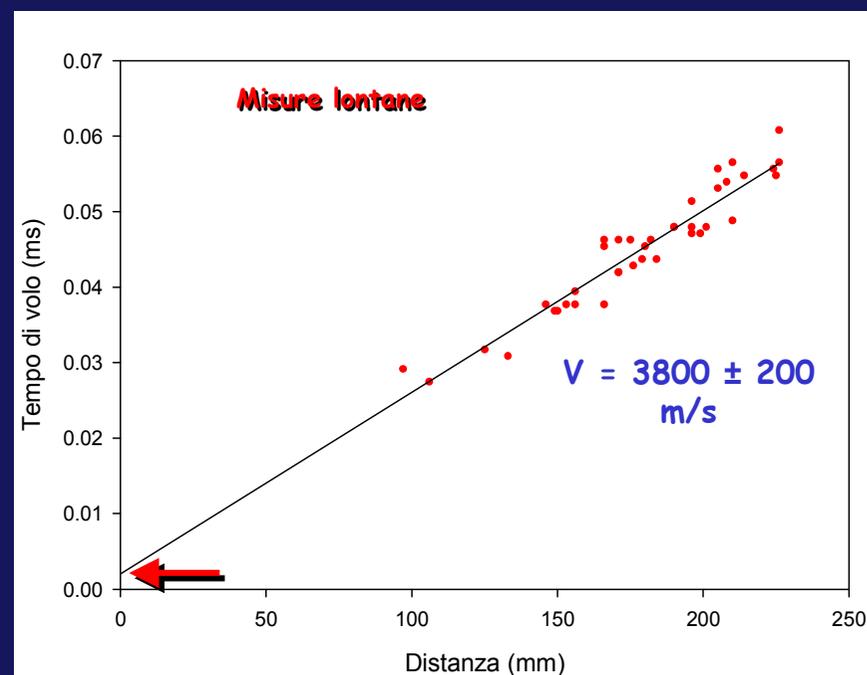
Spessore_{md} = 0.5 ± 1 mm



GTT sulla testa di giovinetto (F. Laurana, XV sec.)



Spessore_{md} = 6 ± 2 mm



Dalle tomografie geoelettriche 2D a ...
4. Lo stendimento MYG a 256 o 1024 canali



Tomografia geoelettrica (ERT) full 3D



Elettrodo da muratura



Palazzo Steri,
Palermo

 GF Instruments, s.r.o. Czech Republic
Geophysical Equipment and Services



Chiodi in rame o ferro, 8-15 cm

 Orto Botanico, Palermo



Villa del Casale, Piazza Armerina



Ambulacro della Grande Caccia



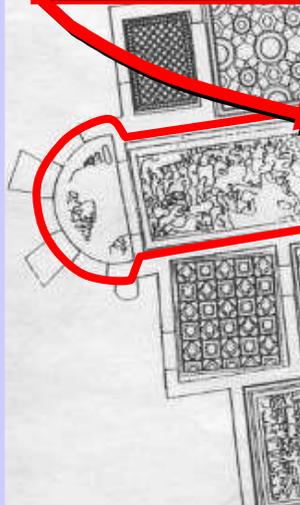
Ambulacro della Grande Caccia



Ambulacro della Grande Caccia



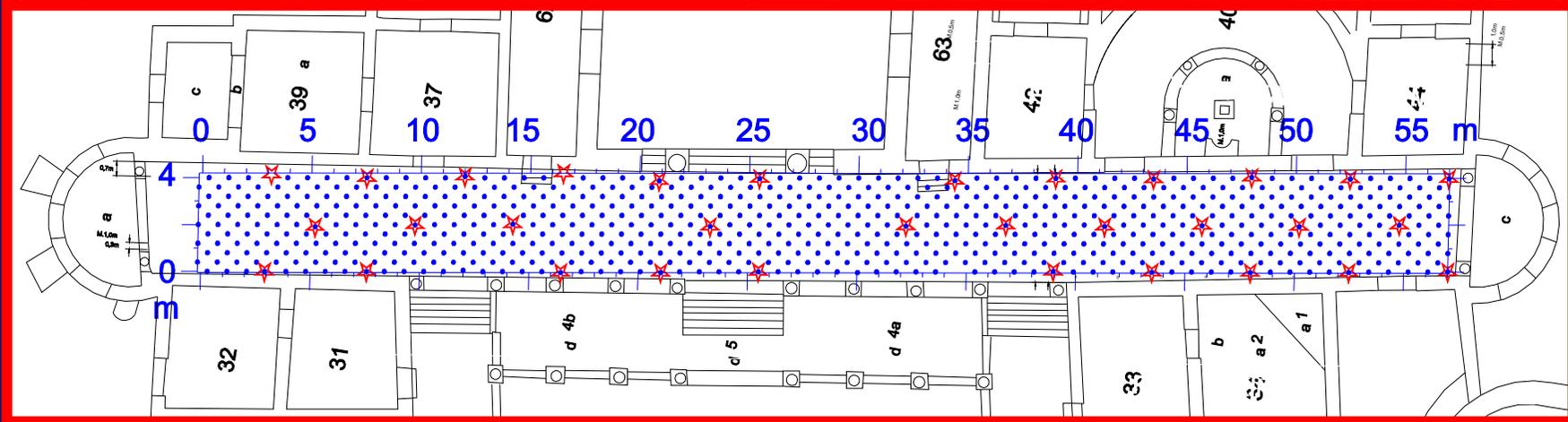
Ambulacro della Grande Caccia



ERT con lo stendimento MYG



ERT con lo stendimento MYG



704 elettrodi (256+256+192)

32 (sui 39 programmati) elettrodi di corrente

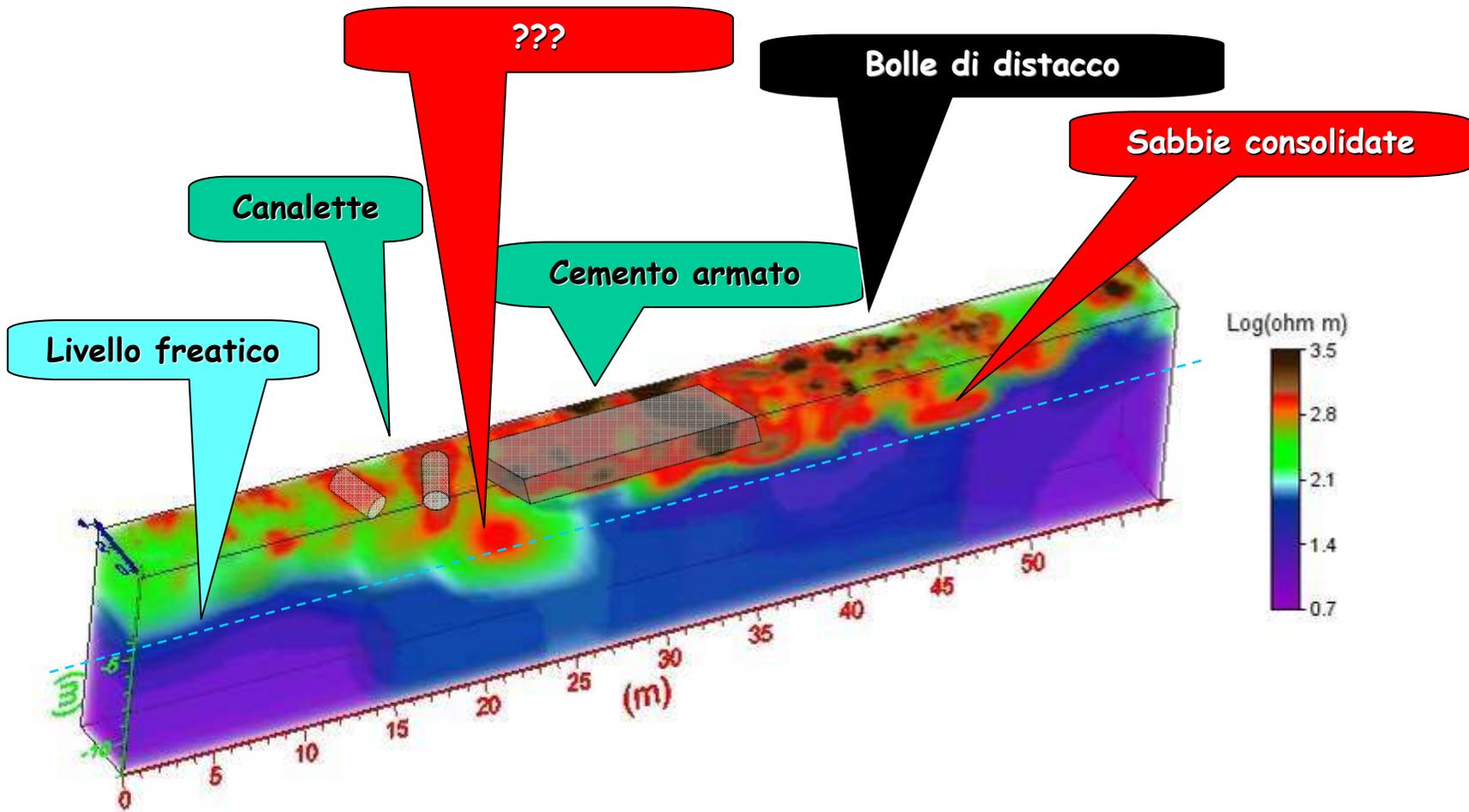
130 immissioni di corrente

91520 misure di resistività apparente

ERT con lo stendimento MYG



Inversione 3D di tutti i dati



Indagini nella sala della fontana della Zisa (Palermo)



Indagini nella sala della fontana della Zisa (Palermo)

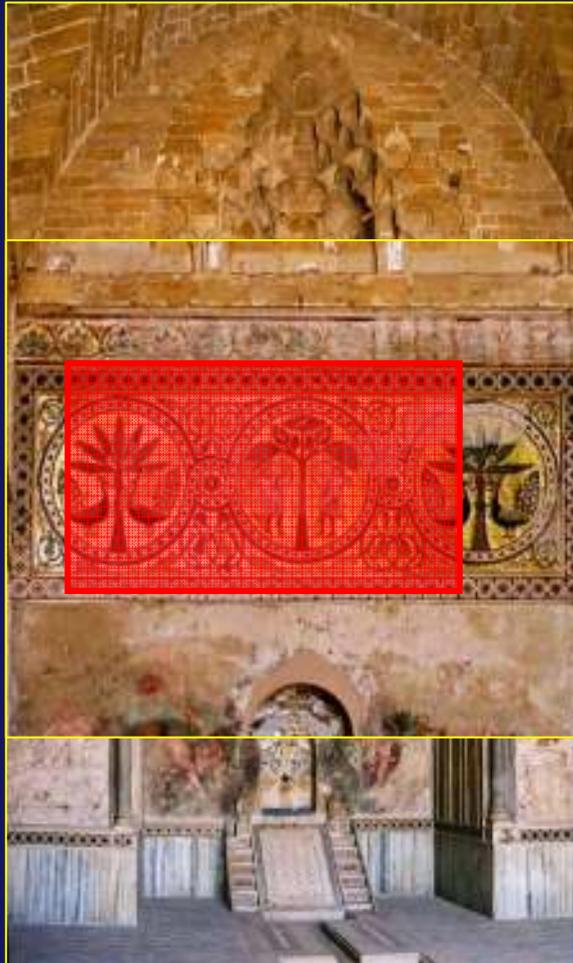
~~Coeradar~~

~~Termografia~~

Geoelettrica 3D



Indagini nella sala della fontana della Zisa (Palermo)



~~Coeradar~~

~~Termografia~~

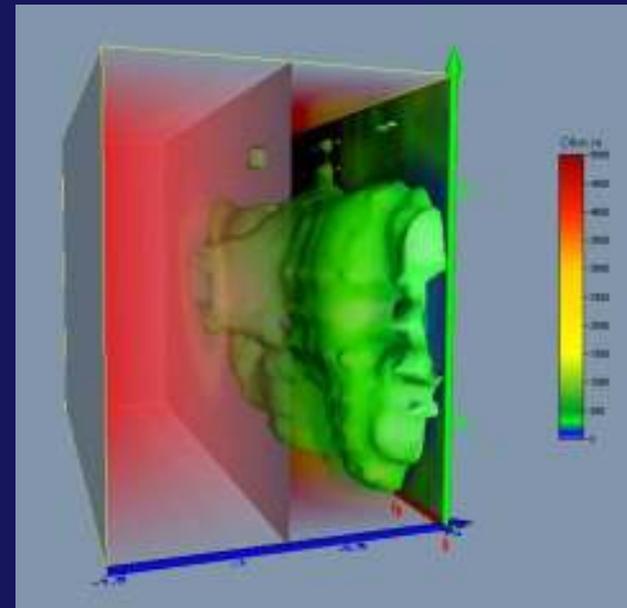
Geoelettrica 3D

Indagini nella sala della fontana della Zisa (Palermo)



Indagini nella sala della fontana della Zisa (Palermo)

Geoelettrica 3D



Indagini geoelettriche eseguite al Castello di Zena (PC) per lo studio delle fondazioni



Planimetria delle indagini ERT (piano interrato)

502 elettrodi di potenziale (x)

Zona fossato

Zona fossato

Zona fossato

ERT1

ERT2

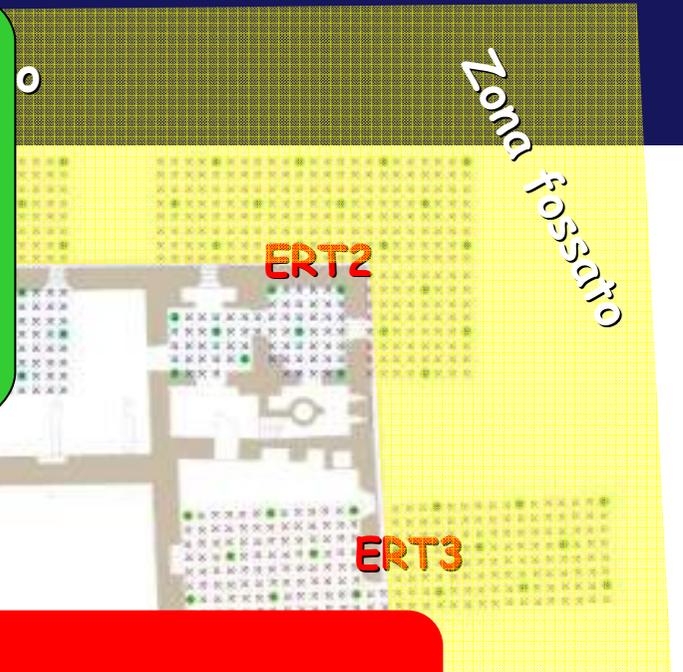
ERT3

33 elettrodi di corrente (o)

MRS 256
GF Instrumens

Planimetria delle indagini ERT (piano interrato)

Tempo di misura con la strumentazione nuova, con 5 cicli di immissione di corrente distinti, 4 secondi di misura per ogni ciclo (2 secondi +I e 2 -I), per un totale di 20 secondi di tempo di misura per ogni immissione di corrente:
circa 20 minuti



ERT 1

elettrodi usati: 502
immissioni di corrente distinte: 61
tempo di misura effettivo: 5 h
misure effettuate (quelle buone): 17560
inversione robusta sui dati e sul modello
3720 blocchi nel modello di inversione
numero iterazioni: 3
errore assoluto: 11%

MRS 256
GF Instrumens

Planimetria delle indagini ERT (piano interrato)

502 elettrodi di potenziale

Zona (x)

Zona fossato

Zona fossato

ERT1

ERT2

ERT 2

elettrodi usati: 236
immissioni di corrente distinte: 31
tempo di misura effettivo: $1 \frac{1}{4}$ h
misure effettuate (quelle buone): 3679
inversione robusta sui dati e sul modello
1680 blocchi nel modello di inversione
numero iterazioni: 3
errore assoluto: 12.5%

T3

MRS 256
GF Instrumens

Planimetria delle indagini ERT (piano interrato)

502 elettrodi di potenziale

Zona (x)

Zona fossato

Zona fossato

ERT1

ERT2

ERT3

ERT 3

elettrodi usati: 319

immissioni di corrente distinte: 49

tempo di misura effettivo: 3 $\frac{1}{4}$ h

misure effettuate (quelle buone): 10685

inversione robusta sui dati e sul modello
2680 blocchi nel modello di inversione

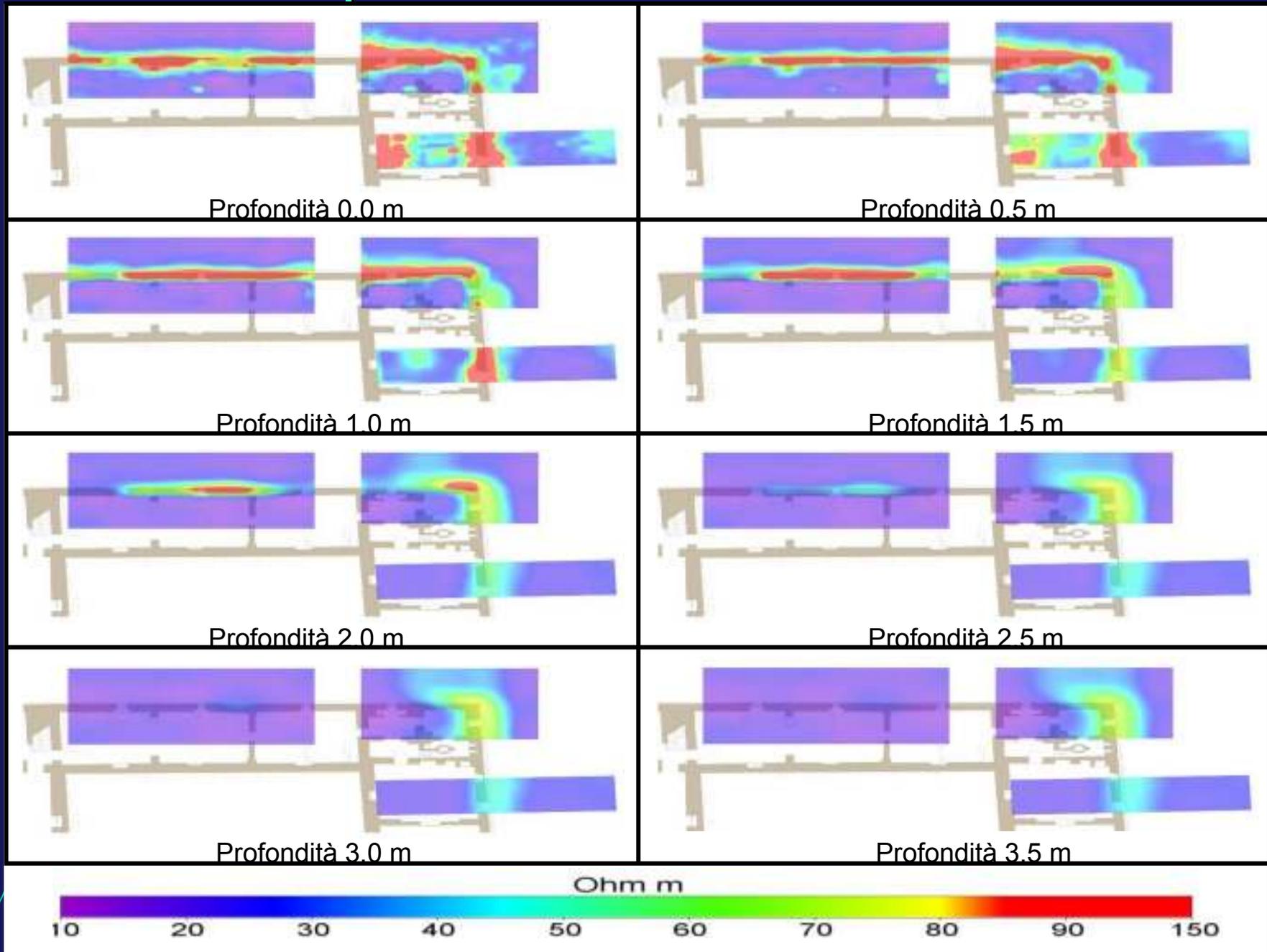
numero iterazioni: 3

errore assoluto: 8%

MRS 256

GF Instrumens

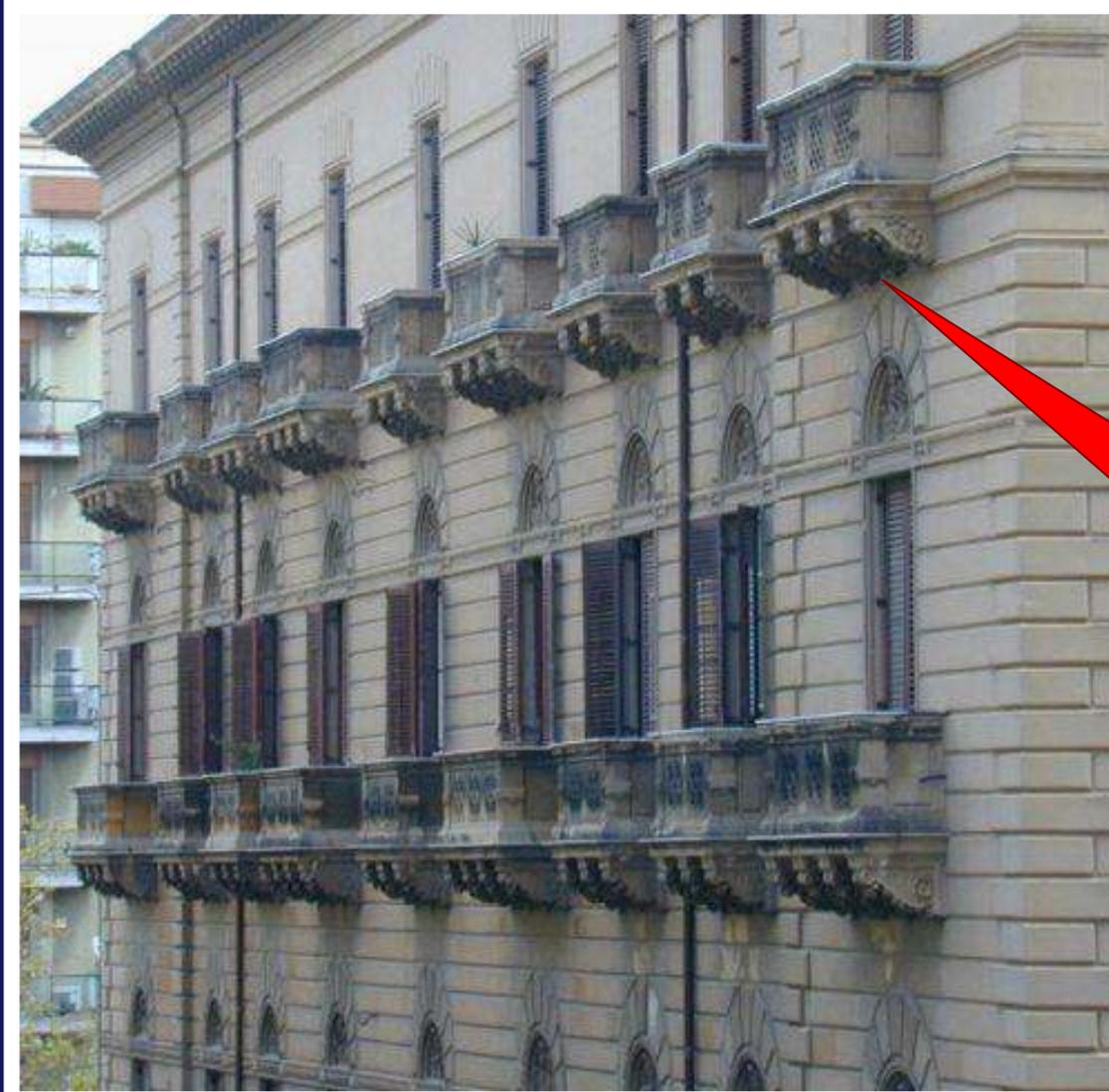
Depth-slices di resistività



Dalle indagini ultrasoniche a ...
5. I controlli GPR rotanti per valutare la
consistenza delle mensole lapidee

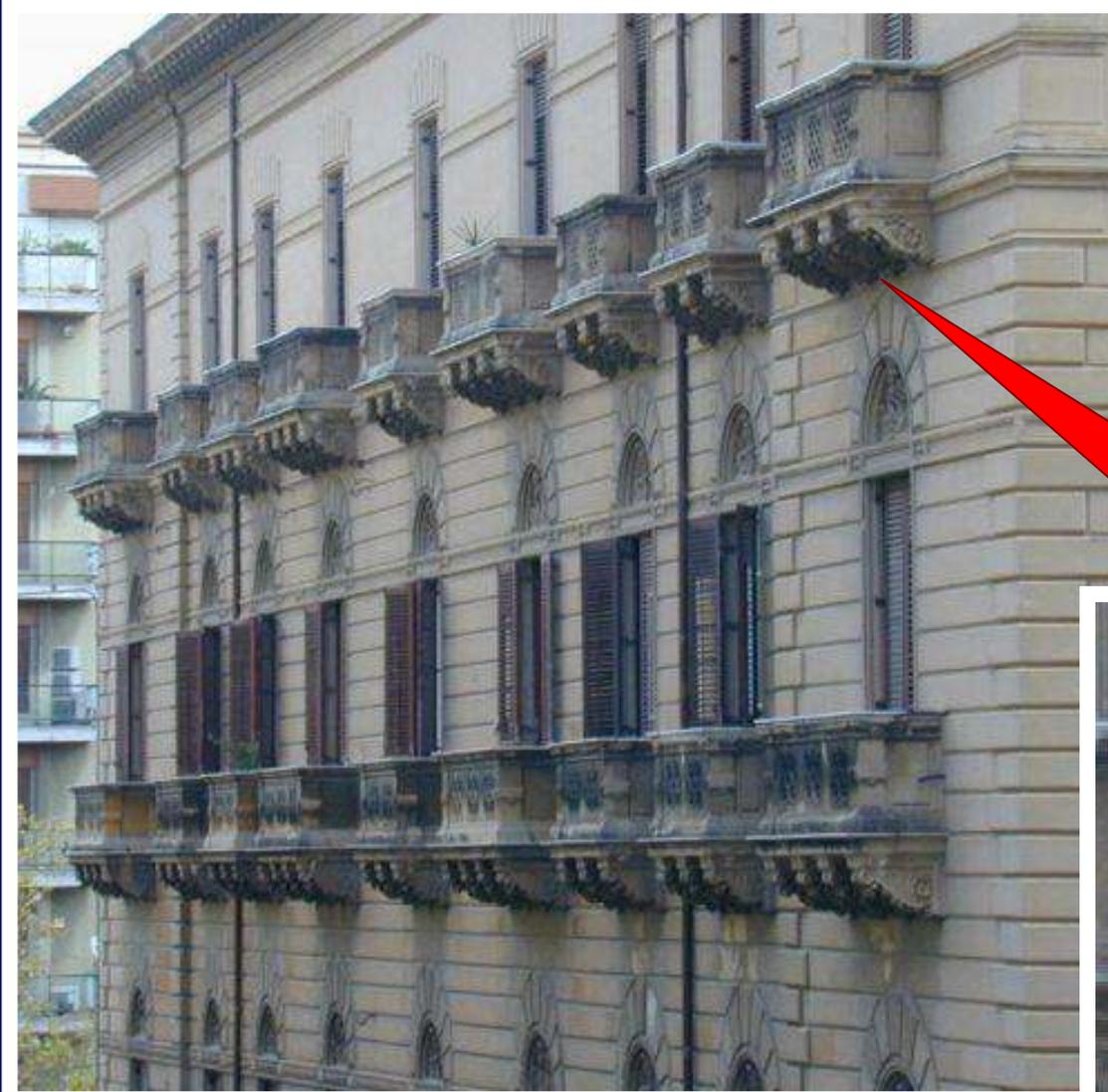


Studio delle mensole di balconi

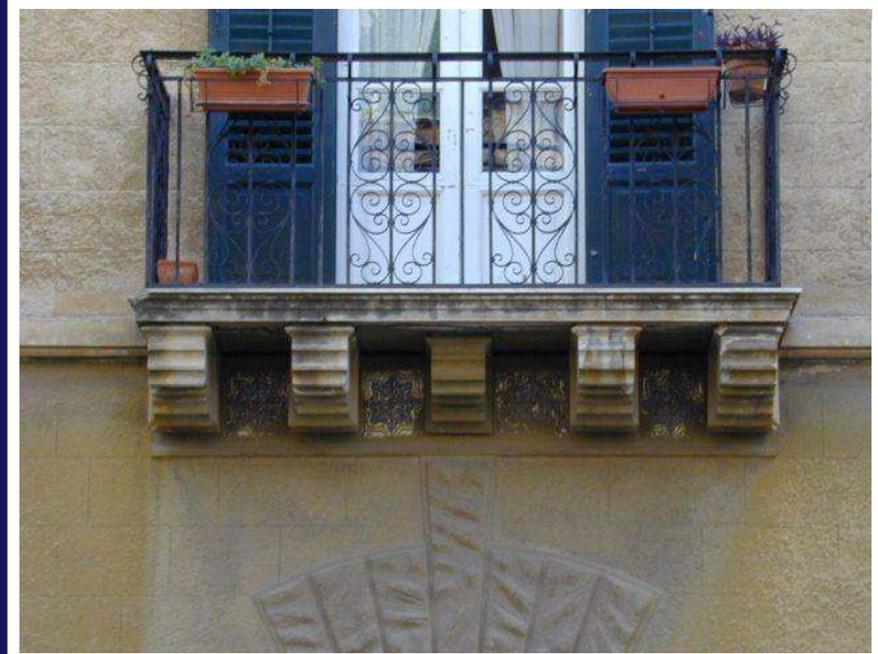


Quattro mensole
costituite da
blocchi di
particolari
caratteristiche
meccaniche

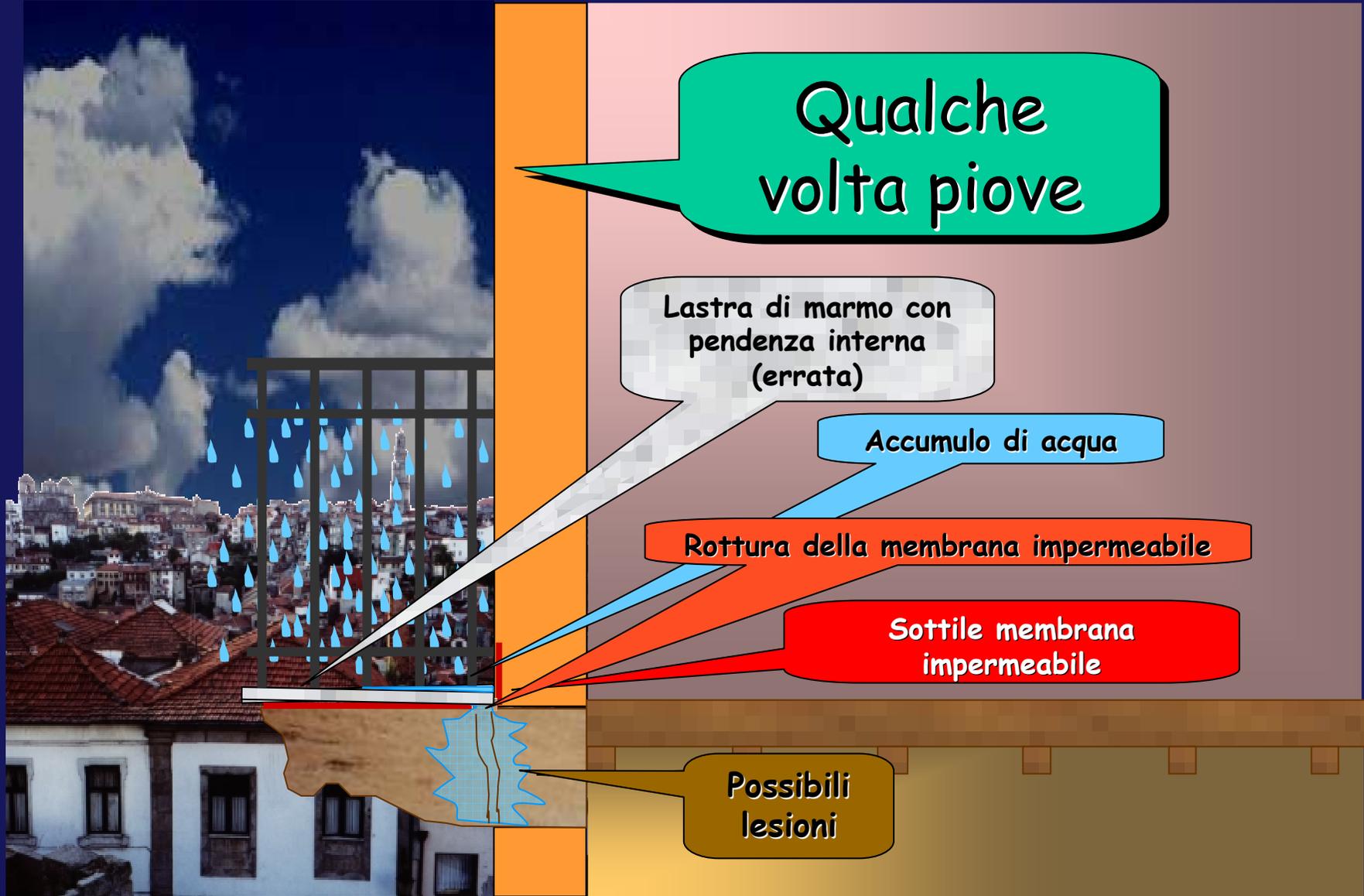
Studio delle mensole di balconi



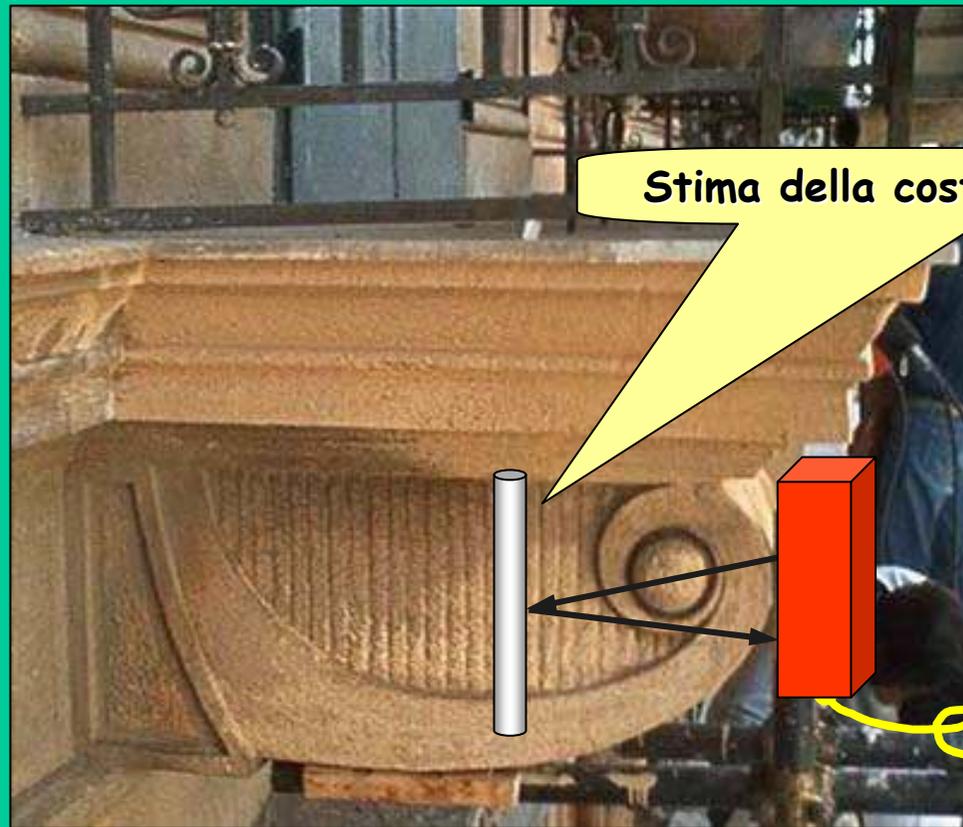
Studio delle mensole di balconi



Incidenti naturali



Tecnica di calibrazione (conversione tempi-profondità)



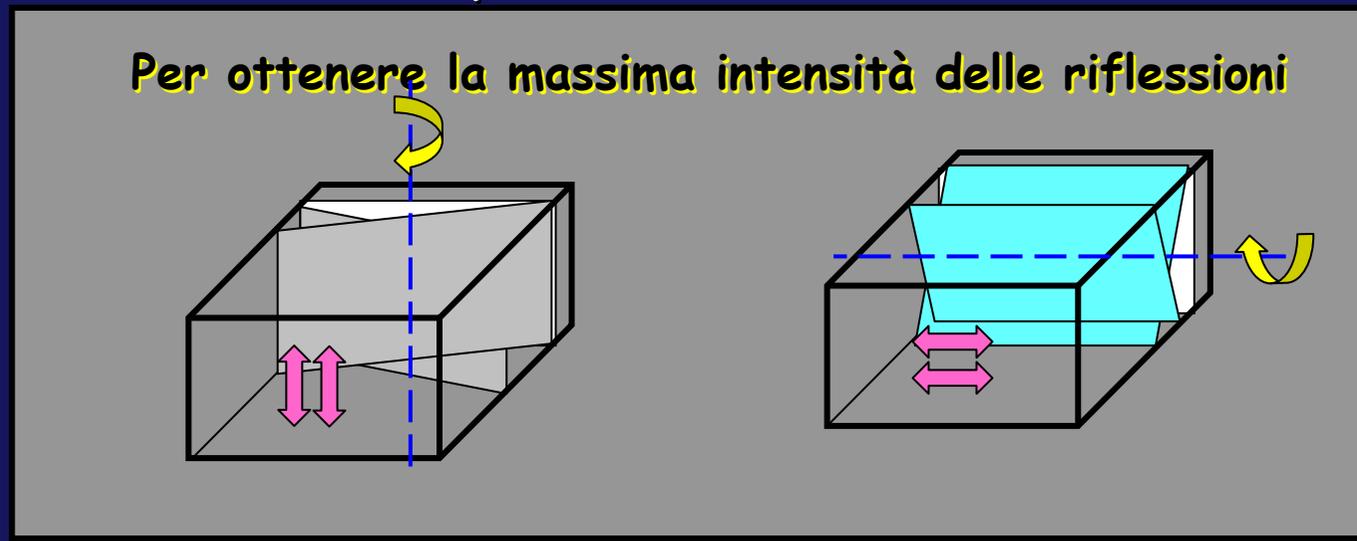
Stima della costante dielettrica relativa



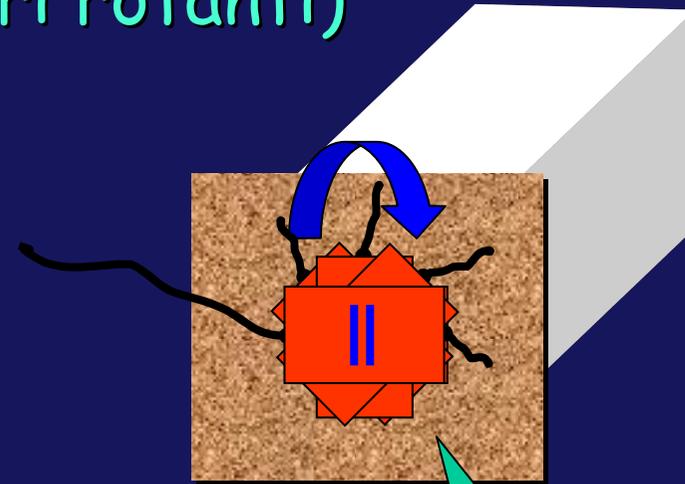
Indagini GPR in situ per la diagnostica delle mensole lapidee

SCOPO: individuazione di eventuali **anomalie (elettromagnetiche)** all'interno delle mensole lapidee calcarenitiche, **riconducibili** alla presenza di lesioni beanti e/o ad umidità

Se le superfici di discontinuità sono planari e non depolarizzanti, grazie all'uso di onde (linearmente) polarizzate



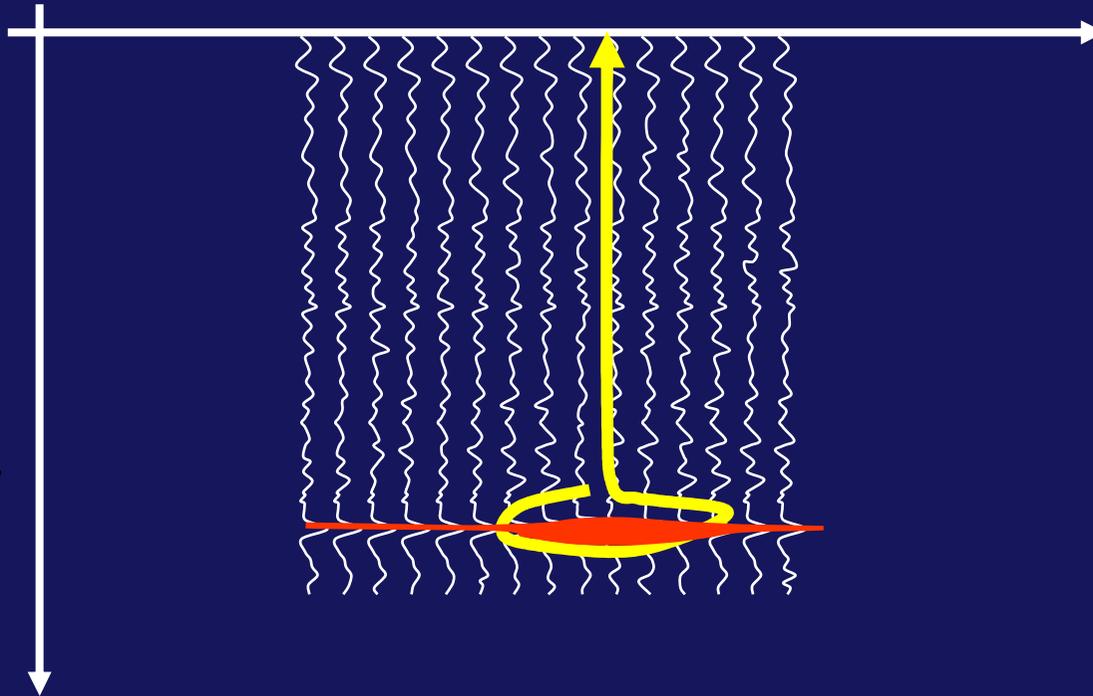
Tecnica di acquisizione secondo profili azimutali (dipoli co-polari rotanti)



Azimut variabile (angolo)

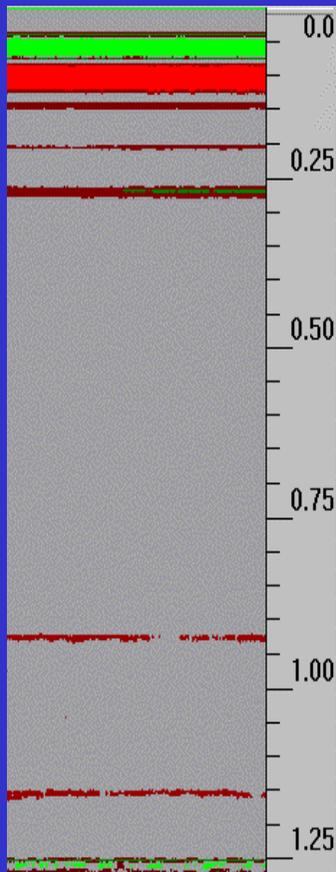
0° - 180°

Tempo (Profondità)

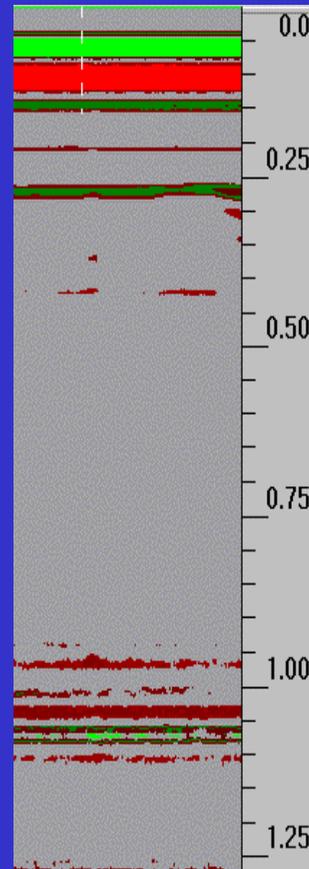


Analisi di un balcone a tre mensole

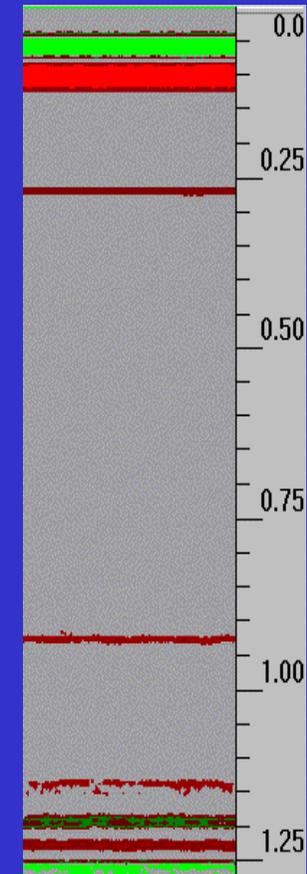
Mensola sinistra



Mensola centrale



Mensola destra



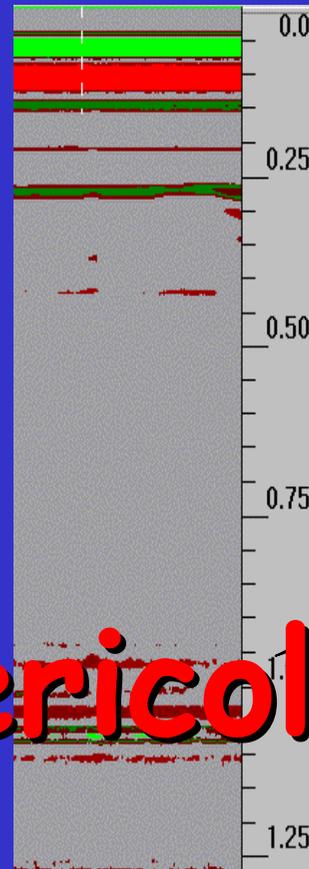
Analisi di un balcone a tre mensole

Mensola sinistra



Riflessioni superficiali

Mensola centrale



Mensola destra



Riflessioni in zona d'incastro

Riflessioni dal fondo

Pericolo

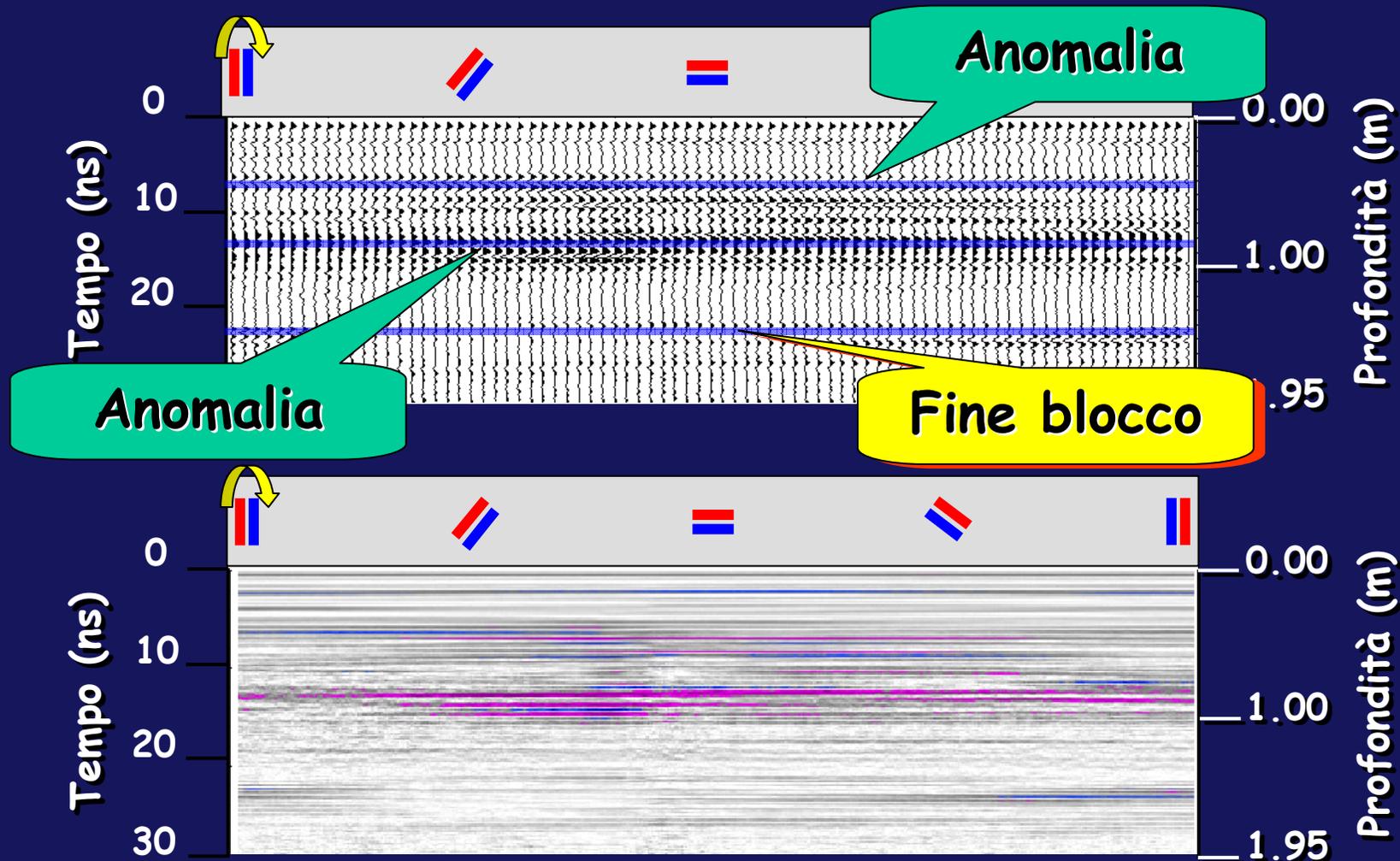
Esempio di radargramma

Via G. Cusmano (Antenna 1600 MHz)

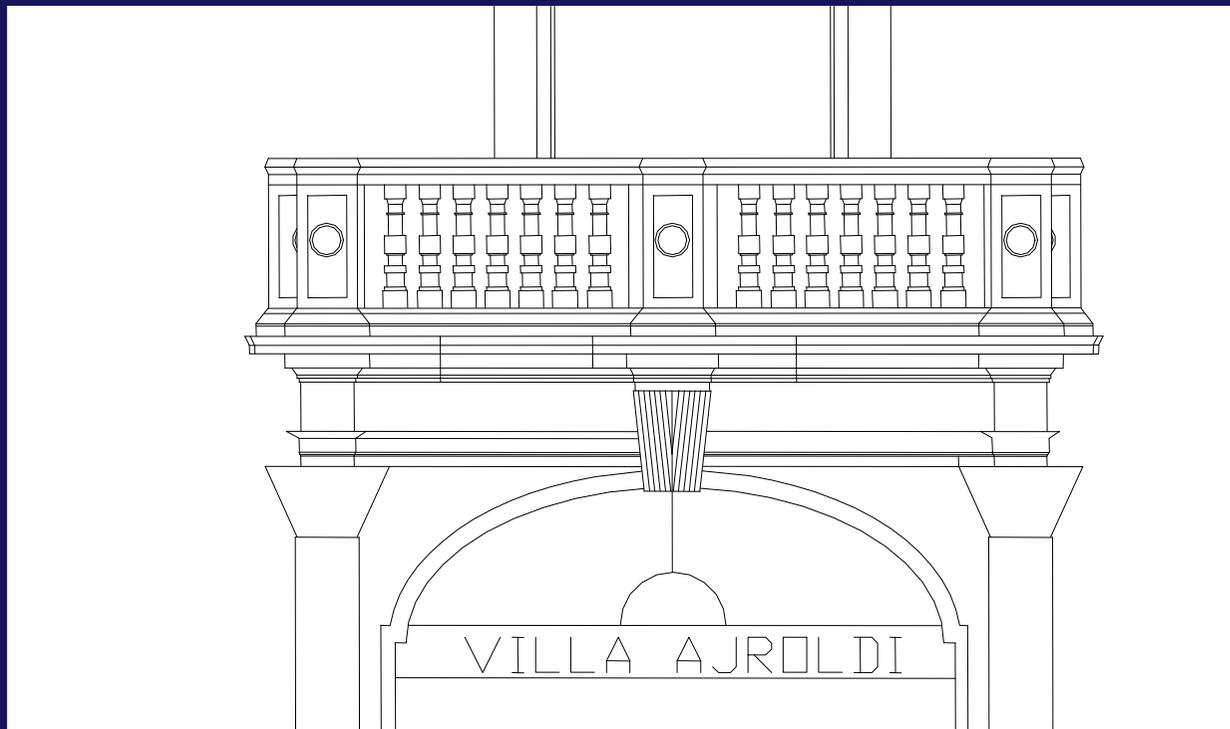


Esempio di radargramma

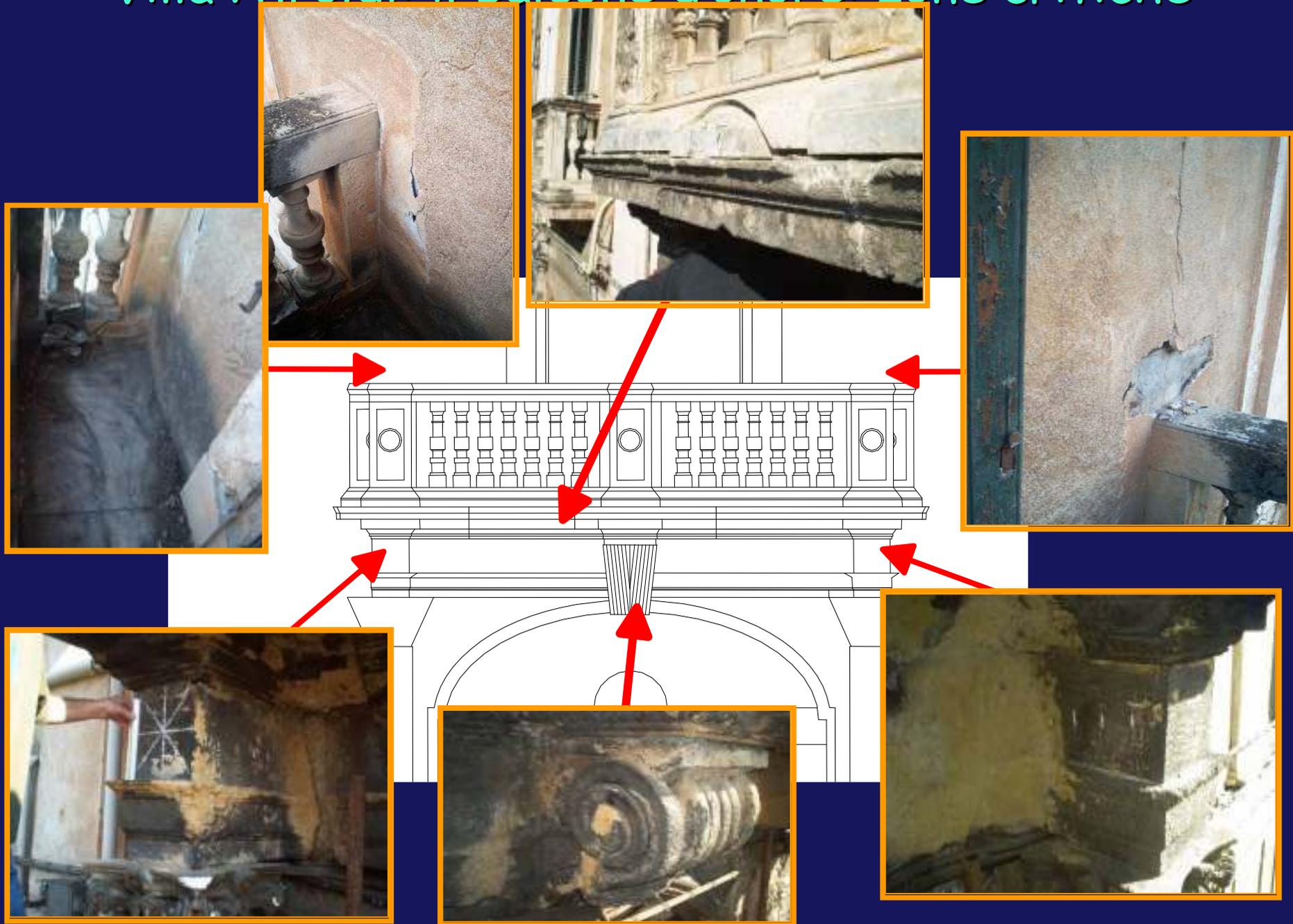
Via G. Cusmano (Antenna 1600 MHz)



Villa Ajroldi: il balcone d'onore: zone critiche



Villa Airoidi: il balcone d'onore: zone critiche



Indagini sulle mensole del balcone d'onore Villa Ajroldi, a Palermo



Indagini sulle mensole del balcone d'onore Villa Ajroldi, a Palermo



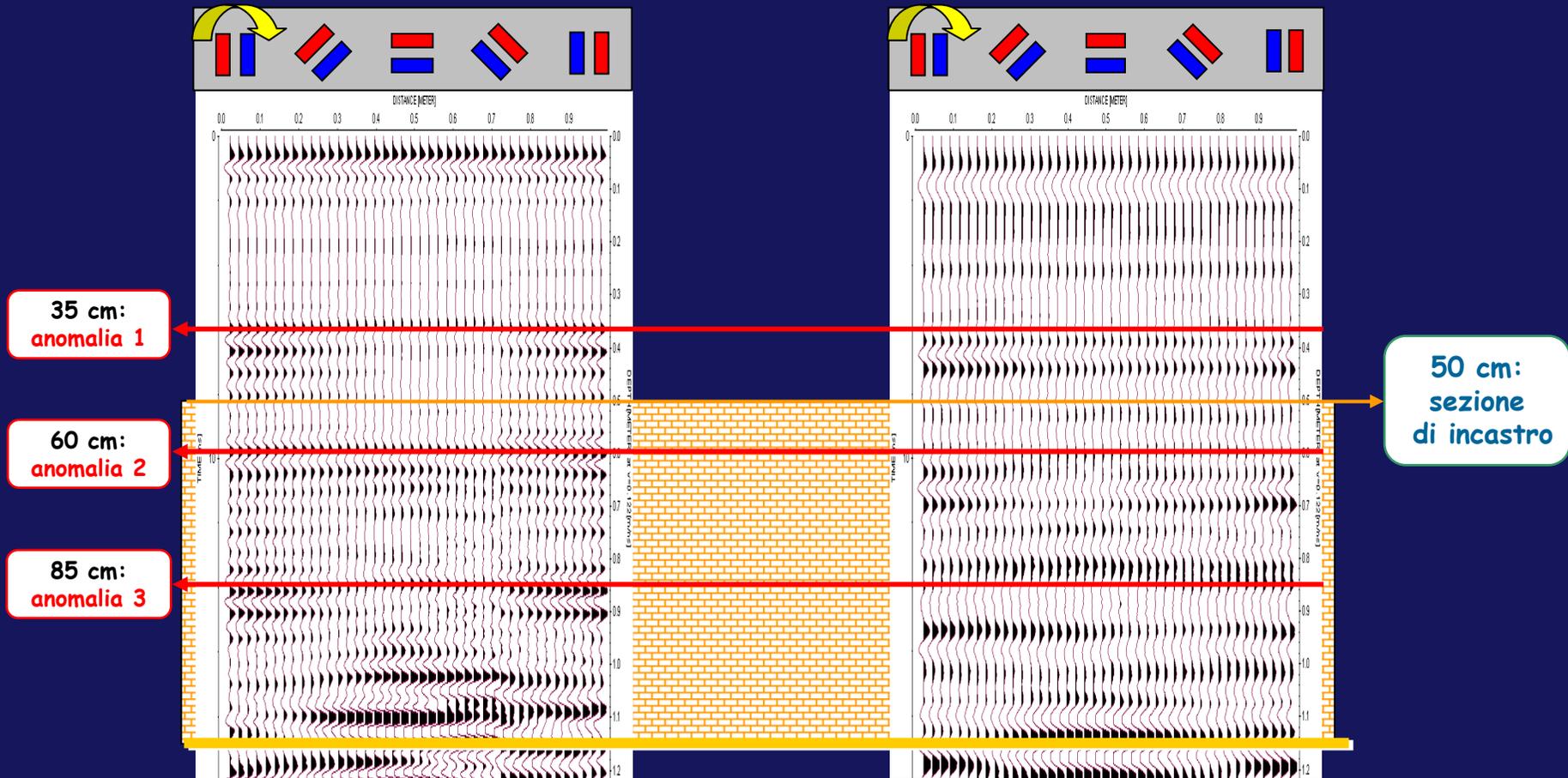
Villa Ajroldi: Mensola centrale



Villa Ajroldi: Mensola centrale

Antenna rotante
1000 MHz

Antenna rotante
1600 MHz



Conclusioni

Per concludere vorrei dirvi due cose:

1. Le metodologie che ho mostrato, così come altre che non ho avuto il tempo di mostrare, funzionano bene e, spero, saranno ancora migliorate;

2. È inutile studiare per migliorarle ancora, perché i Beni Culturali ormai non hanno più le risorse per acquistare ... neanche la carta igienica.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito grazie per la fattiva collaborazione e per l'entusiasmo che hanno profuso su questi temi va a P. Capizzi, G. Fiandaca, P. Messina, R. Martorana, S. Schiavone ed I. Razo Amoroz.

Si ringraziano altresì le Autorità ed i Direttori di Musei, che hanno non solo consentito l'accesso alle opere, ma anche incoraggiato ed aiutato il nostro gruppo di ricerca nell'esecuzione delle prove.



Grazie per l'attenzione e scusatemi se ho mostrato troppe diapositive