



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

LABORATORIO DI RESTAURO
CdI B008 in Scienze dell'Architettura
Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro
B026305– A. A. 2018 / 2019

INTRODUZIONE ALLA DIAGNOSTICA ARCHITETTONICA

Le indagini strumentali, invasive e non invasive

Lez. 8

Diagnostica architettonica per lo studio dei materiali, del degrado e delle tecniche costruttive a supporto del progetto conservativo



La diagnostica applicata all'analisi dello stato di conservazione

Cause di degrado	Materiali	Effetti
<p>- Cause antropiche diverse (incuria ed abbandono; imprevidenza ed ignoranza; usi impropri e flussi turistici incontrollati; alterazione e manomissione per interventi incongrui, sostituzioni arbitrarie, ecc.; segnaletica, cartellonistica e pubblicità; graffitismo; vandalismo; furto; attentati ed eventi bellici, ecc.)</p>	<p>- Materiali lapidei, laterizi, intonaci e colore, cementi e pietre artificiali - Materiali ferrosi o metallici - Materiali vetrosi o plastici - Elementi finiti decorativi ed architettonici</p>	<p>- Deterioramento - Decontestualizzazione - Perdita dei valori materici ed espressivi - Danneggiamento (superficiale e/o integrale) - Rottura o fratturazione - Asportazione - Distruzione (parziale e/o totale)</p>
<p>- Cause ambientali dirette (eventi naturali catastrofici: terremoti, alluvioni, frane e dissesto idrogeologico, infestazioni vegetazionali, ecc.)</p> <p>- Cause ambientali indirette (fattori microclimatici: termoigrometrici ed espositivi; attacchi biologici, funghi e muffe; emissioni gassose e inquinamento o particolato atmosferico, piogge acide; infiltrazioni umide (di falda, di risalita, di percolamento); vibrazioni; erosioni di venti, ecc.</p>		<p>- Abbattimento e crollo (parziale o totale) - Deformazione e dissesto - Collasso strutturale lesionamento, dispersione, disgregazione e perdita, ecc.</p> <p>- Azioni di disgregazione e di corrosione per attività congiunta dell'inquinamento e degli agenti atmosferici (azioni degli acidi, azione del particolato, dell'umidità, ecc.); biodegradazione - Accelerazione dei processi d'invecchiamento</p>

Inquinanti gassosi	Materiali degradati	Effetti sui materiali
- Anidride solforosa (SO ₂) per effetti della combustione di fossili (carbone, petrolio, gas naturali) e diventa SO ₃ anidride solforica all'aria.	Intonaci e materiali lapidei - Metalli alcalini (ossido di sodio Na ₂ O, ossido di potassio K ₂ O, ecc.)	- Azione degli ioni solfati e/o SO ₃ + H ₂ O su carbonato di calcio (CaO) trasformato in solfato di calcio (CaSO ₄) Fenomeno della solfatazione
- Monossido di azoto (NO), protossido di azoto (N ₂ O), idrocarburi aromatici (benzene) per combustioni e surriscaldamento dell'aria.	Pericolosi per gli effetti combinati con altri inquinanti e particolato	Accelerazione dei processi di invecchiamento, forme di degrado composite non meglio identificate
- Clorofluorocarburi (CFC) per dispersione in aerosol di gas refrigeranti (spray, ecc.).	Pericolosità da accertare, Materiali lapidei e silicei per fluoruri di idrogeno (HF)	Accelerazione dei processi corrosivi
- Eccesso di anidride carbonica (CO ₂), con monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO ₂) e metano (CH ₄) per incendi. - Ammoniaca (NH ₃) - Ozono (O ₃) per effetto d'irraggiamento su composti gassosi inquinanti (NO e idrocarburi), concentrato nei bassi strati dell'atmosfera.	Pericolosi per gli effetti combinati con altri inquinanti ed il particolato. NH ₃ (ammoniaca) pericolosa per materiali lapidei	Accelerazione dei processi di invecchiamento. L'ammoniaca presente per la decomposizione di sostanze azotate (fertilizzanti), urine e combustioni è dannosa per la formazione di sali su materiali lapidei (porosi), lo ione ammonio aumenta la solubilità del calcio
Radiazioni U.V. Fenomeni fotochimici	Leganti e sostanze organiche colorati delicati alla luce	Decoesione dei leganti organici del film pittorico
Piogge acide (ph<5,6) Acido solforico (H ₂ SO ₄) Acido nitrico (HNO ₃) Acido carbonico (H ₂ CO ₃)	(Azione dell'H ₂ SO ₄) - Ferro, rame, bronzo con formazione di solfato di rame (CuSO ₄) sale solubile. (Azione dell'H ₂ CO ₃) - Formazione di sali solubili di bicarbonato di calcio. - Attacco di minerali silicei	(Azione dell'H ₂ SO ₄) - Corrosione dei metalli e solubilizzazione degli ossidi (Azione dell'HNO ₃) - Trasformazione del CaCO ₃ in nitrato di calcio Ca(NO ₃) (Azione dell'H ₂ CO ₃) - Discioglimento di carbonati

La diagnostica architettonica

A) Indagini visive dirette o assistite (endoscopiche, con sonde televisive, ecc.)

B) Indagini strumentali non distruttive

- Esami termovisivi (TMV in emissione e DTS in riflessione):
 - a) I.R. fotografico (oltre il visibile $0,4/0,75\mu$);
 - b) Riflettografia I.R. o I.R. vicino (fino a $1,3\mu$);
 - c) I.R. lontano o termico (termografia da $2/ 5,6\mu$ fino a $8/ 15\mu$)
- Esami ecospettrografici e sonici (inferiori a 20 KHz), e ultrasonici (tra 50 e 100 KHz), radar (tra 100 Mhz e 1 Ghz)
- Esami metallografici e/o magnetometrici (metal-detector)

C) Indagini strumentali invasive (varie tipologie)

- Saggi murari diretti e prelievo di carote

Le metodiche delle indagini non invasive

Diagnostica architettonica e strutturale

- Una lungimirante azione conservativa e di restauro del patrimonio architettonico dovrebbe essere appoggiata da un'attività diagnostica preventiva che, sulla base delle conoscenze storiche e del rilievo, può essere preventivamente svolta a supporto del progetto. E, quand'anche la costante verifica dello stato di conservazione fisico e del mantenimento degli standard funzionale dei manufatti si fosse resa inattuabile, a fronte di ogni qualsivoglia situazione o fenomeno di degrado o di rischio, più o meno latente, risulterà importante dar corso ai necessari accertamenti per formulare tempestivamente la diagnosi sulle condizioni di conservazione, nonché per fissare l'opportuna strategia d'intervento.
- In questo settore operativo un posto di grande rilevanza, vuoi per le procedure adottate vuoi per i risultati acquisibili, è assolto dalle prove non distruttive e dal monitoraggio di controllo, in particolare, dalla diagnostica architettonica ed edilizia.
- Le tecnologie più avanzate, i materiali e le strumentazioni messe oggi a disposizione per la ricerca scientifica e per i diversi ambiti di applicazione, rendono attuabile una vasta gamma di esami e di indagini che, per quanto altamente specializzate, sono facilmente identificabili nel loro impiego e distintamente valutabili per la qualità dell'apporto dato allo studio delle fenomenologie del degrado sia per quanto riguarda l'ambiente sia per quanto attiene alle strutture architettoniche o al singolo reperto materico. In ambito diagnostico gli esami di tipo non invasivo, ovvero condotti senza richiedere interventi traumatici o di impatto nei confronti del manufatto da indagare, in grado di fornire specifici contributi allo studio degli edifici a rischio sismico possono essere sostanzialmente ricondotti all'impiego dei raggi infrarossi nelle indagini termografiche, di campi magnetici nelle indagini magnetometriche o metallografiche, di varie frequenze d'onda in quelle soniche e ultrasoniche.

Aspetti tecnologici

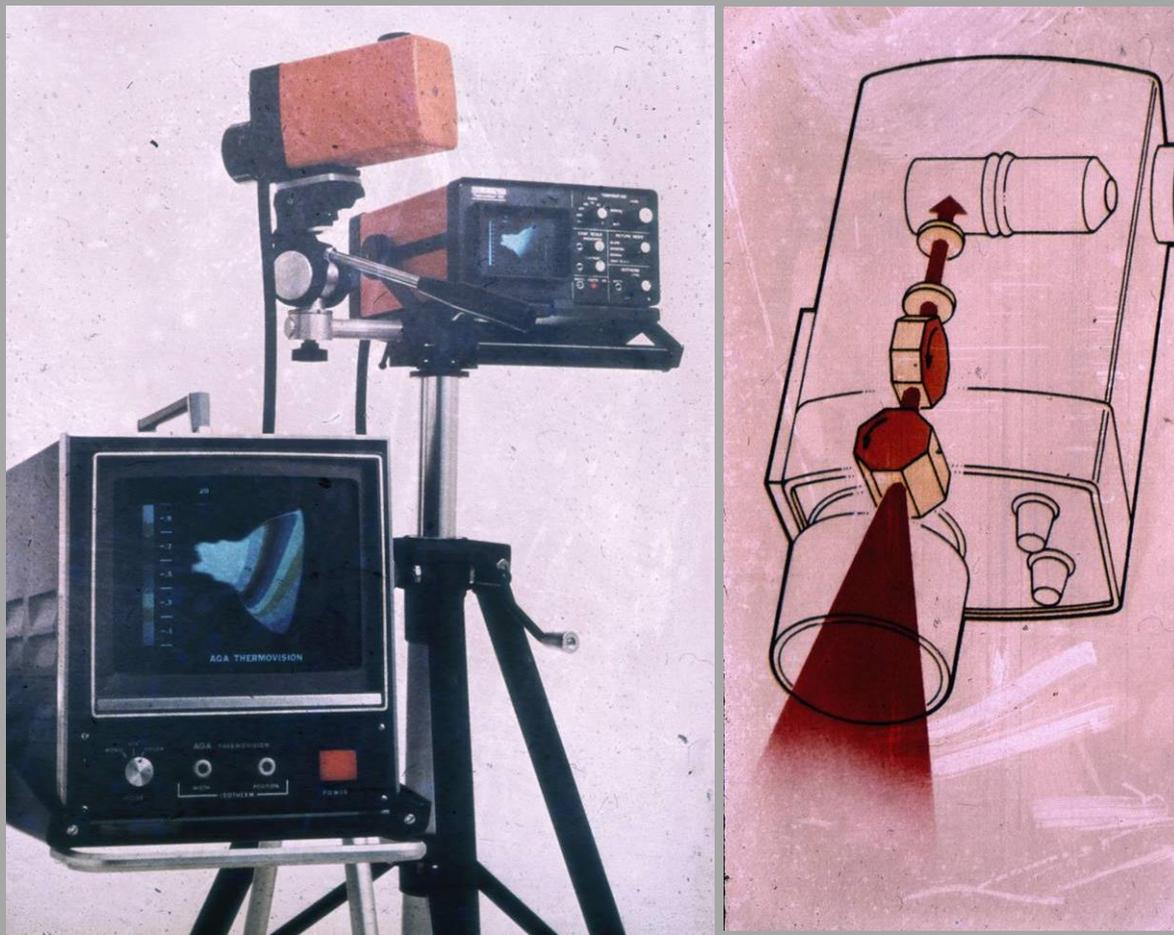
Lo studio di immagini infrarosse di oggetti materiali può essere svolto a vari livelli mediante l'ausilio di metodologie fotografiche e strumentali in grado di restituire nel campo del visibile, ovvero nella banda di radiazioni elettromagnetiche compresa tra 400 e 750 nanometri, fenomeni non percepibili dall'occhio umano riproducibili in falsi colori, fotograficamente fino a $1,3\mu$ (infrarosso vicino), per mezzo della riflettografia I.R. fino a 2μ , attraverso introspezioni termovisive da 2 a $5,6/8\mu$ ed oltre fino a 15μ (infrarosso lontano, o termico).

Lo studio mediante onde ultrasoniche consente di utilizzare ai fini diagnostici frequenze superiori ai 20.000 cicli al secondo (20 KHz), non percepibili dall'orecchio umano, con ultrasuoni generati per mezzo di effetto piezoelettrico. A differenza della registrazione remota che caratterizzata l'esame termovisivo le onde soniche e quelle ultrasoniche emesse devono essere registrate mediante un coppia di sensori, uno emittente ed uno ricevente, oppure con un ecografo, posti a contatto dell'oggetto da indagare.

La termografia architettonica

- La necessità di operare, con obiettivi e finalità diverse, controlli non invasivi sopra pareti o strutture murarie celate alla vista da intonaci, o da superfici dipinte, ha trovato nell'indagine termovisiva una soluzione tecnica efficace, di grande versatilità ed ottima operatività.
- I sistemi termografici IR sono costituiti da strumentazioni che possono essere trasportate ed installate in situ al fine di creare stazioni mobili di rilevamento, generalmente composte da una telecamera collegata ad un sistema più o meno complesso di elaborazione e registrazione immagini, munito di unità video di presentazione
- L'esame diagnostico dei termogrammi è comunque attività specialistica che richiede particolare esperienza e precise competenze professionali nel campo di applicazione.
- Tra i pregi maggiori dell'indagine termovisiva vi è quello di fornire in tempo reale all'operatore che esegue il rilevamento un'immagine globale, dalla veduta d'insieme al particolare di dettaglio, dell'ambito spaziale di volta in volta indagato. La termovisione è infatti fruibile come una semplice, per quanto speciale, scansione ottica, eseguibile con focali di diversa lunghezza (grandangolari e teleobiettivi), che restituisce su apposito monitor, monocromatico o a colori, le differenti risposte termiche prodotte dai diversi materiali che compongono il supporto murario osservato.
- Infatti la termovisione sfrutta il principio secondo il quale ogni corpo emette radiazioni termiche, potendo la speciale attrezzatura utilizzata registrare le emissioni infrarosse nel campo del non visibile ed oltre l'infrarosso vicino.

La strumentazione analogica per la scansione termovisiva



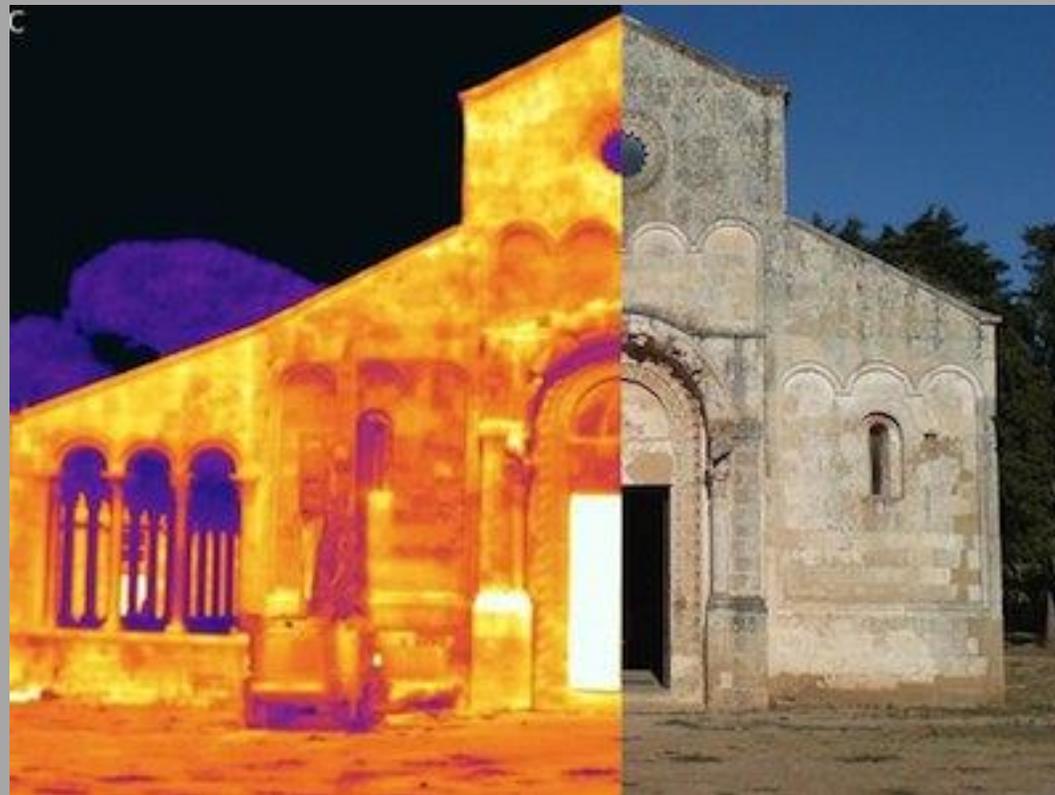
A titolo esemplificativo del funzionamento di una strumentazione termografica applicata in edilizia, si riportano le caratteristiche del sistema "AGA Thermovision 750" dotato di una telecamera equipaggiata con ottiche speciali, con lenti al germanio, e di un'unità di presentazione e controllo. Il rilevatore fotovoltaico di antimonio di indio del quale è dotata la telecamera, sensibile alla regione spettrale compresa tra 2 e $5,6\mu$ di lunghezza d'onda e raffreddata ad azoto liquido, fornisce una differenza di potenziale elettrico strettamente dipendente dall'intensità delle radiazioni infrarosse ricevute. In tal modo si ottiene un segnale che, opportunamente elaborato e amplificato, forma sul monitor dell'unità di controllo un punto luminoso che trova corrispondenza in un punto dell'oggetto indagato. La scansione differenziale di tipo puntiforme restituisce l'immagine termica, o termogramma, della superficie che via via viene ripresa dalla telecamera. La luminosità di ogni punto (direttamente proporzionale alla intensità delle radiazioni elettromagnetiche) fornisce infine, in tempo reale, l'informazione richiesta

Il sistema AGA Thermovision 750 ©

Camere digitali e video camere termiche portatili

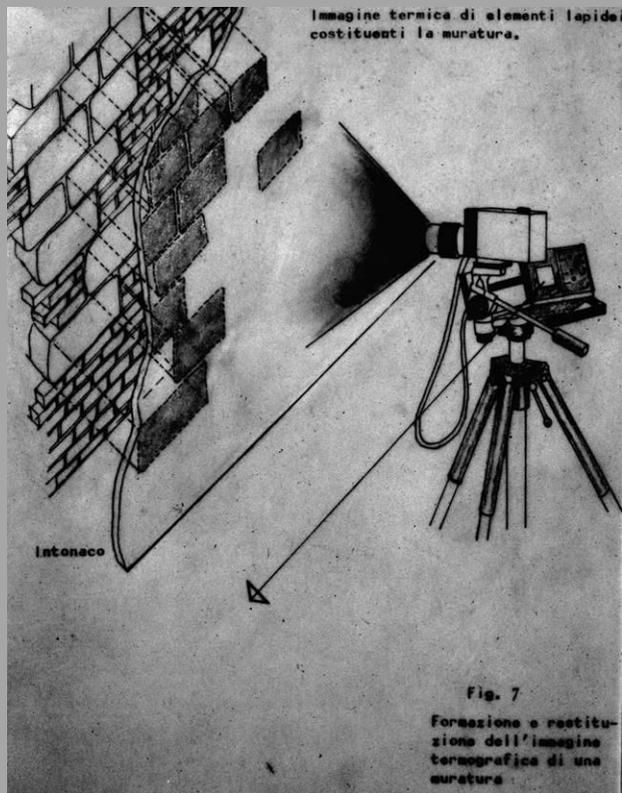
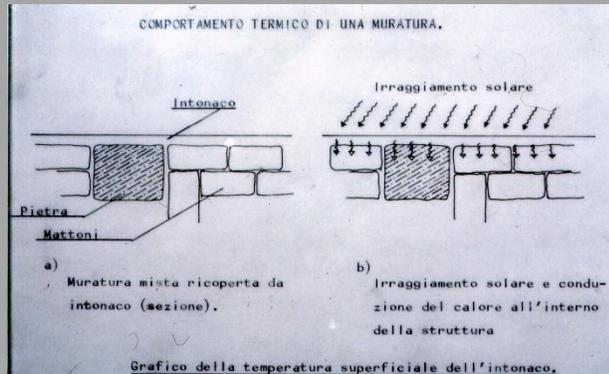


Indagini
TMV



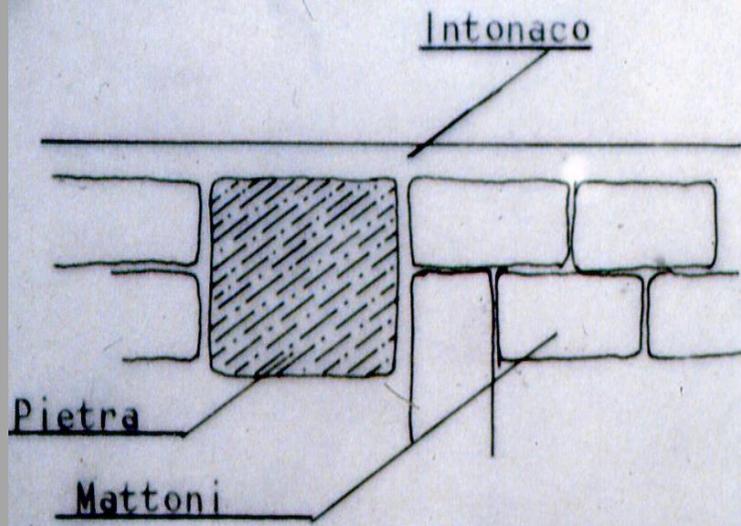
L'Abbazia di Santa Maria di Cerrate a Lecce, in concessione trentennale dalla Provincia di Lecce, è il primo Bene gestito dal FAI – Fondo Ambiente Italiano in Puglia

L'operatività del sistema TMV in architettura

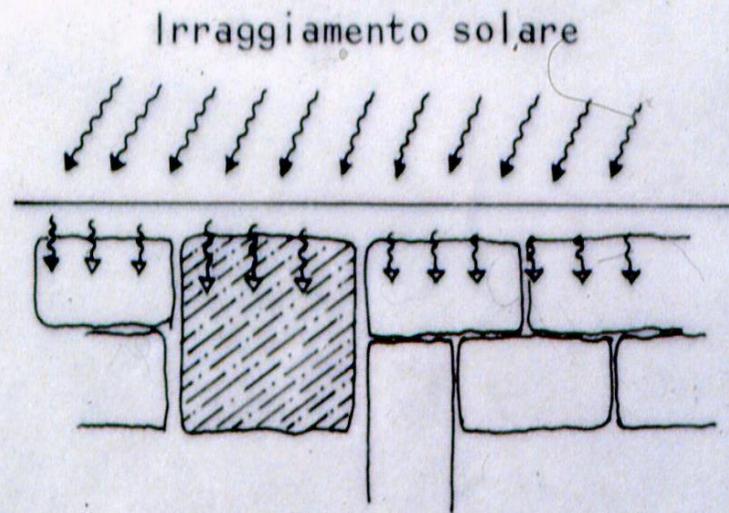


- I diversi materiali dei quali è composto un manufatto murario si differenziano soprattutto per le diverse risposdenze di inerzia termica, ovvero per la velocità con la quale si raffreddano a fronte di una sollecitazione termica indotta naturalmente per irraggiamento solare o artificialmente per riscaldamento tramite lampade, stufe o termoconvettori.
- Per effettuare un efficace rilevamento termografico occorre quindi sfruttare il salto termico che si produce tra l'oggetto da rilevare ed l'ambiente circostante.
- Nel caso di superfici esterne la questione si presenta di semplice risoluzione utilizzando le ore nelle quali si ha il massimo rilascio di calore da parte delle strutture, generalmente le ore serali o notturne offrono le migliori condizioni.
- Altri fattori che possono condizionare il rilevamento termografico sono dati dai valori di umidità relativa dell'aria; anche in questo caso le situazioni ambientali caratterizzate da clima secco e basse temperature esterne dopo un buon soleggiamento diurno offrono la migliore operatività.
- Quando il salto termico, specialmente a cavallo di strutture murarie interne o caratterizzate da forte inerzia termica, è insufficiente occorre riscaldare artificialmente la parete o la zona sulla quale di deve condurre l'introspezione con l'ausilio di sistemi esterni, in questo caso si dovrà valutare attentamente le condizioni entro cui si dovrà effettuare la termovisione ed aspettare il tempo necessario per lo scambio termico interesterno.
- Massima attenzione dovrà comunque essere posta nello svolgimento di indagini su pareti dipinte per le quali la forzatura termica dovrà essere effettuata nell'assoluto rispetto delle superfici pittoriche, assai sensibili agli stress termici; in questo caso si dovrà operare facendo ricorso a batterie di lampade a bassa potenza, non focalizzate sulla superficie da riscaldare, sempre poste a distanza di sicurezza dalle zone dipinte.

COMPORTAMENTO TERMICO DI UNA MURATURA.



a)
Muratura mista ricoperta da
intonaco (sezione).



b)
Irraggiamento solare e condu-
zione del calore all'interno
della struttura

Grafico della temperatura superficiale dell'intonaco.

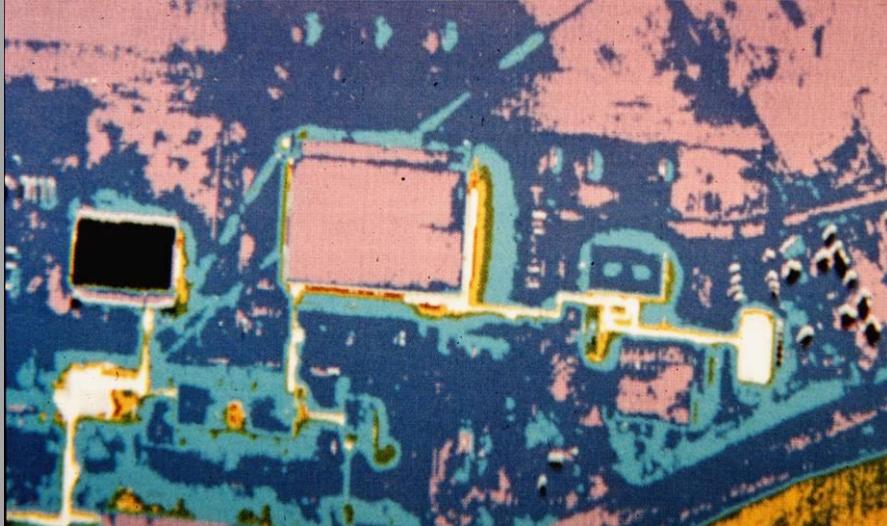
La lettura delle radiazioni emesse o riflesse

La mappa termica, riprodotta in via grafica attraverso immagini visibili, rispecchia fedelmente le radiazioni dello spettro elettromagnetico emesse dai materiali posti a diretto contatto con gli strati aderenti dell'intonaco che funge da superficie radiante. Potendosi stabilire "a tavolino", su campioni noti, le diversità di emissione dei vari materiali da costruzione (pietre, mattoni, metalli, legnami ecc.) è perciò possibile interpretare e decodificare le immagini termiche che appaiono visualizzate sullo schermo in falsi registri tonali b/n o colori riproducenti appunto le diverse caratteristiche termiche ed emissive dei materiali.

Da un punto di vista fisico si deve tuttavia ricordare che l'energia totale (ET) irradiata da un corpo è formata dall'energia emessa (EE) e dall'energia riflessa (EP) proveniente da altre sorgenti di calore (sole, lampade ecc.). In particolare la radiazione solare si manifesta sotto $4/5\mu$ di lunghezza d'onda e, quindi, per conoscere l'EE si deve operare oltre tale range di frequenza oppure nelle ore notturne, in assenza di EP. Talvolta è invece utile conoscere la distribuzione termica superficiale (DTS) o l'energia totale di una determinata superficie parietale, compresa quindi l'EP, per approfondire le analisi relative alla caratterizzazione di intonaci, specialmente in presenza di superfici pittoriche o condurre esami termoigrometrici da associare a misurazioni continue o discontinue di temperatura ed umidità relativa.



Indagini termografiche e risparmio energetico



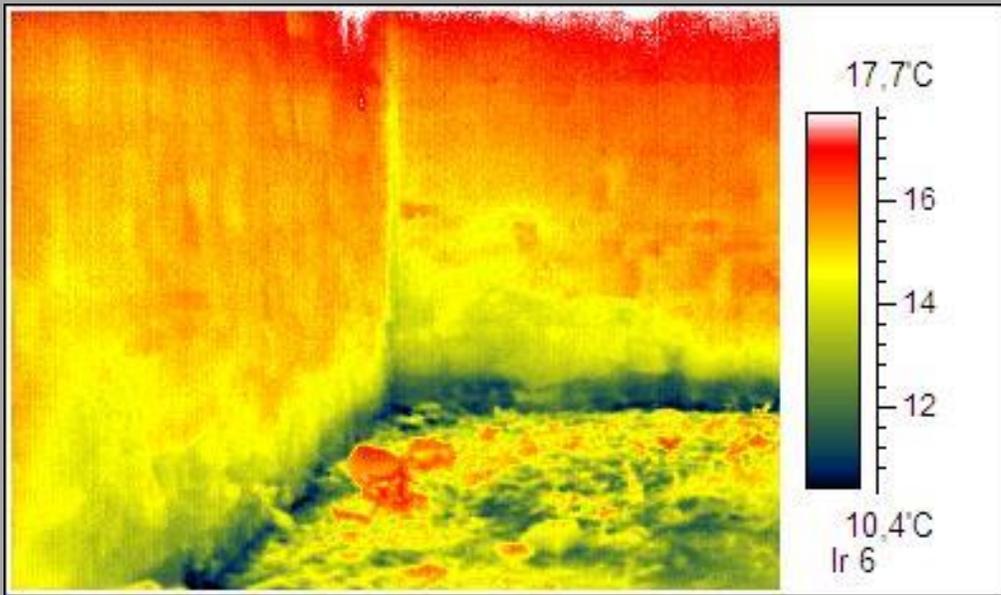
Esame TMV alla scala urbana su area industriale per la verifica delle dispersioni termiche e della funzionalità di grandi impianti centralizzati



Esame TMV alla scala architettonica su edificio monofamiliare per la verifica dei ponti termici e delle aree di dispersione per il contenimento dei consumi energetici

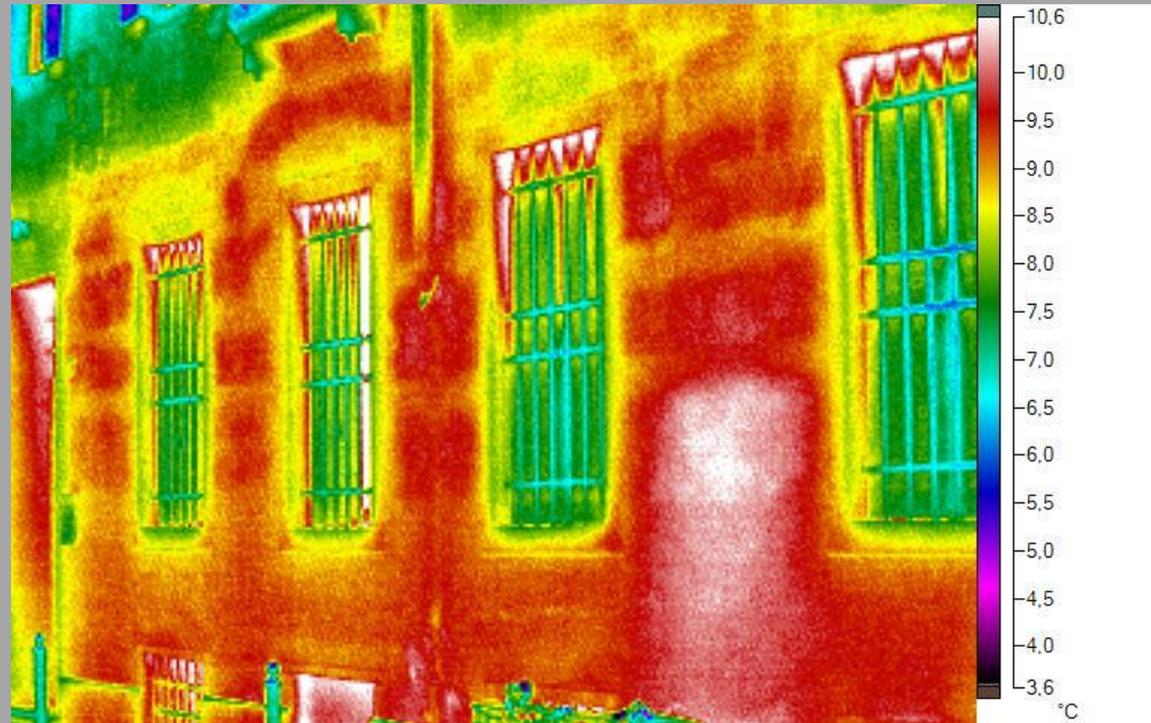
Le potenzialità dell'esame TMV per il restauro

- Per lo studio su edifici colpiti da eventi traumatici, o da restaurare, attraverso la termografia è quindi possibile visualizzare e rappresentare graficamente, su base interpretativa, numerosi aspetti costruttivi e patologici non direttamente percepibili o osservabili, in particolare:
 - identificazione di aree di rifacimento murario, presenza di fodere e rimpelli murari, nonché di tamponamenti di aperture di porte e finestre, di risarcimenti del tipo “cuci-scuci” ecc.;
 - rinvenimento di elementi di pietra inglobati nelle murature (frammenti di cornici e modanature, paraste e colonne, architravi ecc.);
 - riconoscimento di cavità, sgrottamenti e canne fumarie di camini occlusi o soppressi;
 - precisazioni tipologiche di apparecchi murari, con identificazione materica e compositiva di archi di scarico, pilastri, piattabande ed altri elementi strutturali, centinature di coperture voltate, presenza di incannicciati o telai lignei di supporto ecc.;
 - identificazione di ammorsature murarie caratterizzate da tessiture e materiali diversi;
 - esame di strutture in c.a. per la distribuzione dei ferri di interfaccia;
 - studio degli intonaci, con possibilità di “mappare” le aree in distacco o pronunciato allentamento ecc.;
 - analisi impiantistiche mirate alla individuazione dei tracciati e delle canalizzazioni di impianti idro-sanitari e termici in fase di esercizio;
 - studio sulle dispersioni termiche dovute a carenze di coibentazione, dell'umidità nelle murature e identificazione dei ponti termici.



TMV in falsi colori
per lo studio dei fronti di risalita

TMV in falsi colori
per l'identificazione di elementi
architettonici



TECNOLOGIA VICINO INFRAROSSO (SWIR) – RIFLETTOGRAFIA I.R.

Le telecamere sensibili nella regione spettrale 0.9-1.7 μm hanno la capacità di offrire informazioni complementari alle più note telecamere termiche. Esse infatti utilizzano in maggior parte la luce riflessa, molto similmente a quello che fanno le telecamere visibili oppure lo stesso occhio umano. Anche per questo le immagini che ne provengono (seppur in bianco e nero o falsi colori) sono paragonabili in risoluzione e dettagli alle immagini visibili. Questi sensori possono essere raffreddati tramite stadi Peltier, eliminando quindi la necessità far scorrere acqua o azoto liquido al proprio interno, riuscendo a raggiungere sensibilità molto spinte mantenendo dimensioni progettuali ridotte. Grazie a particolari tecniche produttive si può estendere la loro sensibilità sia nel visibile (0.4-1.7 μm) che nell'infrarosso (0.9-2.5 μm) aumentando il parco delle applicazioni sostenibili.

RESTAURO DI BENI CULTURALI: i materiali con i quali sono stati dipinti i quadri hanno una riflessione diversificata nell'infrarosso. Sfruttando tale proprietà è possibile osservare un quadro in maniera "complementare" al visibile, scoprendo quali siano stati gli eventuali ripensamenti dell'artista o eventuali zone predisposte al deterioramento.



Esami termovisivi in b/n ed in falsi colori



La Loggia dei Lanzi, foto al visibile

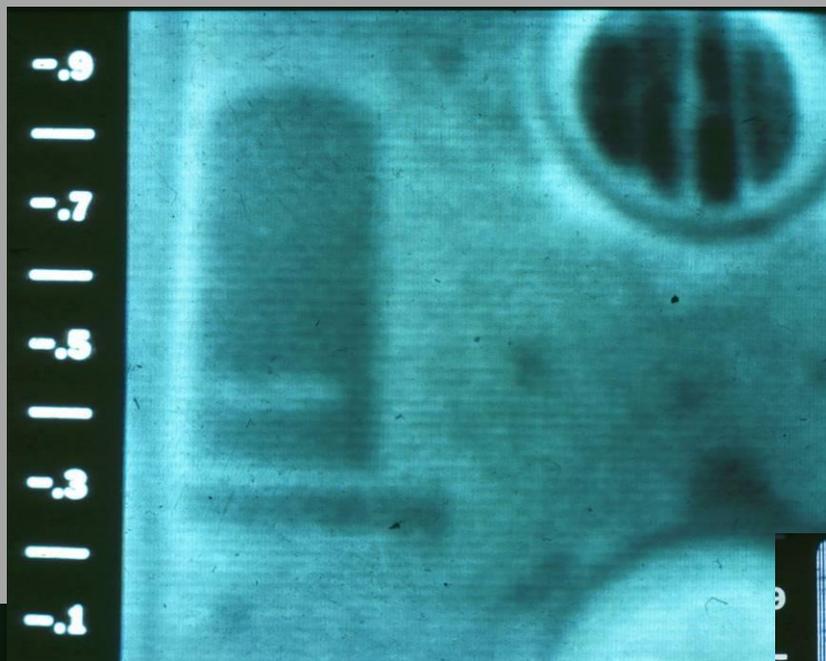
TMV, Ee
neg. b/n



TMV, DTS
falsi colori

Termografia architettonica applicata: i primi studi

L'indagine termografica del cortile di Michelozzo in Palazzo Vecchio



Termogramma in b/n



Termogramma in falsi colori

Cortile di Michelozzo: studio delle preesistenze



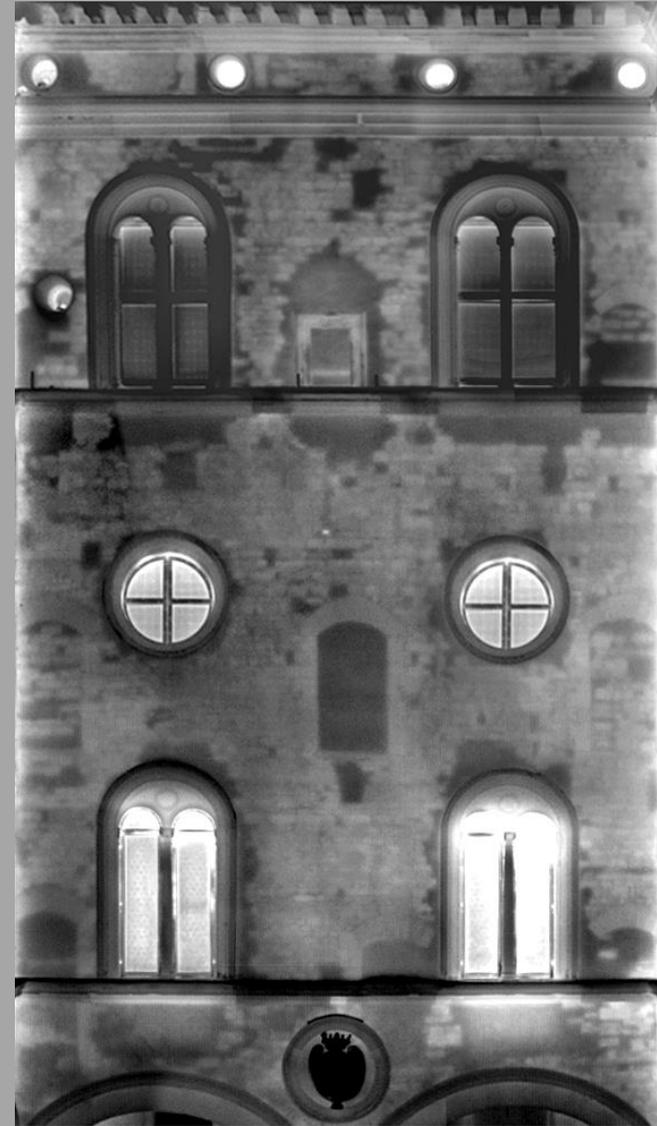
Il termogramma evidenzia discontinuità murarie



Assemblaggi fotografici di termogrammi

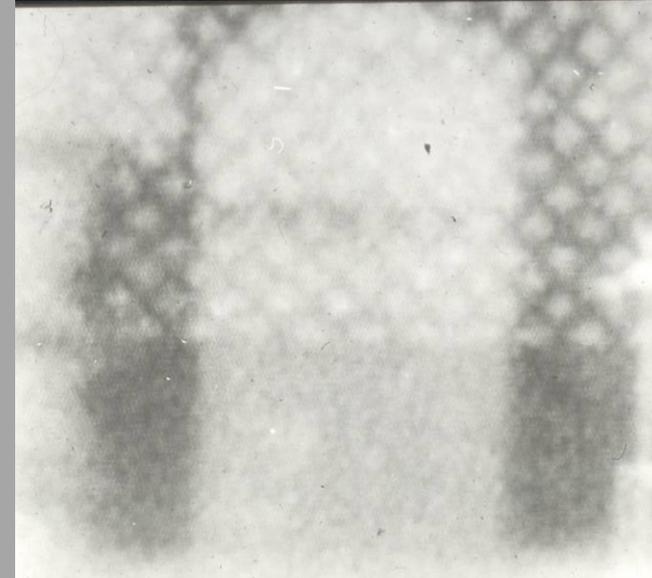


Parete sud del cortile di Michelozzo -
Immagine al visibile

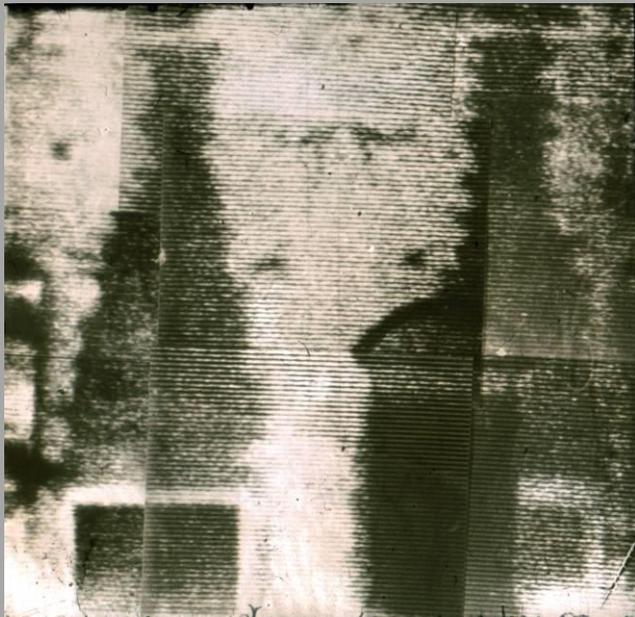


Parete sud del cortile di Michelozzo -
Immagine termografica

L'esame termovisivo in ambienti interni



Pal. Vecchio, Sala dei Gigli, le termografie evidenziano la presenza di apertura tamponata e canne fumarie



Palazzo Vecchio, Dogana Courtyard, East Wall

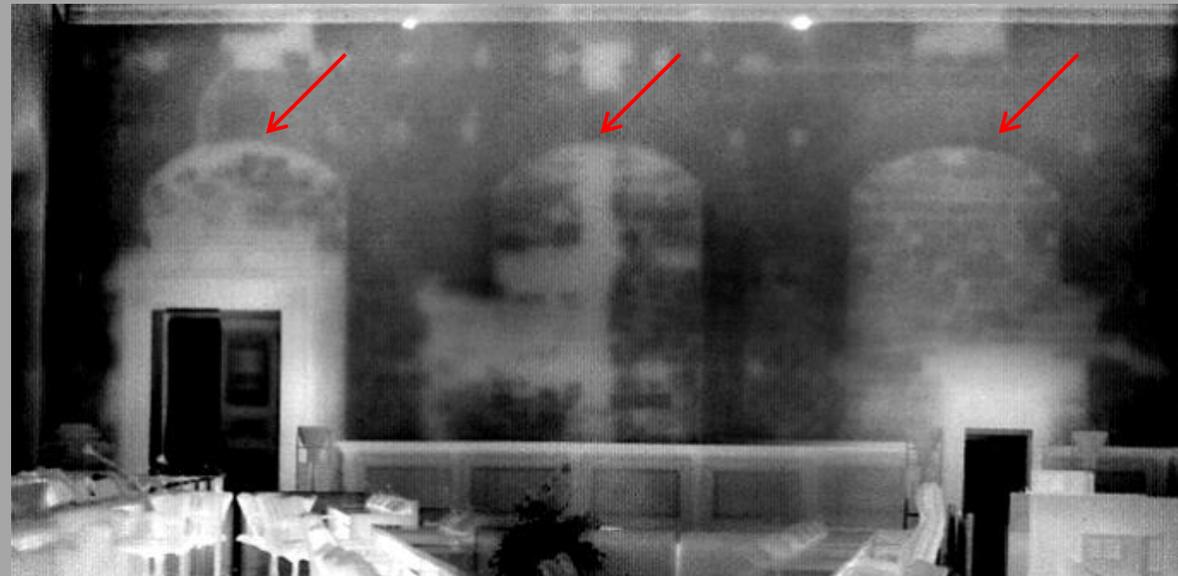


Thermogram

Palazzo Vecchio,
Hall of the 200, East Wall



Original windows (dated
to 1299) of the East side of
Palazzo Vecchio

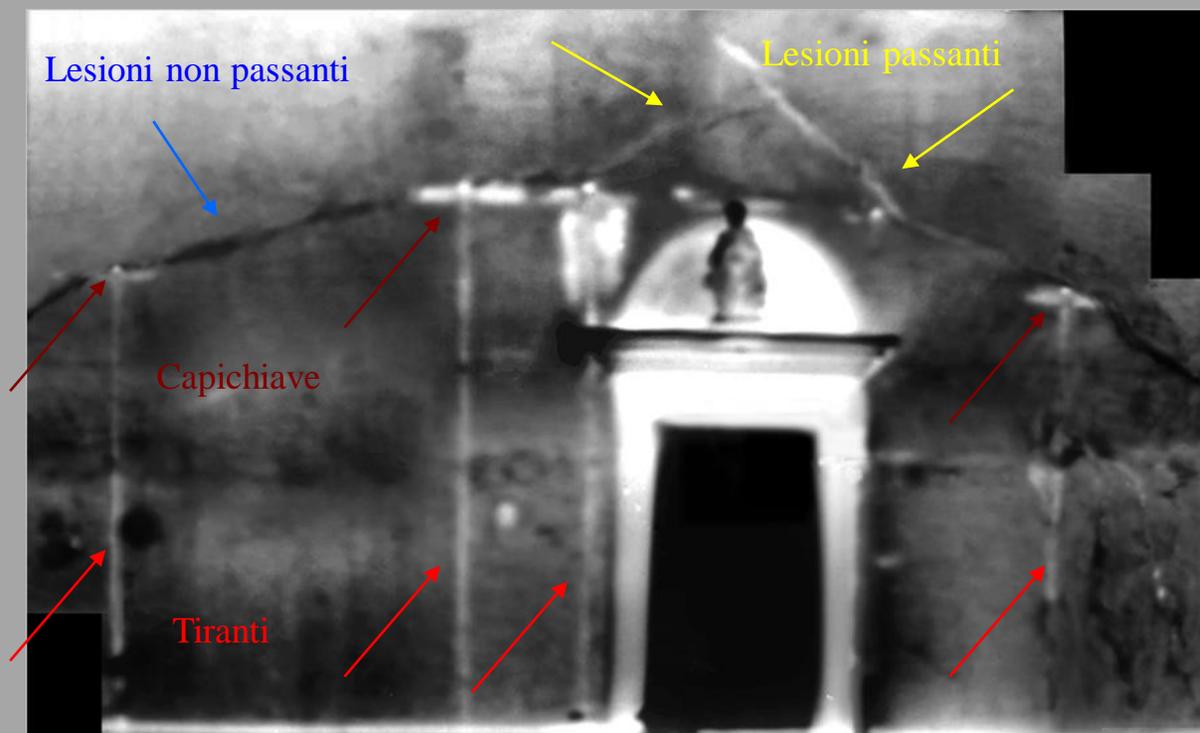


Thermogram

Palazzo Vecchio
Sala delle Udienze,
Parete Est, Affreschi del Salviati



Palazzo Vecchio
Sala delle Udienze,
Parete Est, Affreschi del Salviati



Termogramma

Palazzo Vecchio
Sala delle Udienze,
Parete Est, Affreschi del
Salviati

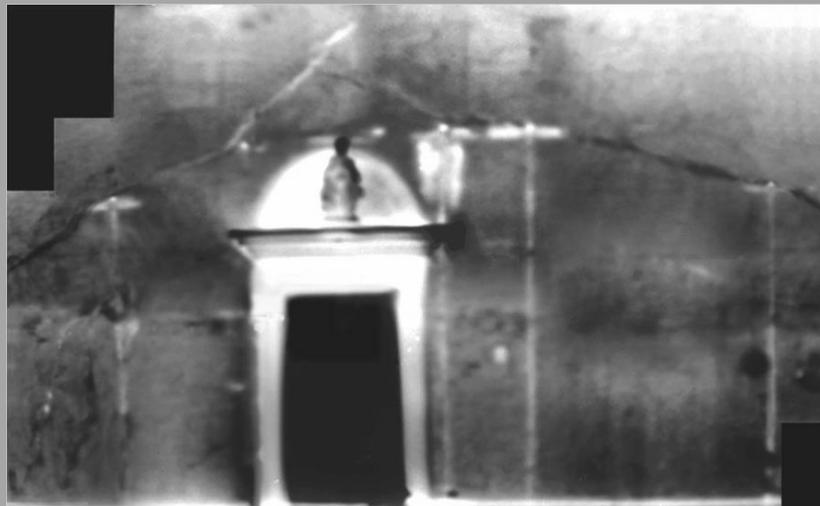
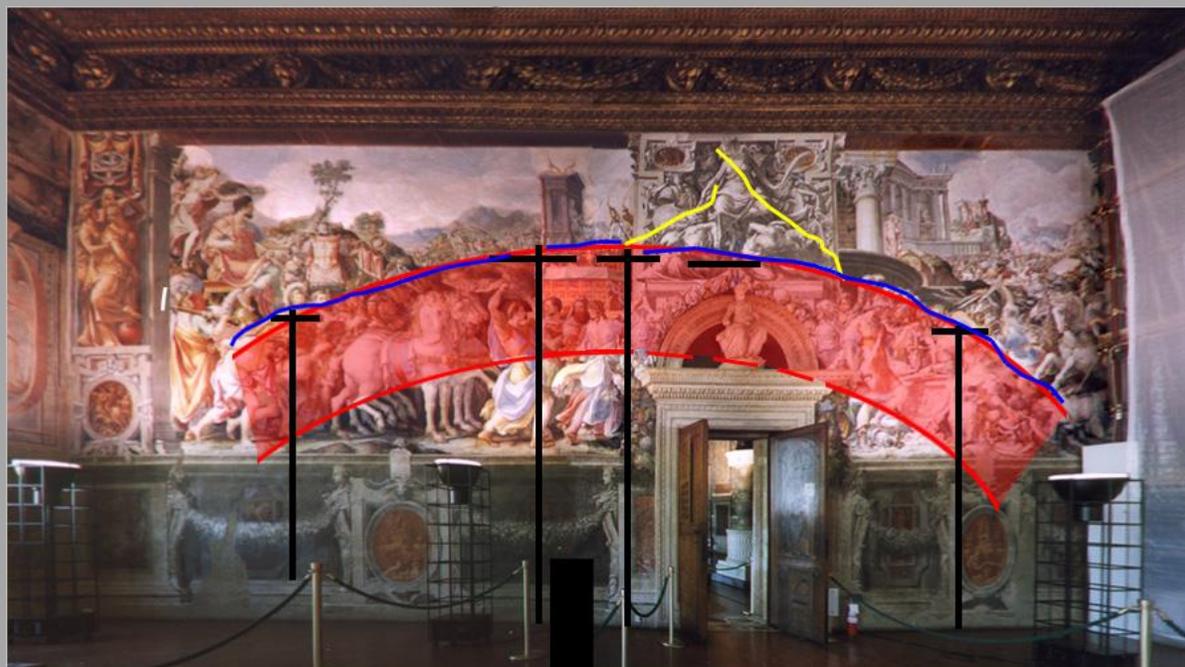


Immagine termografica



LEGENDA



arco di scarico in muratura



elementi metallici
con funzione di tirante



lesioni passanti



lesioni non passanti

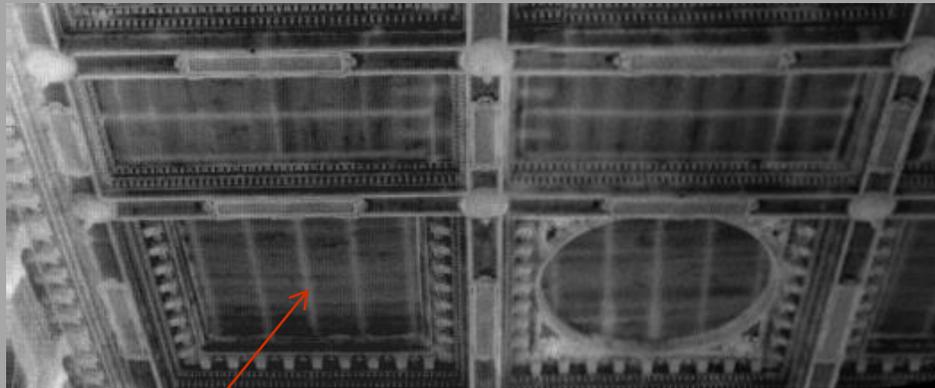


TERMOGRAMMA

ANALISI DELLE DEFORMAZIONI DELLA PARETE

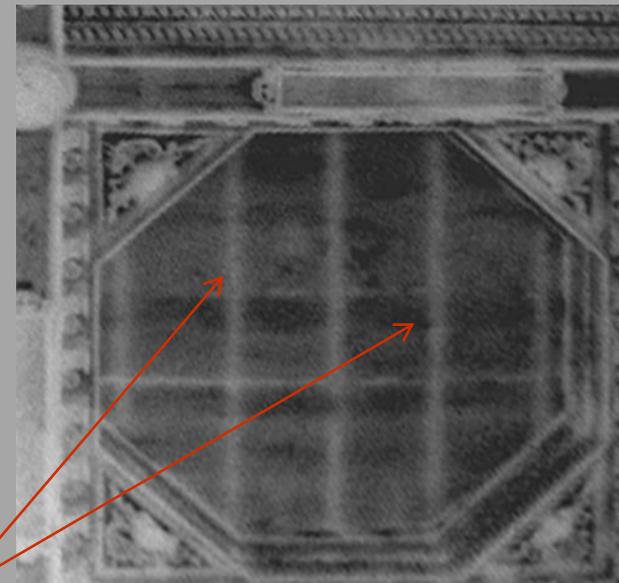


Palazzo Vecchio - Hall of the 500 - Painted Ceiling



Thermogram

Wood structure supporting the painted panels



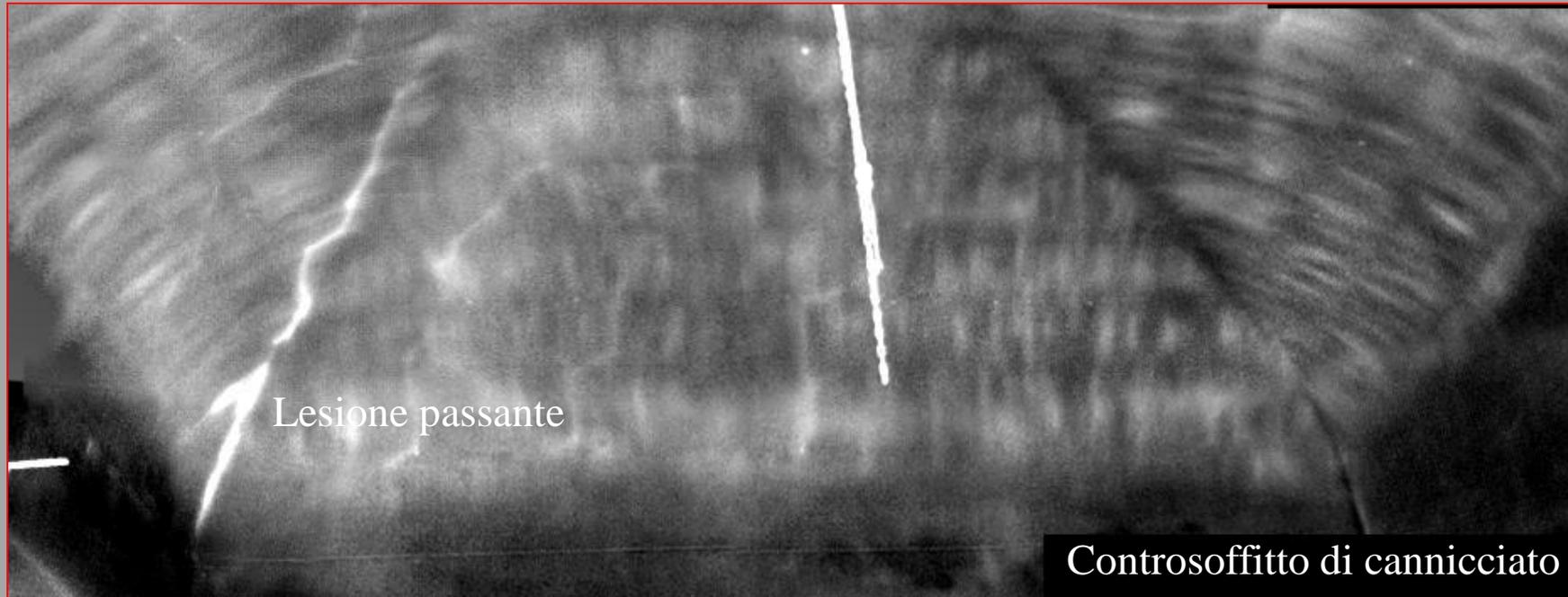
Thermogram

Palazzo Sacrati - Strozzi

Piano I°, stanza 16 - Soffitto



Planimetria del piano primo di Palazzo Sacrati - Strozzi (Fi)



Termogramma



PALAZZO CAPPONI



Termogramma

Prof. G. A. Centauro
Laboratorio di restauro



Maurizio Seracini
San Diego State University



Termogramma

Prof. G. A. Centauro
Laboratorio di restauro

Modern Buildings



Thermogram

Chiesa dei Battilani – Firenze



L'immagine termica in falsi colori dell'attuale piano di calpestio della chiesa, presentata secondo una scala cromatica che va dal blu al rosa e cioè dalle aree più fredde a quelle più calde, ci mostra notevoli emissioni termiche provenienti da varie aree del pavimento. Al momento delle riprese, l'apporto termico maggiore era concentrato lungo il perimetro esterno e in varie zone ben delimitate che sembrano corrispondere a modifiche strutturali del pavimento. Comunque, la parte di pavimentazione più prossima all'impalcato è risultata la più calda. Una tale dinamica potrebbe trovare una plausibile spiegazione ipotizzando delle cavità sottostanti, dal momento che non risultano attivi né corpi radianti, né impianti di riscaldamento interrati.



Piano di calpestio della Chiesa – immagine termografica in falsi colori

L'esame TMV alla scala urbana e la ricerca storica applicata



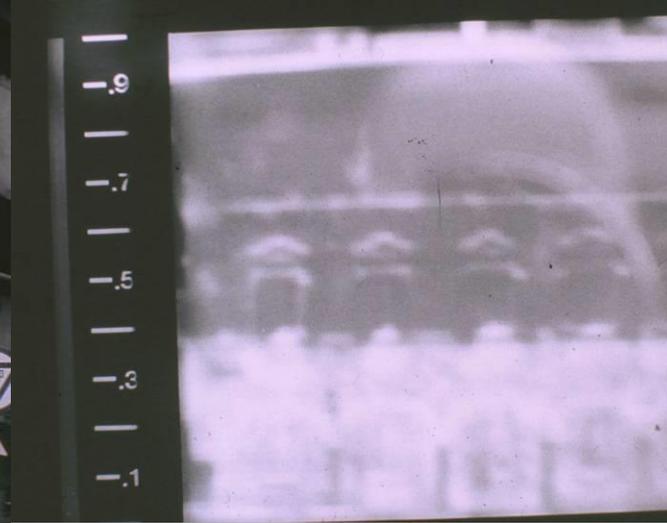
Veduta del 1742 con la Chiesa di S. Romolo



Esame TMV



Termografia architettonica: applicazioni di studio



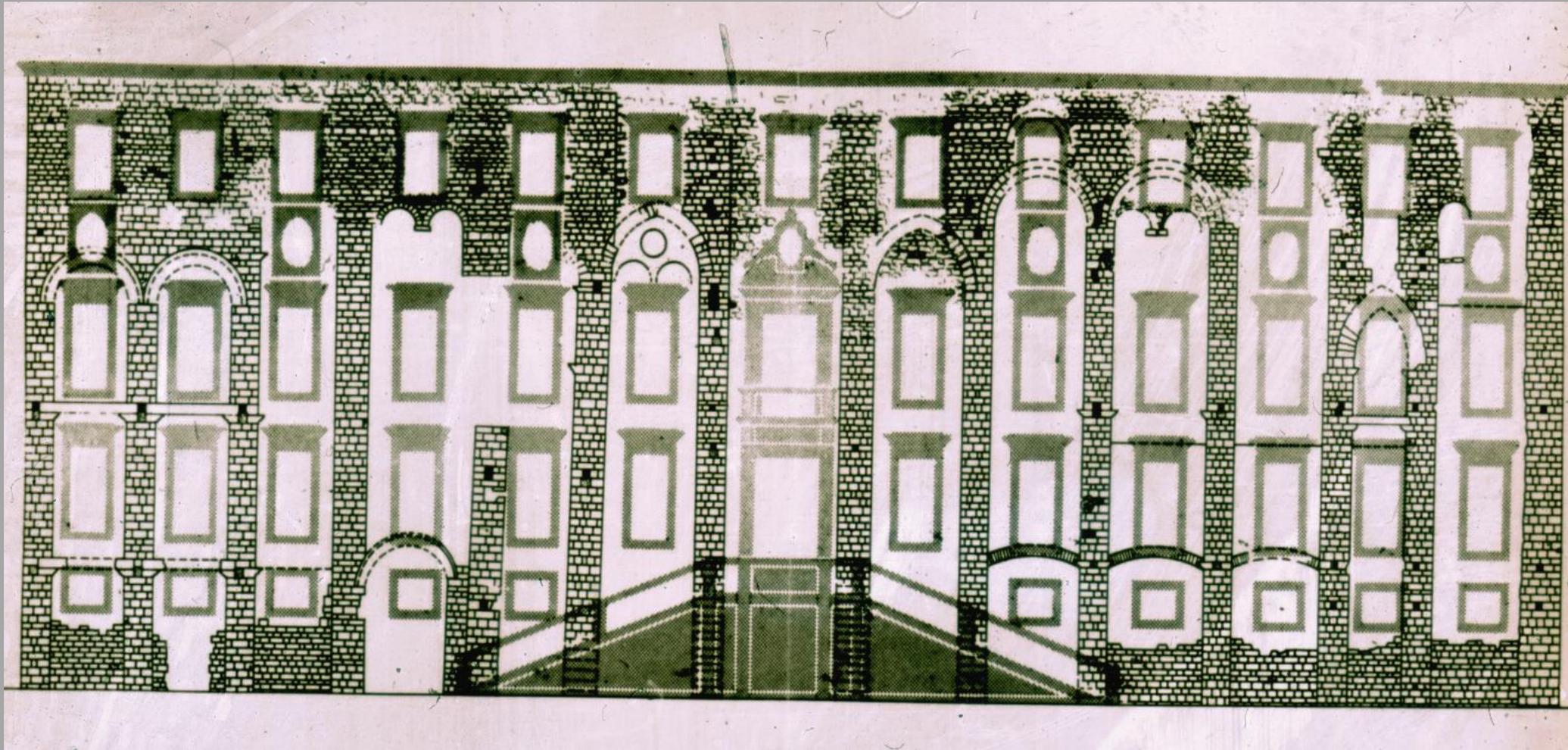
Firenze, palazzo della Borsa



Pisa, palazzo della Scuola Normale



Prof. G.A. Centauro
Laboratorio di restauro



PALAZZO DELLA SCUOLA NORMALE SU STRUTTURE MEDIEVALI PREESENTI

La DTS (distribuzione termica superficiale)

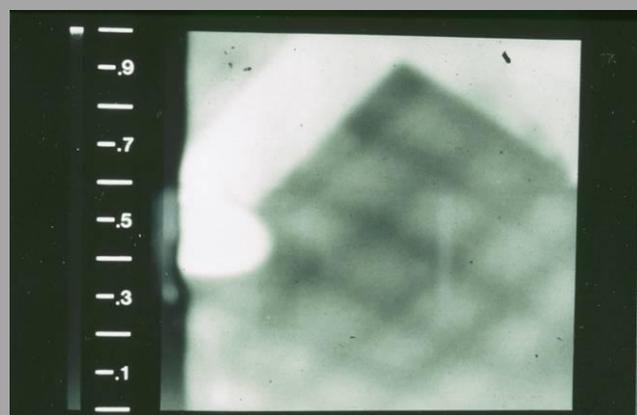
- L'utilità delle prese termografiche è poi allargabile ad un vasto ambito di situazioni e studi sul comportamento termico dei materiali, non solo murari o lapidei, ma anche metalli e leghe diverse, es. per il controllo di saldature ed ossidazioni.
- La possibilità di realizzare restituzioni grafiche dall'assemblaggio dei termogrammi offre inoltre l'opportunità di produrre cartografie tematiche relative all'assetto costruttivo, al dissesto ed alle altre patologie presenti a livello strutturale ecc.
- Con l'ausilio delle tecniche termografiche è possibile valutare la distribuzione termica superficiale su pareti o su altri corpi solidi, con possibilità di redigere nelle diverse stagioni e nelle varie ore del giorno mappature per isoterme.
- Inoltre la termografia può opportunamente integrarsi ad altre ricerche ed indagini diagnostico-conoscitive (studi storico evolutivi sul manufatto, analisi microclimatiche, indagini strutturali ecc.).



TMV su pareti in c.a. per verifiche strutturali



Cagliari, Pinacoteca,
esami termovisivi
delle strutture in c.a.



Verifica della presenza dei ferri d'armatura

Parete in c.a., immagine al visibile



Immagine in riflessione termica



Fase di riscaldamento

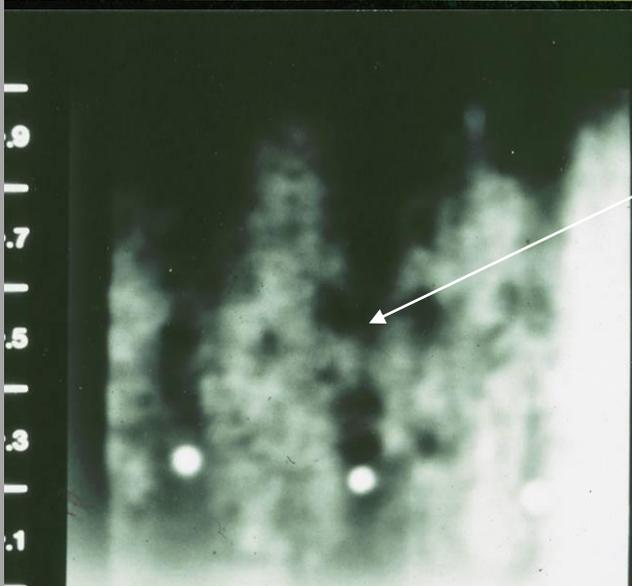
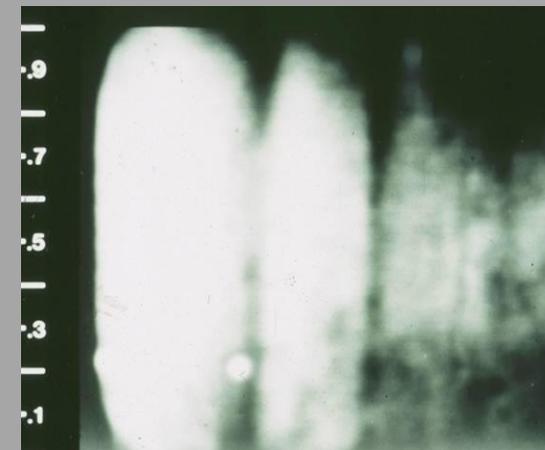
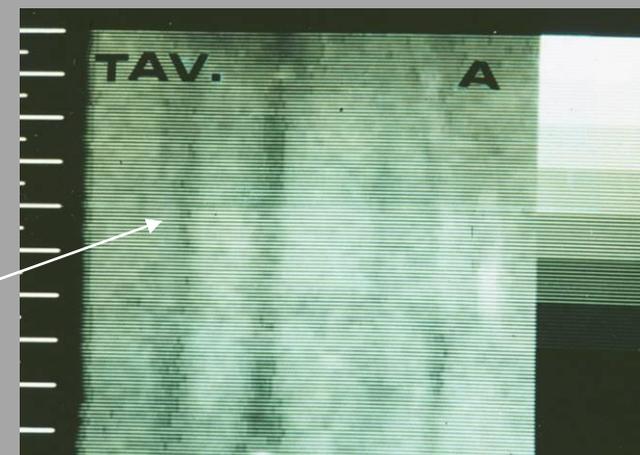


Immagine in emissione termica

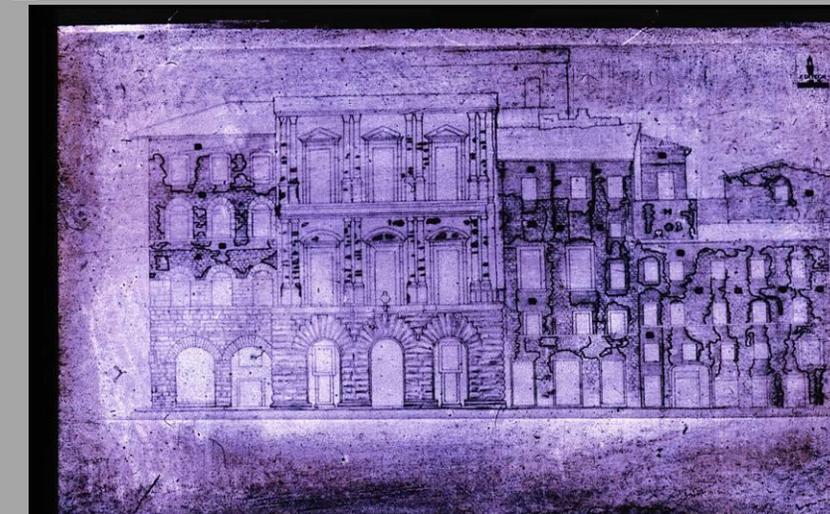
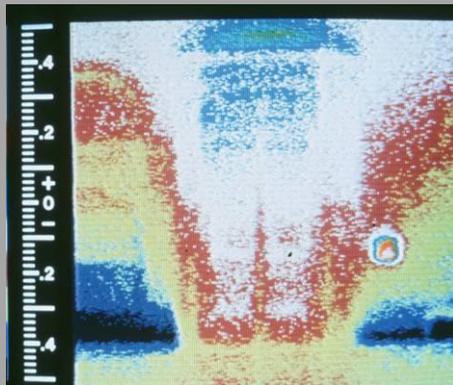
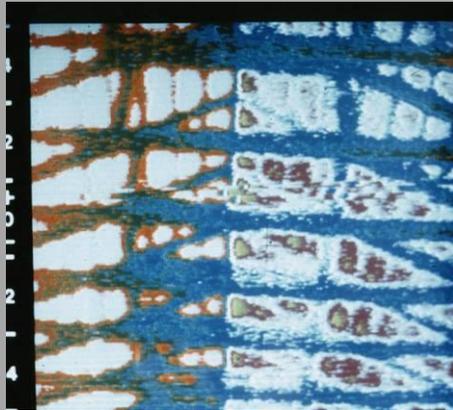
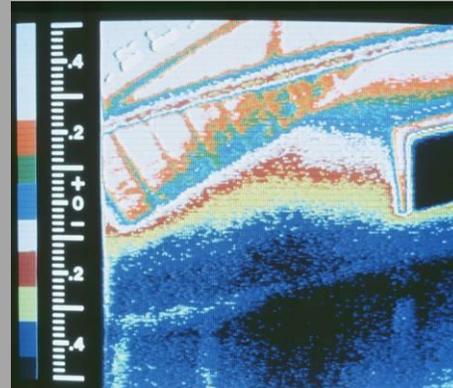
Termogramma selezionato



Analisi delle problematiche conservative

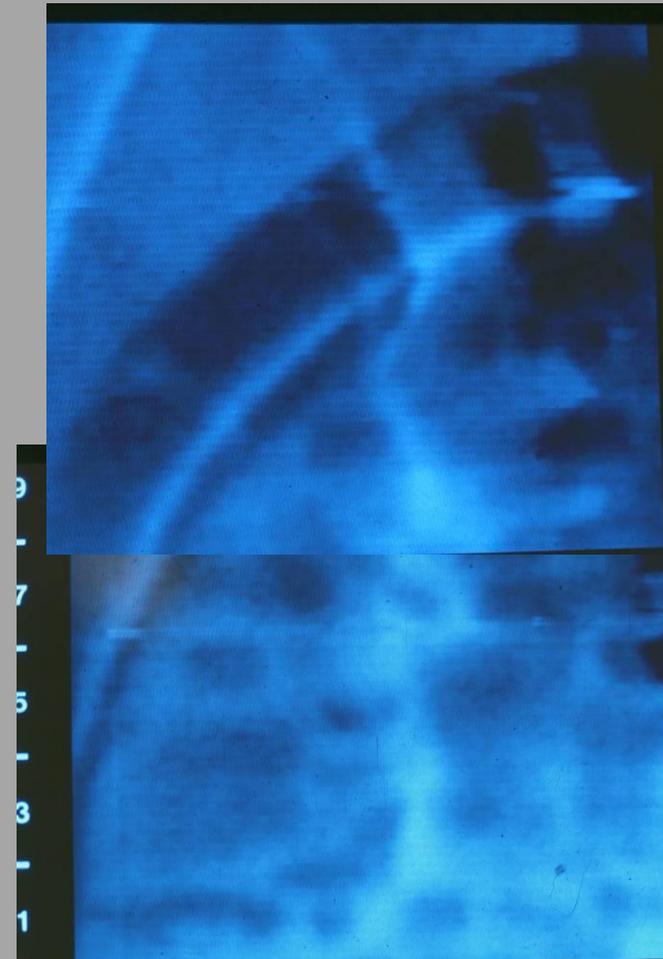


Rimini, Tempio Malatestiano, le dispersioni termiche delle coperture



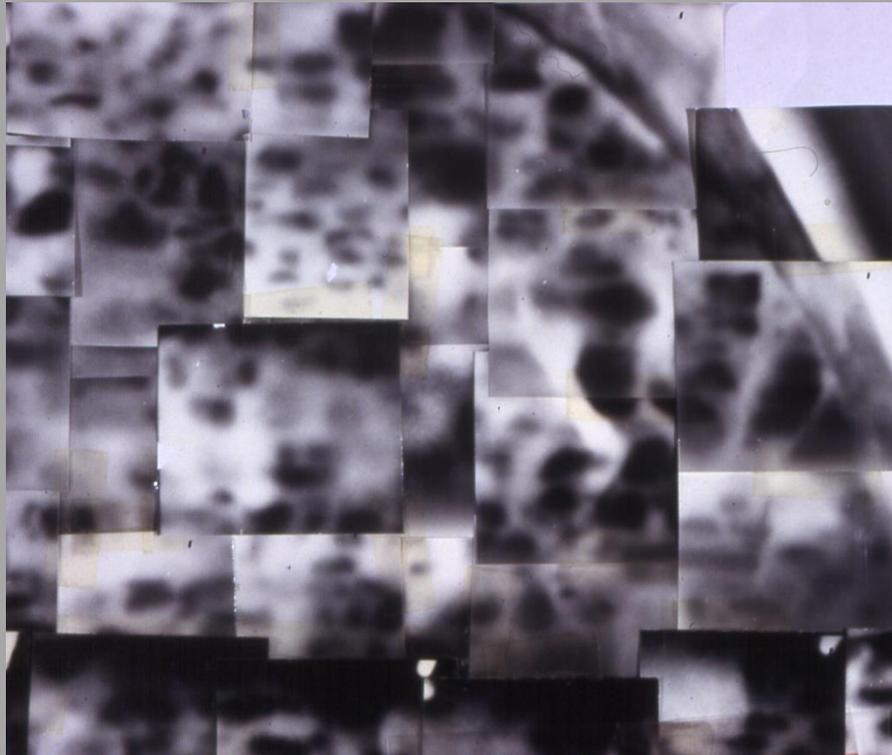
Firenze, Palazzo Uguccioni, esame TMV, analisi delle strutture e dei materiali

Lo studio termografico del plesso fessurativo



Montaggio di termogrammi su lesione parietale

Lo studio termografico parietale di dettaglio



Arezzo, Basilica di S. Francesco, Cappella Maggiore, Piero della Francesca, Morte di Adamo, assemblaggio di termogrammi corrispondenti parte destra della lunetta



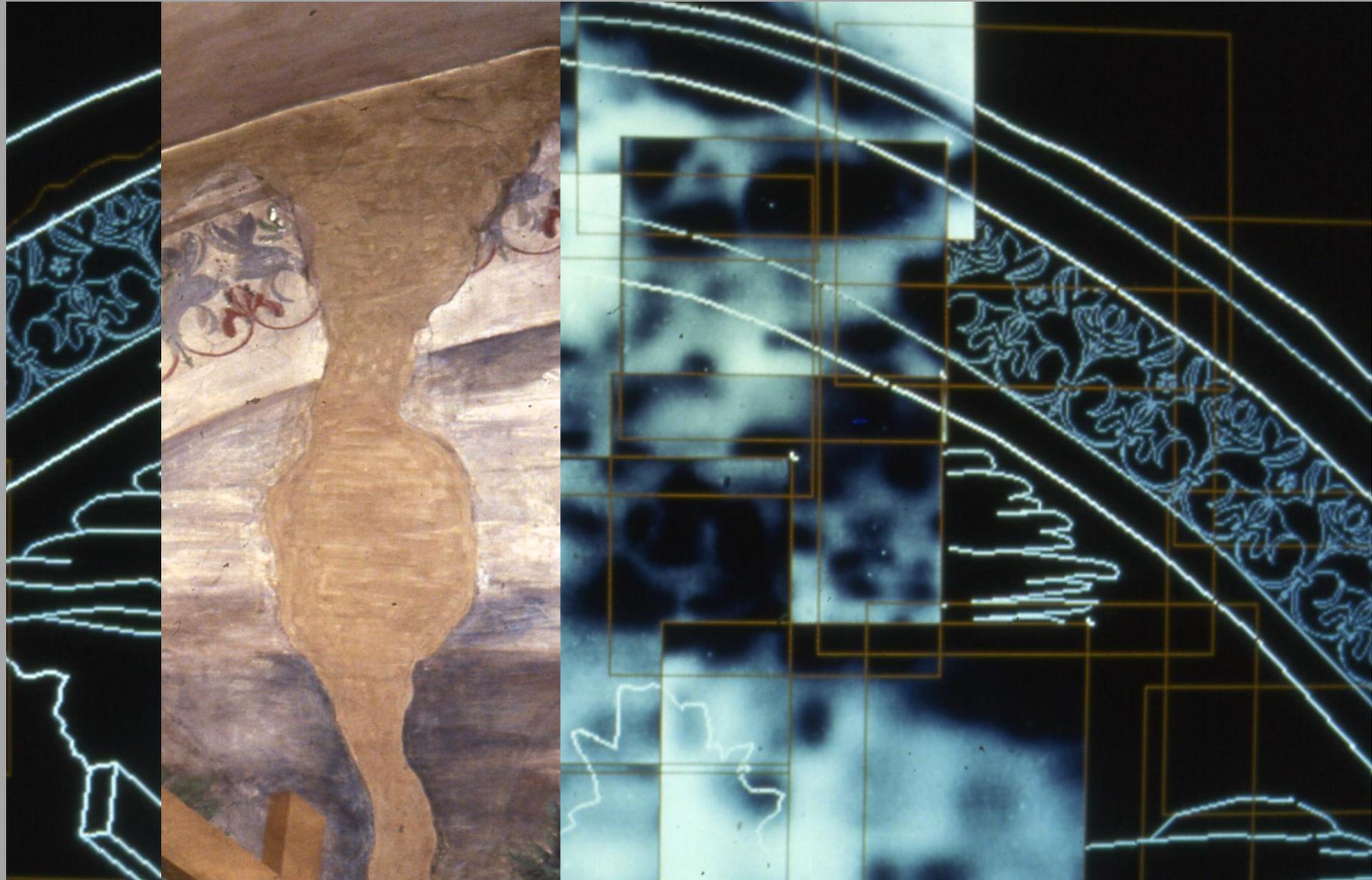
La documentazione delle immagini termovisive ottenuta con prese fotografiche, con registrazioni in videotape o acquisizioni di immagini digitali, consente poi di fare utili confronti tra riprese effettuate in tempi diversi, nonché di realizzare assemblaggi e mosaicature di sequenze di immagini, sopra le quali è poi possibile eseguire ulteriori elaborazioni tematiche o produrre rappresentazioni diverse da un punto di vista grafico (profili termici, modellazioni tridimensionali ecc.).

Le immagini inoltre, utilizzando i recenti sistemi di raddrizzamento, collimazione e referenziazione grafica, possono essere gestite in via informatica e restituite fotogrammetricamente.

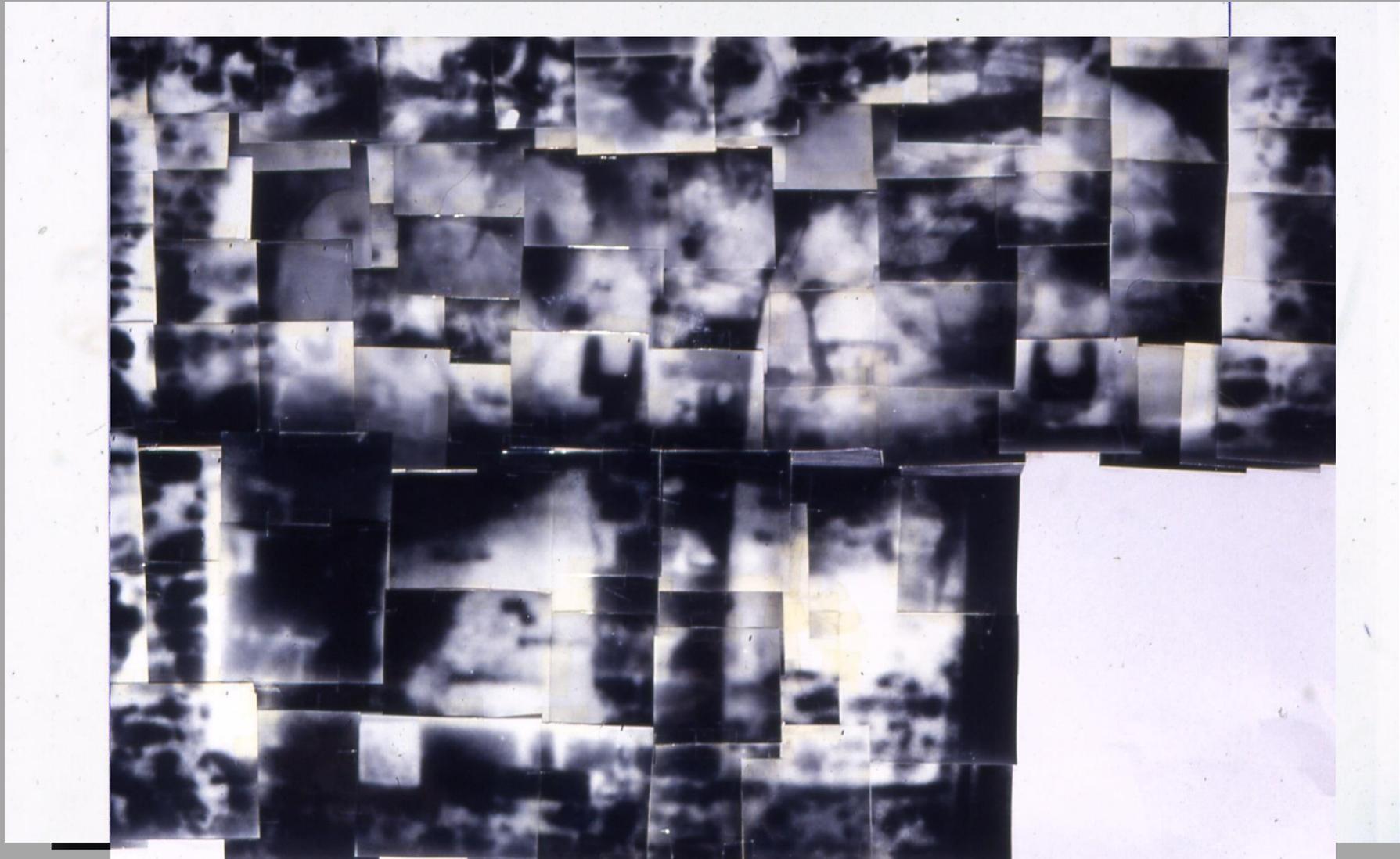
La calibrazione e corretta referenziazione dei risultati delle indagini termografiche, garantita dal rilievo fotogrammetrico e dalla gestione digitale delle elaborazioni organicamente condotte, consente di superare gli attuali limiti applicativi del procedimento diagnostico di tipo termovisivo.

Questo sistema innovativo di esame prende il nome di *indagine termografica metrico digitale* e risulta particolarmente utile per lo studi dei supporti parietali pittorici.

Mosaicatura di termogrammi e referenziazione geometrica



L'individuazione di arcosolii sotto le pitture

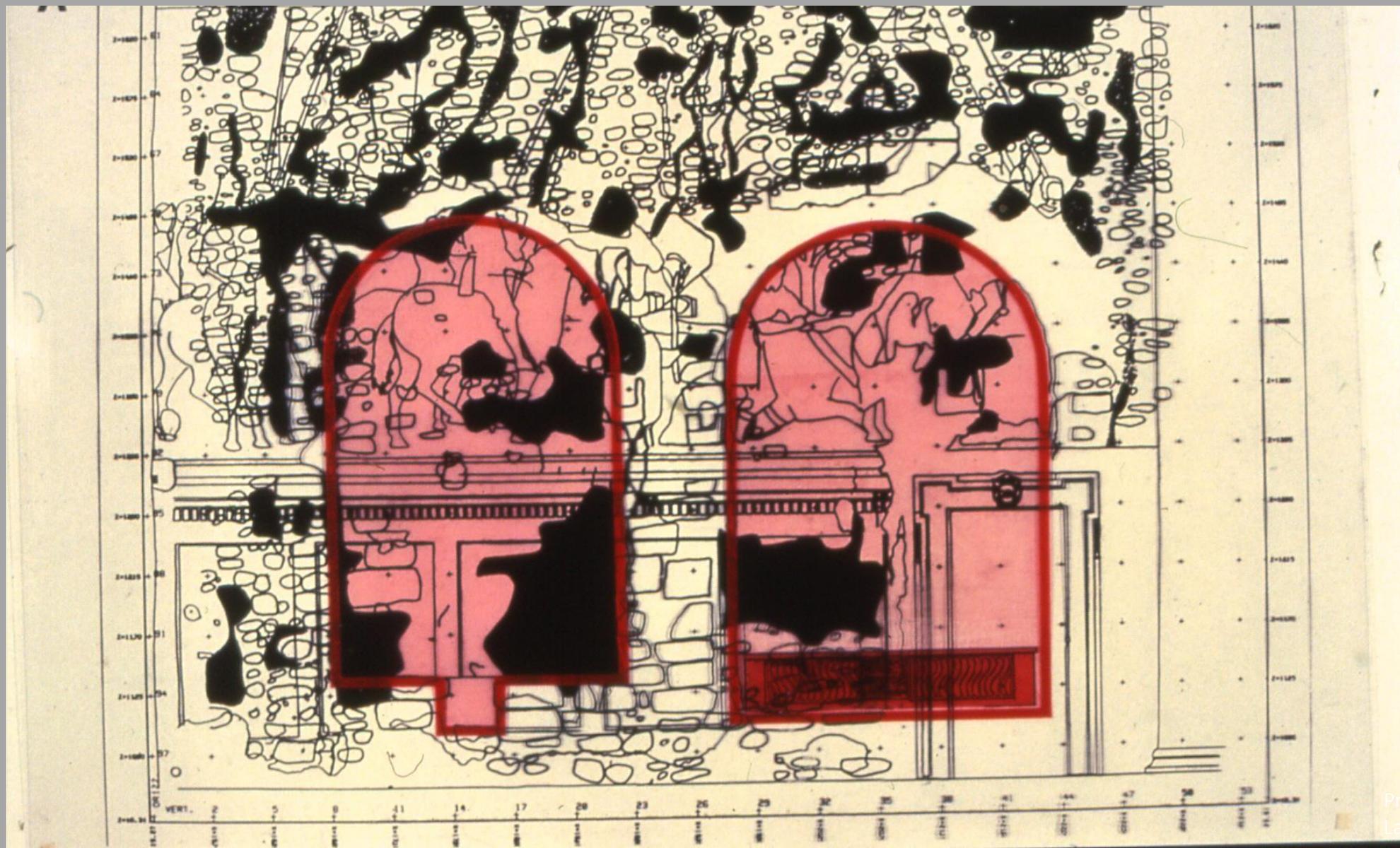


Arezzo, Basilica di S. Francesco, Cappella Maggiore, parete "*a cornu epistolae*", esami TMV

Studio ed interpretazione dei termogrammi



La restituzione grafica integrata dell'esame TMV



Altre metodiche diagnostiche per il restauro

Indagini magnetometriche (metal-detector), soniche, ultrasoniche e radar

- L'indagine diagnostica che si serve della propagazione del suono e della risposta acustica data dai vari materiali per avere informazioni sullo stato di conservazione o d'integrità dei manufatti fa parte di una prassi certamente collaudata; per gli intonaci ammalorati è stato un sistema da sempre utilizzato dai restauratori quello della semplice battitura con le nocche della mano e dell'immediata auscultazione del suono emesso, del pieno come del vuoto rilevatore di un allentamento o di una vacuità presente nel muro. Oggi alla consolidata pratica di una volta si affiancano moderne tecnologie che impiegano gli ultrasuoni per i fini diagnostici. E le indagini soniche svolgono un ruolo di primo piano per la conservazione nell'ambito diagnostico in campo architettonico ed in quello artistico.
- La necessità di stimare con sufficiente approssimazione la qualità e l'eterogeneità dei materiali impiegati in edilizia ha poi dilatato con la sperimentazione anche l'impiego di metodiche sempre più affinate nel campo delle indagini acustiche.
- La verifica della continuità materica di pietre e metalli può essere infatti soddisfatta con l'ausilio degli ultrasuoni, così come sono indagabili, seppure con risultati diversamente stimabili secondo i diversi materiali studiati, seguendo le metodiche proprie delle indagini soniche, gli effetti dei fenomeni gelivi su pietre arenarie e calcaree, e comunque la presenza di microfessure e di cavità in materiali ad alta densità, oppure l'adesione di un intonaco al supporto, od anche le differenze nell'apparecchio murario in murature miste di notevole spessore ecc.
- Questi fattori rendono l'applicazione di tali indagini sussidiaria alla lettura termovisiva che per sua caratteristica limita il campo di osservazione agli strati superficiali posti immediatamente a ridosso degli strati di intonaco.

Magnetometria

- Unitamente alle indagini soniche possono impiegarsi, per lo studio delle presenze metalliche inglobate nel muro e loro dislocazione, le indagini di tipo magnetometrico, effettuabili con l'ausilio di cerca metalli portatili (metal-detector). Altre strumentazioni sono invece dotate di centralina di rilevamento collegata ad una sonda con due bobine disposte a distanza prefissata. Un flusso di corrente alternata crea un campo magnetico all'interno della sonda che si propaga lungo l'asse dello strumento. Gli oggetti metallici intercettati da tale campo magnetico modificano il voltaggio della bobina segnalando la presenza e le dimensioni dell'oggetto intercettato con approssimazioni di circa 1/ 1,5 cm.
- Particolarmente interessante è l'impiego di tali metodiche per accertare la presenza in materiali non ferro-magnetici di metalli, da cui deriva anche il nome di indagini metallografiche dato a questo tipo di rilevamenti. In questo modo è misurabile il rapporto diametro/ copriferro dell'oggetto intercettato. Nel restauro architettonico l'uso di metal-detector consente di identificare nel muro la presenza di chiodature o staffature di consolidamento, di cerchiature o grappature di cordonature e costoloni di volte, ecc. oppure di posizionare e dimensionare i ferri di armatura in strutture in c.a., nonché di condutture ed tubazioni di impianti.

Indagini soniche

- Tra gli studi connessi con le indagini magnetometriche ed ultrasoniche propriamente dette possiamo inserire anche quei rilievi ed quelle indagini combinate, di tipo sonico, che ricreano attraverso vibrazioni udibili (inferiori ai 20 KHZ), prodotte con mezzi meccanici di varia natura, onde elastiche che vengono studiate per scopi diagnostici al fine di stabilire lo stato di conservazione di un manufatto.
- Le indagini soniche sono per lo più applicate per stabilire la misurazione della profondità di piano di posa delle fondazioni di muratura portanti, individuazioni di lesioni o discontinuità murarie e per stabilire la continuità, lo stato di conservazione e la funzionalità (o tensionamento) di catene metalliche internate nelle murature.
- Queste indagini si basano sullo studio, con misure ed analisi qualitative, delle caratteristiche di propagazione delle onde elastiche all'interno di corpi solidi. Attraverso una sorgente di emissione di onde elastiche si generano due tipi di onde: di compressione e di taglio (primarie e secondarie) che appaiono in sequenza. In presenza di piano di discontinuità (rottture, riduzioni di sezione di propagazione) l'onda propagata disperde in modo anomalo energia che un captatore sonico puntualmente rileva e registra.
- Nel caso di studio di catene, che può interessare le applicazioni su edifici colpiti da sisma, le indagini si sviluppano preliminarmente con prove di idoneità sulla parte metallica da indagare mirate a verificare la sostenibilità degli esami tensionali di tipo elettromagnetico con misure della resistenza elettrica rispetto alla massa. Per procedere all'esecuzione di tali indagini dovrà essere verificata la possibilità di ottenere buone connessioni sulle testate dei ferri per consentire la rilevazione di valori elettrici e dei vari segnali.
- Il rilievo dell'onda d'urto, mediante l'utilizzo di martello strumentato con sensore di forza, oscilloscopio a memoria digitale e registratore magnetico a cassette, produce i seguenti risultati:
 - determinazione dello stato di integrità del tirante e verifica di eventuali anomalie, restringimenti o altro, della sezione resistente della catena;
 - la misura di differenza del potenziale rispetto alla massa fornisce invece informazioni sull'esistenza eventuale di fenomeni chimico-fisici in atto nell'intorno del metallo, identificando rilevatori processi di ossidazione; a tale proposito si attua anche la misura delle tensioni alternate indotte sulla struttura metallica che offre informazioni sui campi elettrici instaurati in prossimità della catene;
 - attraverso il metodo impulsometrico, o del rilievo delle variazioni di impedenza elettrica, ottenibile con un generatore di segnali e le strumentazioni sopra descritte, è invece possibile dare una valutazione di tipo qualitativo sulla situazione della struttura in esame.

Prove ultrasoniche

- L'impiego degli ultrasuoni trova la migliore applicazione quando si ha necessità di compiere indagini su materiali estremamente compatti, quali il ferro e le altre leghe metalliche oppure, tra i materiali litoidi, le pietre calcaree, oppure nei calcestruzzi.
- Il principio di funzionamento è del tutto simile a quello indicato per le indagini soniche, cambiano naturalmente le frequenze di studio, in questo caso sempre superiori ai 20 KHz, tuttavia generalmente comprese tra 50 e 100 KHz. La propagazione delle onde ultrasoniche di compressione e di taglio copre lunghezze superiori a quelle a bassa frequenza, e sono sensibili anche alle più piccole discontinuità, ad esempio non si propagano nei gas che le riflettono. In tali condizioni d'impiego è senz'altro possibile stimare discontinuità materiche inferiori al millimetro. L'auscultazione dinamica del suono consente in ogni caso di registrare le variazioni qualitative e le diversità morfologiche esistenti nei vari materiali e nelle murature eterogenee, permettendo con buona approssimazione di segnalare la dislocazione di piccoli vuoti o cavità strutturali negli spessori murari. Per i terreni, sempreché costipati e compatti, è preferibile impiegare onde soniche, anche se per una certa empiricità connaturata a questo tipo d'indagine, occorre di pari passo con il procedere dell'indagine dotarsi di chiavi interpretative univoche, per la qual cosa è necessario eseguire prelievi e carotaggi di materiali stratigrafici al fine di costruirsi idonei parametri di valutazione.
- In occasione di carotaggi abbinati ad esami con sonde televisive o di tipo endoscopico per lo studio del plesso fessurativo e delle strutture, l'indagine ultrasonica consente di precisare in modo efficace la fenomenologia pregressa o in atto di dissesto. Questo tipo di accertamento si può considerare di facile impiego, rendendosi utilizzabile nel settore edilizio e nella ricognizione su moderne strutture in c. a.
- La verifica di lesioni e dissesti, di rotture o corrosione di ferri di armatura di plinti, solette e travi in c.a. trova nell'impiego di ultrasuoni una più che discreta applicazione. Per i calcestruzzi e gli acciai le prove ultrasoniche sono poi impiegate per verificare il grado di omogeneità, il valore del modulo elastico e la resistenza dei calcestruzzi. In quest'ultimo caso l'uso combinato di prove sclerometriche con prove di tipo ultrasonico è in grado di fornire dati di discreta approssimazione.
- In definitiva possiamo dire che le indagini soniche trovano applicazione nella caratterizzazione elastica e nell'accertamento di discontinuità nelle murature e nei terreni di fondazione.

Indagini soniche. Rilevazione della velocità di propagazione



Misure di velocità sonica su colonne in pietra (ISMES)

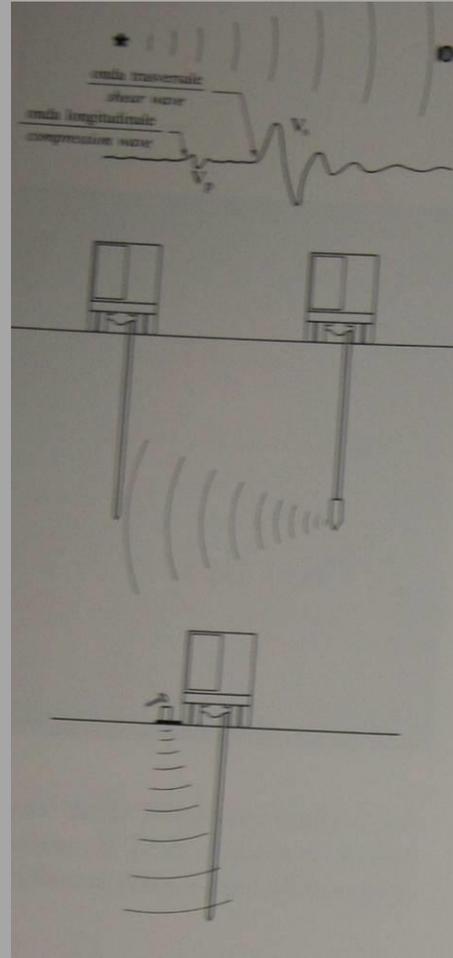


Prove soniche per trasparenza su un pilastro (ISMES)

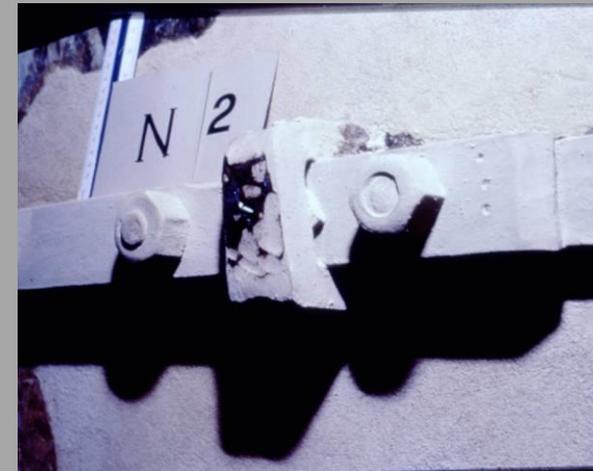
Indagini geofisiche, le onde elastiche e sonore



Misura della velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali (Conc. ISMES)



Onde sonore trasversali e Longitudinali in propagazione

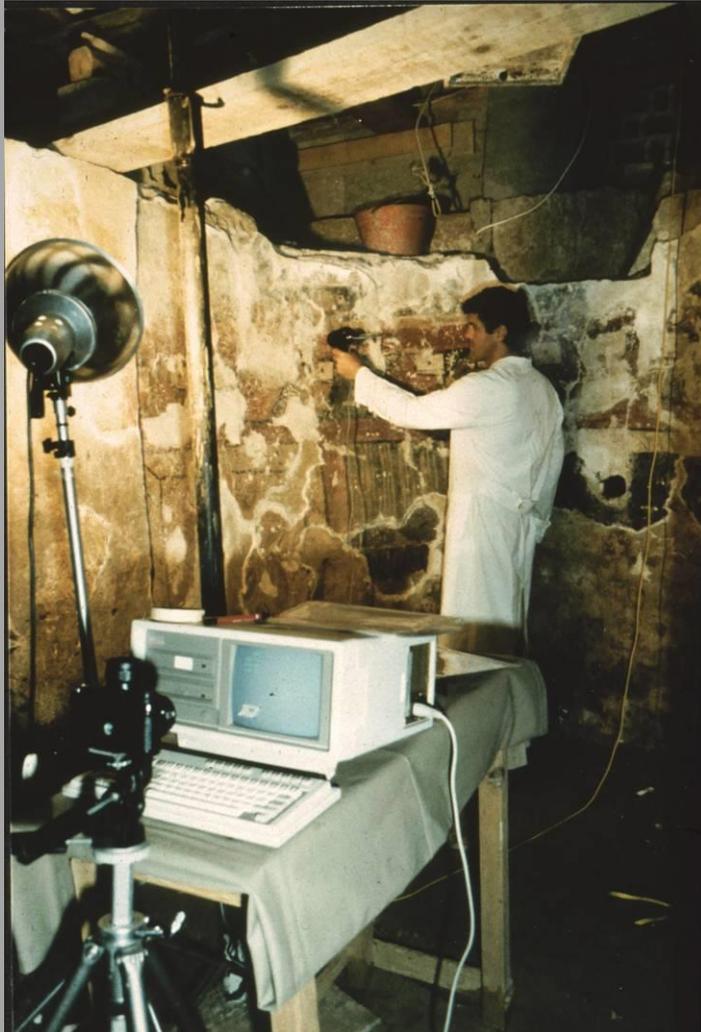


Rilevo dell'onda d'urto per lo studio di tiranti metallici (Conc.CND, Roma)

Indagini ecospettrografiche

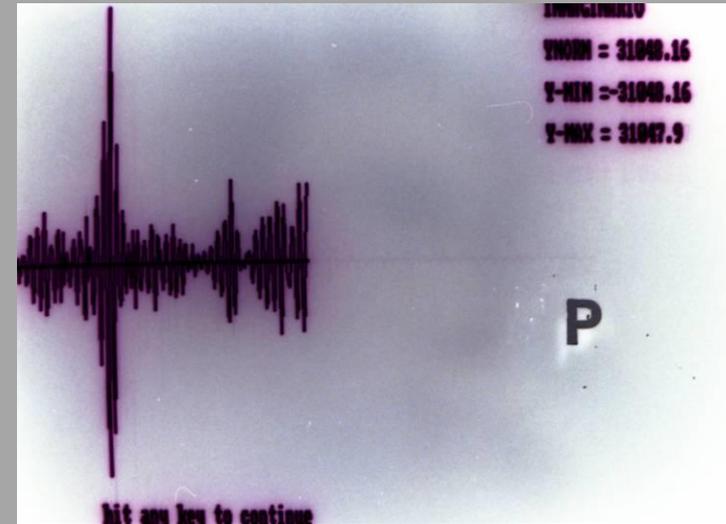
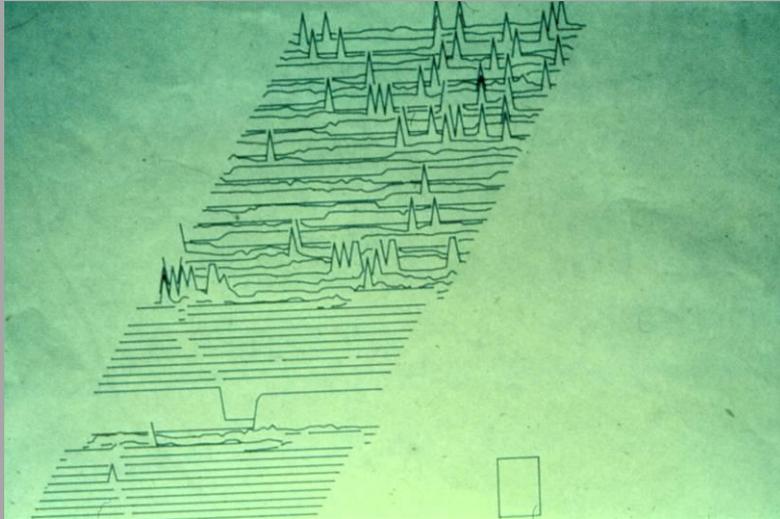
- Una particolare indagine di tipo sonico è quella che studia il distacco di intonaci dipinti: eseguita tradizionalmente con il metodo della battitura delle nocche, tale indagine è stata recentemente sostituita con applicazioni strumentali, molto meno invasive del sistema manuale [\[1\]](#).
- Dopo l'evento sismico, tra gli accertamenti degli eventuali danni provocati al patrimonio artistico e, in particolare, ai dipinti murali, la ricognizione sullo stato di adesione degli intonaci può risultare particolarmente importante ai fini conservativi. In questo caso può essere impiegata questa particolare metodica d'indagine ecospettrografica che si basa su elementari principi fisici.
- La strumentazione computerizzata che viene impiegata per le indagini utilizza un trasduttore trasmettente con una testina di materiale compatto rivestita da un sottile strato di gomma al silicone che viene direttamente appoggiato sull'intonaco dipinto da rilevare senza con ciò procurare alcun tipo di abrasione o rischio di rottura della pellicola pittorica. Tale testina è montata su un supporto cilindrico sul quale è stata avvolta una bobina percorsa da una corrente impulsiva immersa nel campo di un magnete permanente. La testina è realizzata opportunamente in modo da seguire le variazioni di corrente di eccitazione, generando nella parete, come conseguenza di un urto dalle caratteristiche note e ripetibili, un impulso il cui spettro può essere considerato costante, nelle bande utili, entro limiti accettabili. Le onde elastiche che ritornano dalla parete sono raccolte da un trasduttore piezoelettrico accoppiato con la stessa tramite una sottile intercapedine d'aria; il segnale elettrico viene amplificato per eliminare l'effetto del "rumore" prodotto dallo strumento.
- L'esame del distacco avviene in tempo reale attraverso l'individuazione del valore della frequenza fondamentale di oscillazione e dello smorzamento. L'analisi spettrale, a trasformate di Fourier, del segnale emesso consente di individuare il vuoto (indicato da una frequenza del valore all'incirca di 2,2 KHz) corrispondente al distacco dell'intonaco dal supporto, nonché di stimare l'ampiezza dello stesso.

Un esempio di applicazione dell'ecospettrografo per uno studio propedeutico al restauro



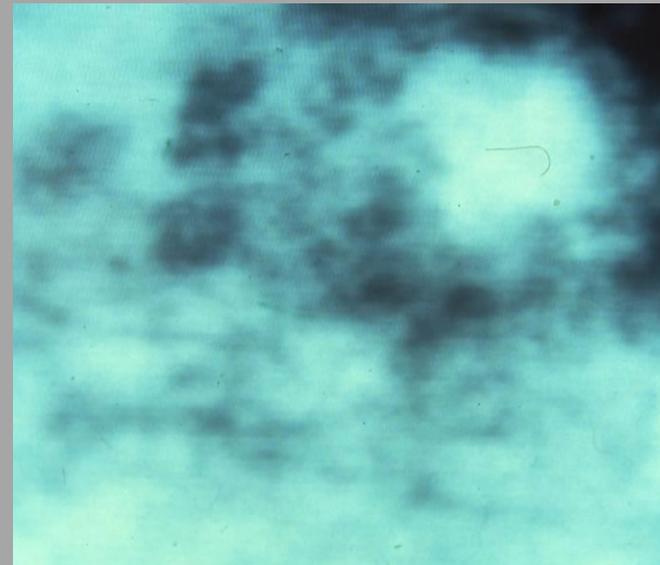
Impiego di ecospettrografo per lo studio del distacco di intonaci dipinti (Conc. ditta E.DI.TECH. Di Firenze)

Esami comparati ecospettrografici e termografici



Sopra, grafico e spettro acustico di porzione di intonaco in distacco.

Sotto, termogramma della stessa area (in bianco evidenziata la zona in distacco).

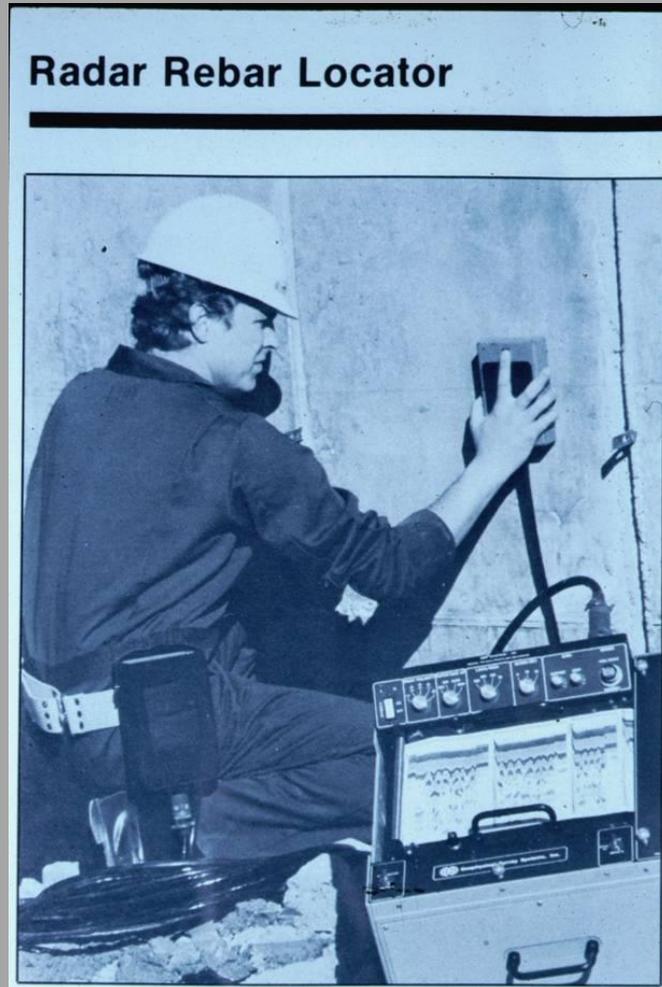


Da: «Un Progetto Piero della Francesca», 1989

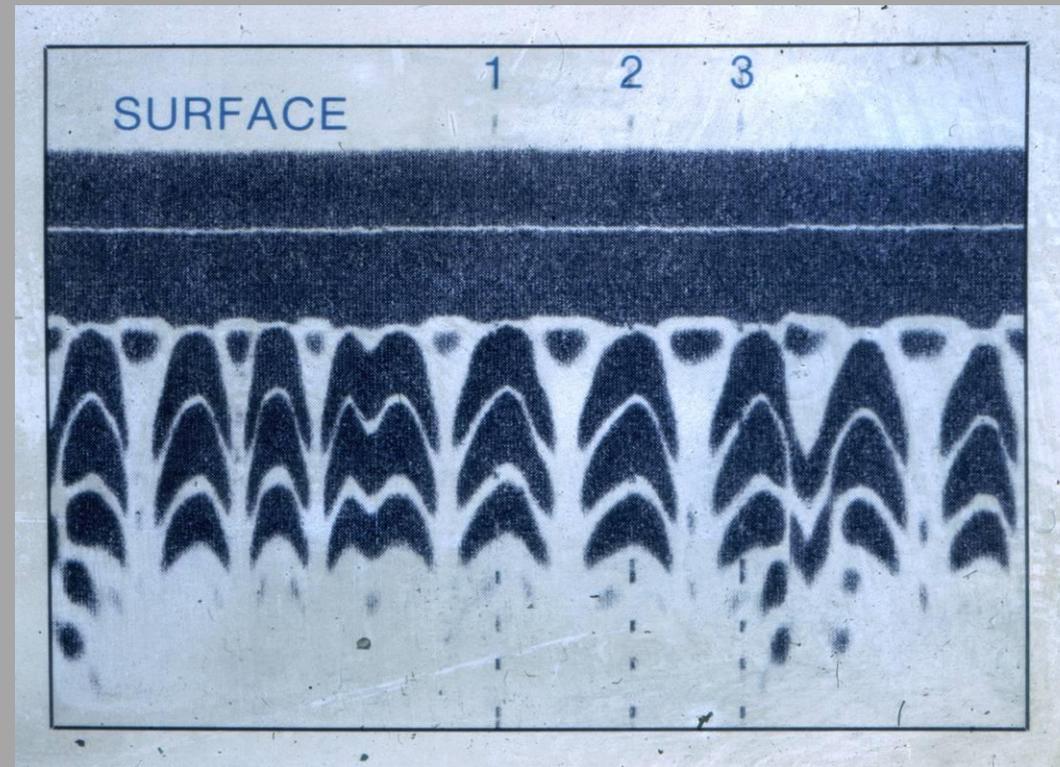
Radar geofisico (o georadar)

- Nello studio delle cavità e delle fratture, soprattutto per la caratterizzazione dei contatti litologici e dei piani di congiunzione nelle rocce è stata applicata, all'incirca dalla metà degli anni '70, una tecnica d'indagine basata sul passaggio delle onde elettromagnetiche attraverso i terreni.
- La metodica di derivazione di ricerche applicate soprattutto in U.S.A. in campo militare, conosciute come "*Ground-Penetrating Radar*" (G.P.R.) è stata successivamente adottata con successo per lo studio dei terreni.
- In campo architettonico ha invece trovato impiego nelle indagini su strutture pavimentali (sottofondi in c.a., manti stradali ecc.), gallerie o su parti strutturali di fondazione e grande spessore (pilastri ecc.); non meno importanti sono le applicazioni geotecniche nelle indagini sui terreni mirate allo studio delle giaciture stratigrafiche ed alle analisi compositive.
- Negli studi archeologici consente di verificare discontinuità nei terreni ed indirizzare le operazioni di scavo con verifiche preventive in grado di segnalare la presenza di oggetti, manufatti e/o strutture murarie sepolte.
- In impieghi ambientali ed ecologici può essere utile per localizzare negli interramenti condotte di acque di scarico oppure contenitori di materiali diversi, anche tossici, dispersi in discarica.
- Nell'ambito delle problematiche di indagini in aree colpite da sisma, al di là degli impieghi ricognitivi per la localizzazione di vuoti celati da compatti strati di depositi materici rimasti compressi da movimenti in superficie di macchine ed autocarri, valgono le applicazioni finalizzate alla conoscenza degli ancoraggi e degli spessori di rivestimento delle strutture basamentali di strutture murarie o in c.a.

L'introspezione con georadar



Applicazione dello strumento per l'analisi parietale



Restituzione grafica dell'introspezione analitica nello studio mirato all'accertamento della presenza di ferri in struttura in c.a.

La strumentazione per l'analisi con georadar

- Le onde elettromagnetiche utilizzate sono ad altissima frequenza da 100 MHz fino a 1 GHz; l'apparecchiatura è costituita da due antenne, una con funzione di trasmettitore ed una di ricevitore, da un'unità di controllo, da registratori magnetici e restitutori grafici dei segnali.
- Il dimensionamento e la potenza delle antenne, nonché l'ottimizzazione delle frequenze da usare, dipendono dalla caratterizzazione dell'oggetto da esaminare. La procedura d'intervento prevede la realizzazione di scansioni con l'ausilio di un carrello, sul quale sono installate le antenne trasmettenti e riceventi, da spostare lungo prestabiliti percorsi di rilievo al fine di produrre profili delle aeree indagate.
- L'unità di controllo invia un segnale elettromagnetico all'antenna trasmittente che a sua volta lo invia all'interno della struttura o nel terreno. In base al principio della riflessione quando il segnale colpisce un'interfaccia che separa strati litoidi o crea discontinuità nei materiali una parte dell'energia trasmessa viene riflessa e captata dall'antenna ricevente che amplifica il segnale di ritorno che viene registrato sul registratore magnetico e riprodotto da quello grafico.
- Il profilo grafico ottenuto viene stampato su carta elettrosensibile da una testina rotante del registratore grafico. Un profilo continuo delle condizioni della sub-superficie è stampato sul foglio mentre il carrello si sposta sulla superficie della struttura indagata. La registrazione consente di avere: le distanze percorse dall'antenna in scala orizzontale rapportata alla velocità di scorrimento del carrello e alla velocità di avanzamento della carta; il tempo di ricezione del segnale che conoscendo la velocità di propagazione dell'impulso elettromagnetico consente di stimare la profondità della giacitura delle linee di frattura e dei vuoti e l'ampiezza di questi.

GEOELECTRIC SURVEY

System based on the measurement of the electric resistivity of the ground

Towed arrays : ARP© system

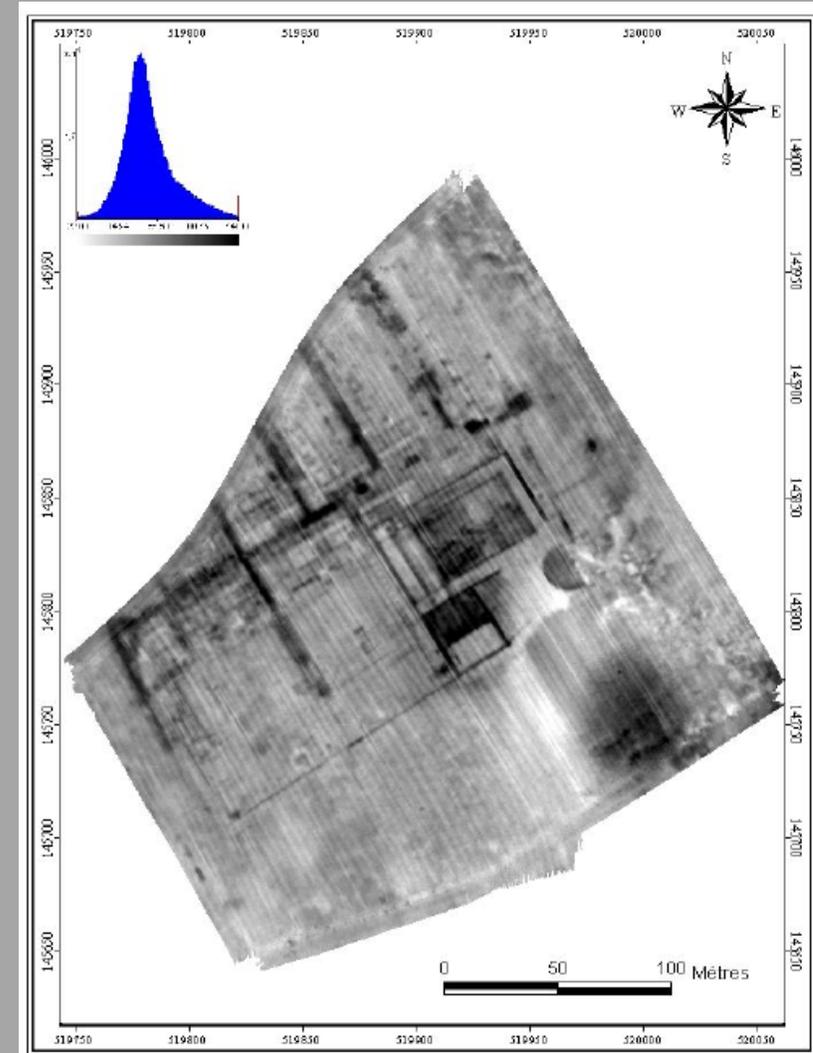
✓Quad,ATV, + rugged computer + dGPS + radar + specific resistivimeter



Investigation depth : 0.5, 1 and 2 m

✓Operating procedure : continuously

✓Production rate: min 50 ha/day + 1people



Geo Map Viel – Evreux, France Roman Forum–

Ground scanned in one day: 7 ha

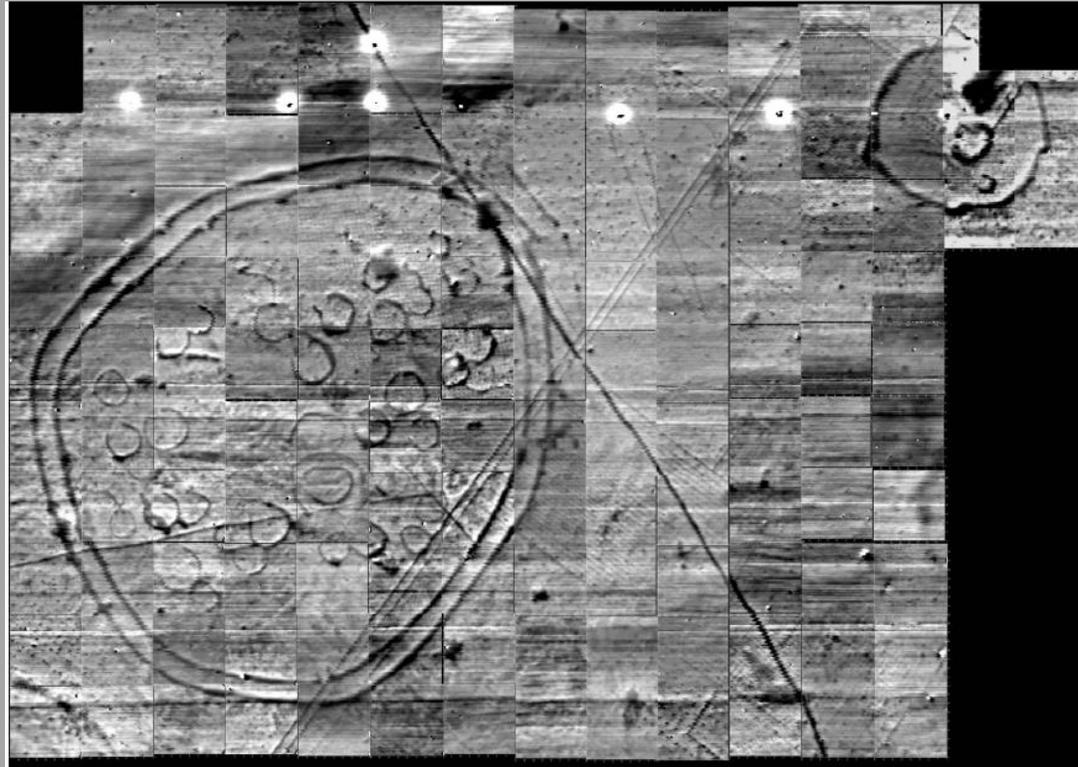
GEOMAGNETIC SURVEY



Multisensor Magnetic System
(up to 8 probes)

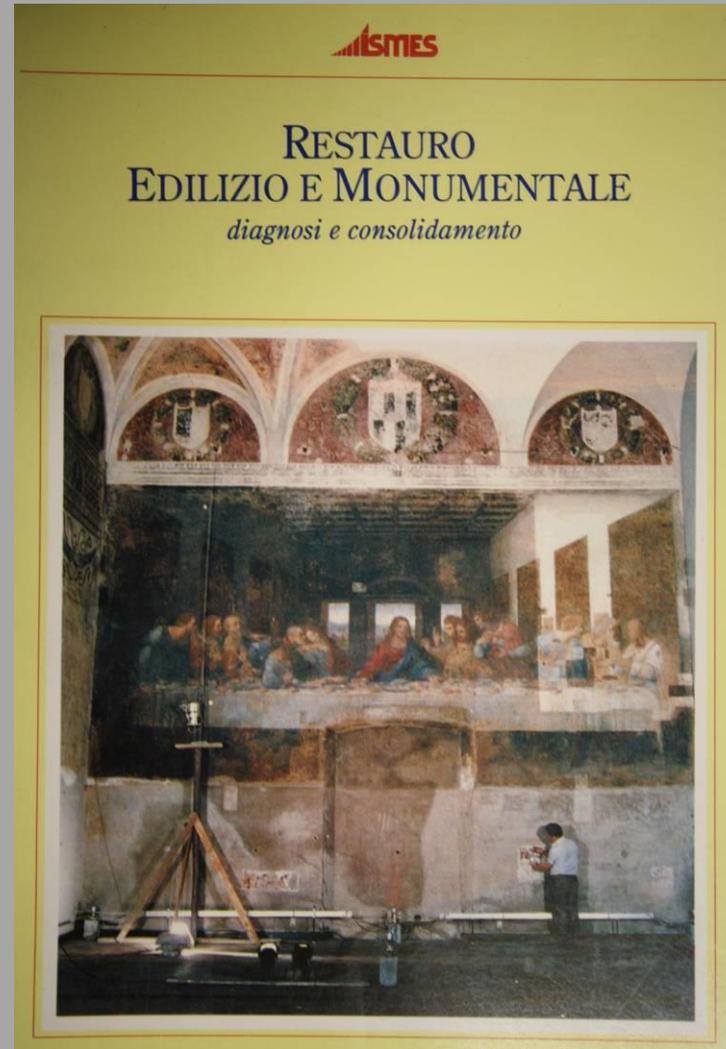
Scanning width: up to 4 m.

6-10 Ha/day at 25/50 cm
resolution



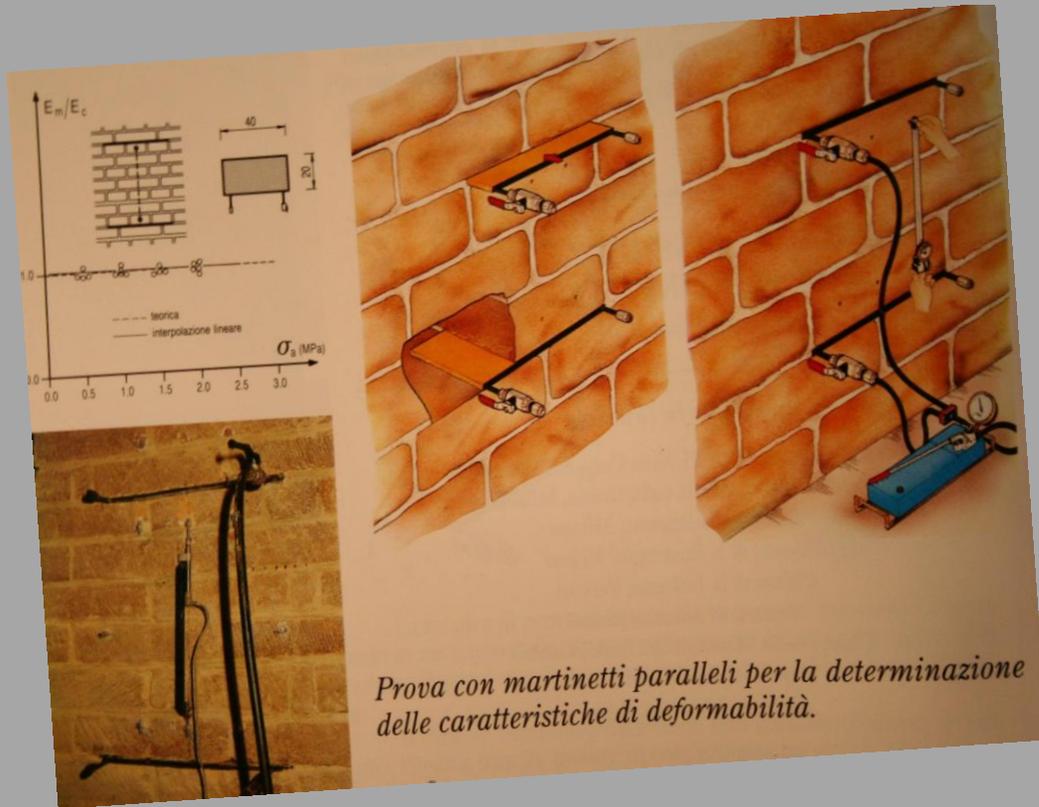
Monte San Vincenzo. Italy

Prove meccaniche sui materiali da costruzione



Publicazione ISMES, 1990

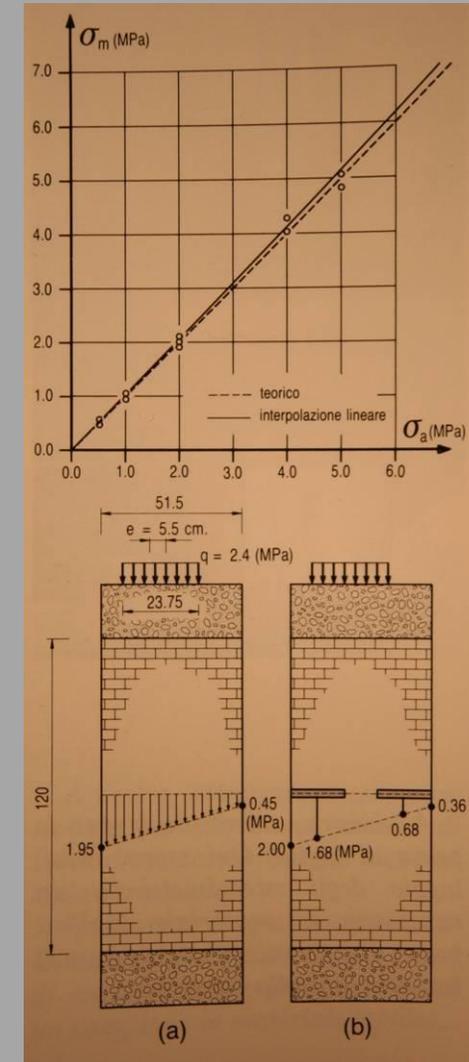
Caratterizzazione meccanica in situ



Messa a punto della tecnica diagnostica



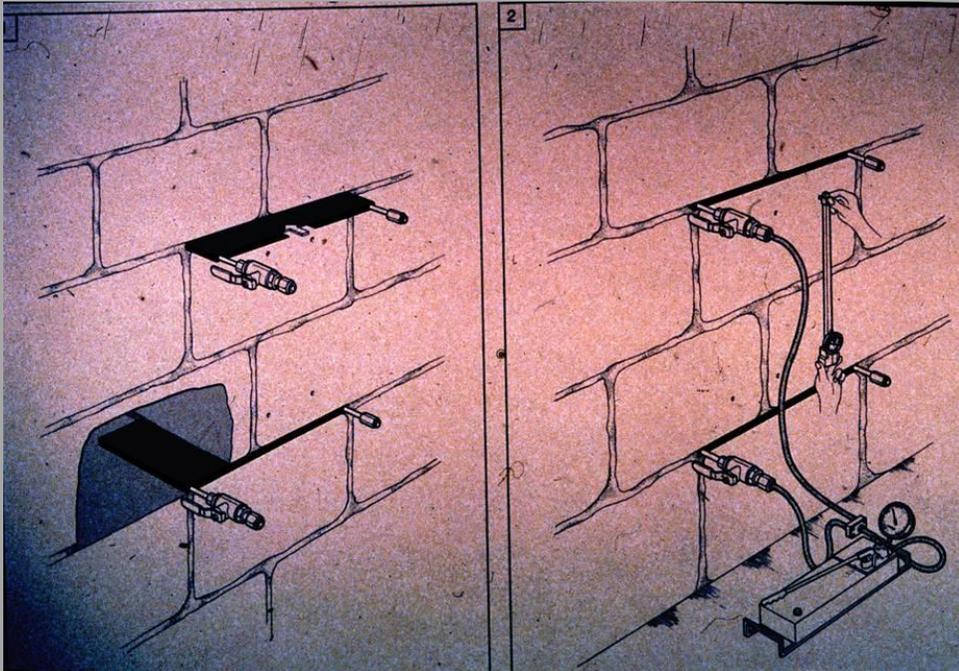
Taratura del martinetto su campione di muratura



Comparazione dei valori (ISMES)

Un esempio di indagine diagnostica per la caratterizzazione meccanica in situ

- Prove con martinetti piatti per la determinazione dello stato di sollecitazione delle strutture (ISMES , Bergamo)



Lo studio delle murature della Cappella Maggiore di S. Francesco ad Arezzo, pilastro *a cornu epistolae*

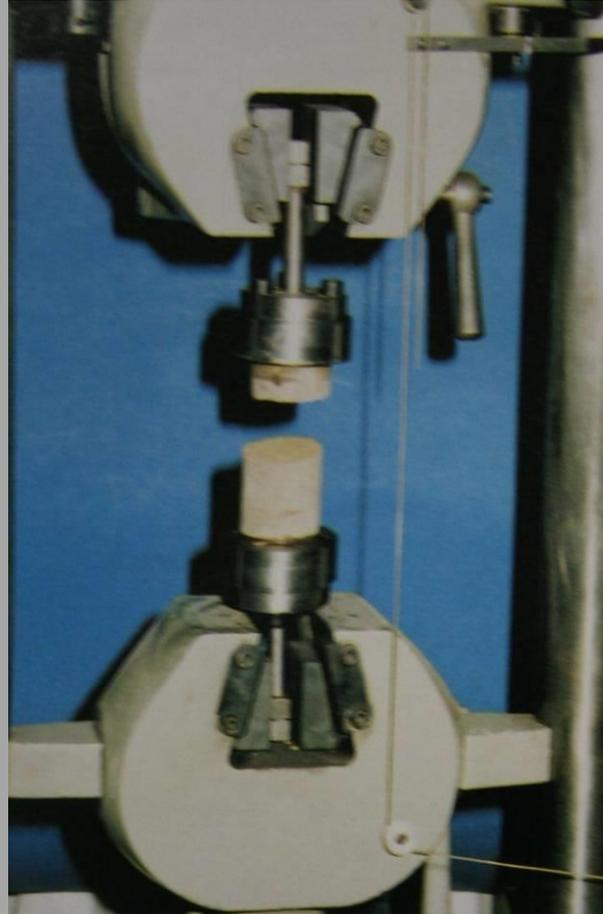
Altre applicazioni del metodo dei martinetti piatti



Caratterizzazione meccanica di murature di grandi dimensioni per la Torre di Pisa e l'Arco di Costantino di Roma;
A destra, determinazione della deformabilità in murature in pietra (sopra) e in mattoni (sotto). (ISMES, Bergamo)

Prof. G. A. Centauro
Laboratorio di restauro

Carotaggi e prelievi di campioni di muratura



Carotatrice, prove di compressione monoassiale e determinazione della resistenza

Utilizzo delle forature di carotaggio



Torre di Pisa, prova dilatometrica in foro per lo studio della deformabilità delle fondazioni
(Conc. ISMES, Bergamo)

prove di caratterizzazione dei litotipi

Caratterizzazione petrografico-mineralogica

- microscopia ottica stereoscopica
- microscopia ottica in luce trasmessa
- microscopia elettronica a scansione (SEM)
- analisi diffrattometrica ai raggi X (XR)
- analisi spettrofotometrica ai raggi infrarossi (IR)



Caratterizzazione chimico-fisica

- massa volumica apparente
- massa volumica reale
- porosità accessibile all'acqua
- assorbimento d'acqua per capillarità per immersione a bassa pressione (metodo della pipetta)
- coefficiente di saturazione
- velocità di evaporazione dell'acqua assorbita
- permeabilità al vapor d'acqua
- alterazione cromatica
- controllo dell'azione idrofobizzante dei prodotti
- dosaggio dei sali solubili

Cicli di alterazione accelerata

- gelo e sgelò
- secco-umido

attacco con anidride solforosa

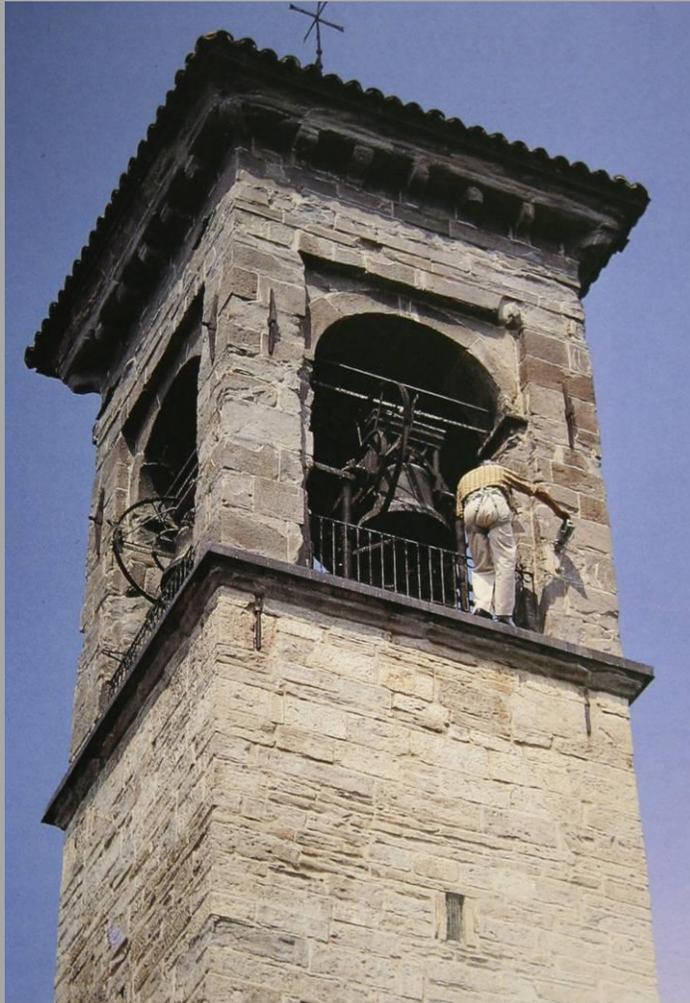
crystallizzazione di sali

esposizione a radiazioni U.V.

Caratterizzazione meccanica

- durezza superficiale
- modulo elastico
- resistenza a compressione monoassiale
- resistenza a trazione
- velocità di propagazione delle onde longitudinali

Verifiche strutturali, o monitoraggi di controllo

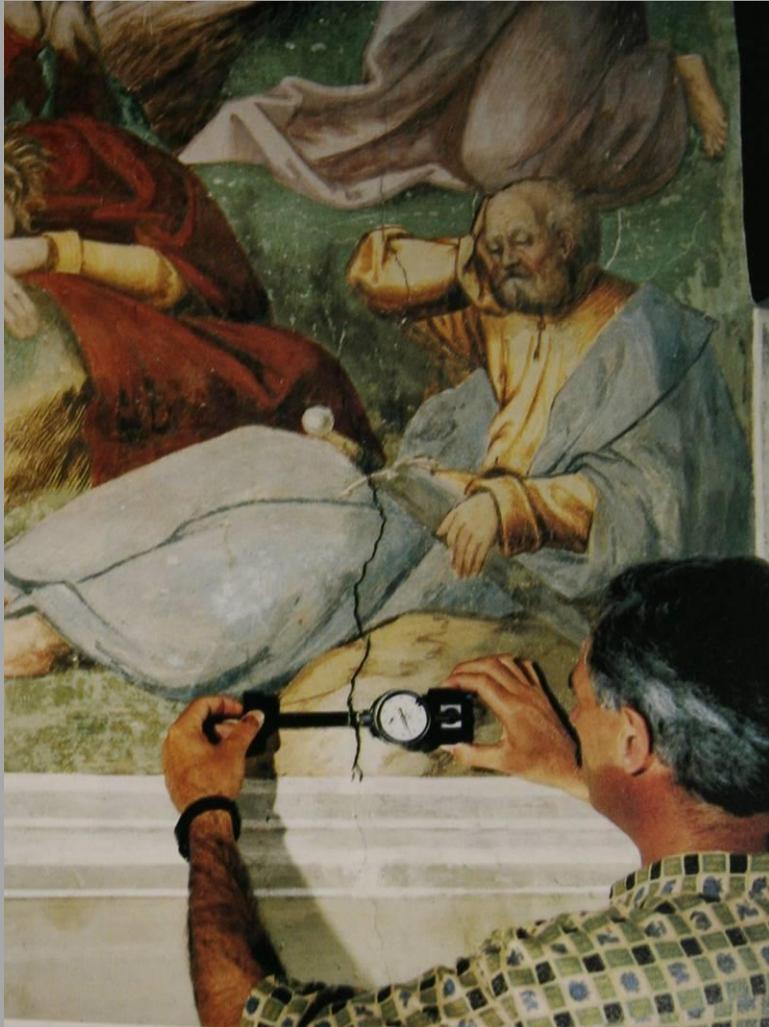


Installazione di clinometro (ISMES)



Controllo mediante estensimetro meccanico rimovibile
(Cappadocia, Chiesa di El-Nazar, Goreme)

Controllo delle variazioni di apertura di lesioni



Estensimetro meccanico rimovibile (ISMES)

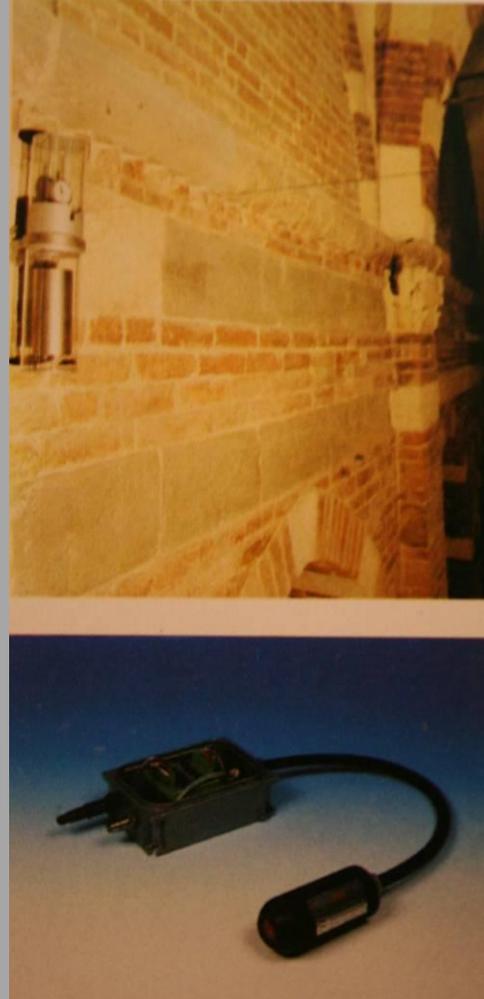


Fessurometro con trasduttore elettrico

Controllo nel tempo del comportamento statico



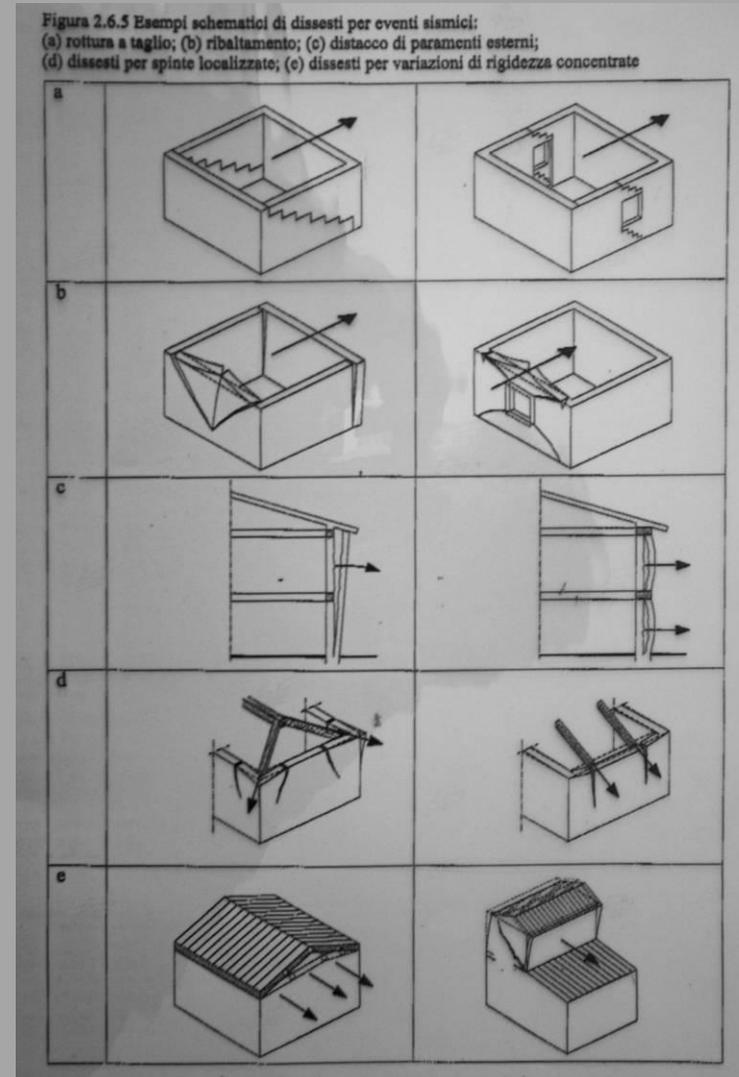
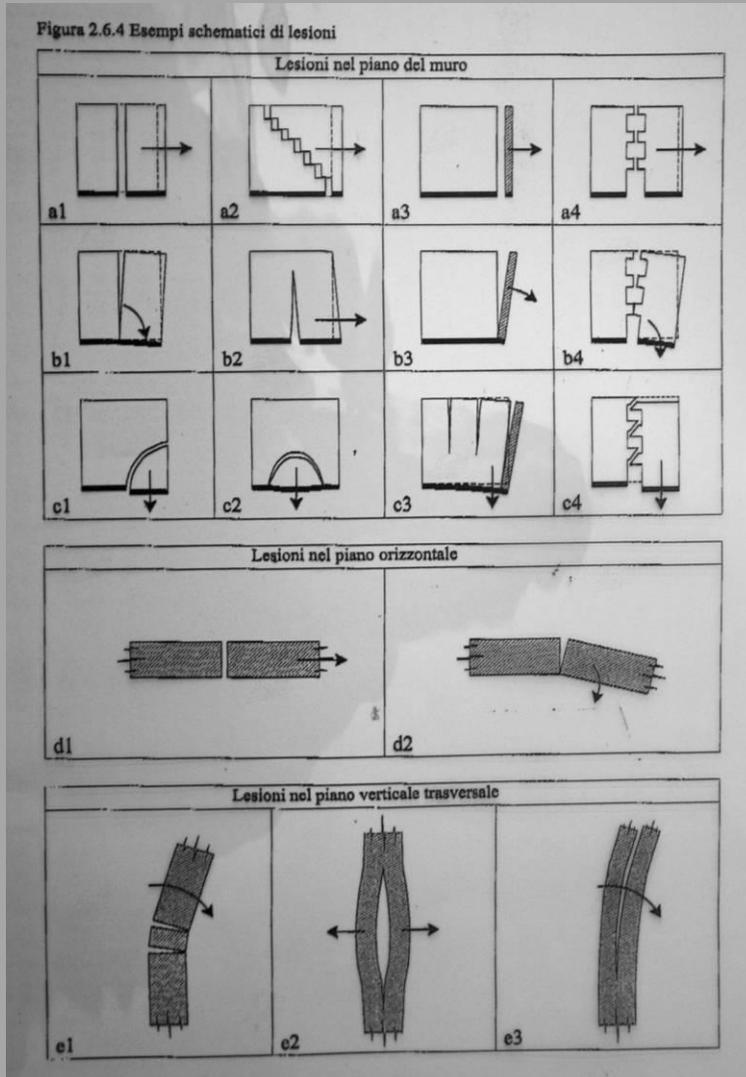
Misure dello spostamento relativo di due pareti



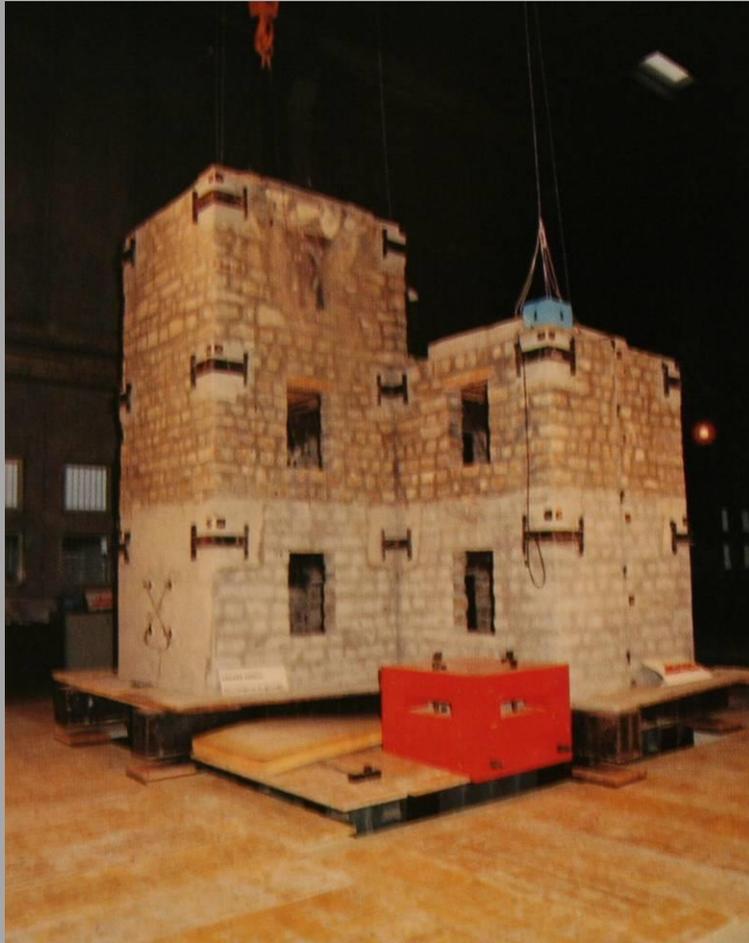
Monitoraggio strutturale

In alto, estensimetro telecoordinato a base lunga.
In basso; piezometro elettrico a controllo zero ovvero direttamente accessibile in situ (ISMES)

Lo studio delle lesioni e dei dissesti



Sollecitazioni dinamiche e prove geotecniche di laboratorio



Modello in scala 1:2 sottoposto ad eccitazione forzata per lo studio dell'adeguamento sismico

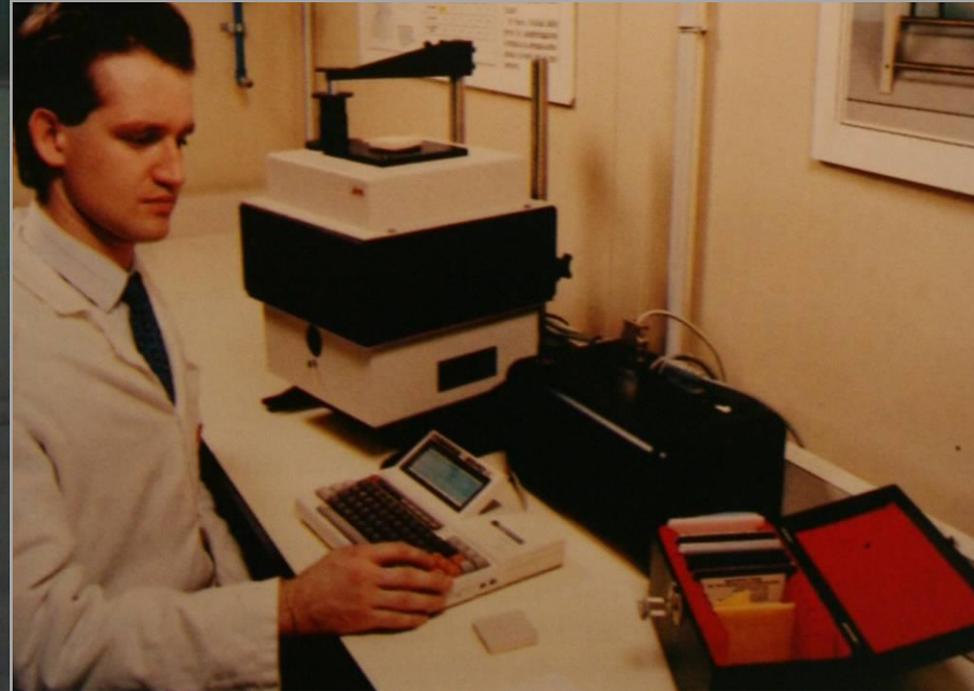


Attrezzature per prova triassiale ciclica e prova su colonna risonante (ISMES)

Prove di laboratorio e misure remote



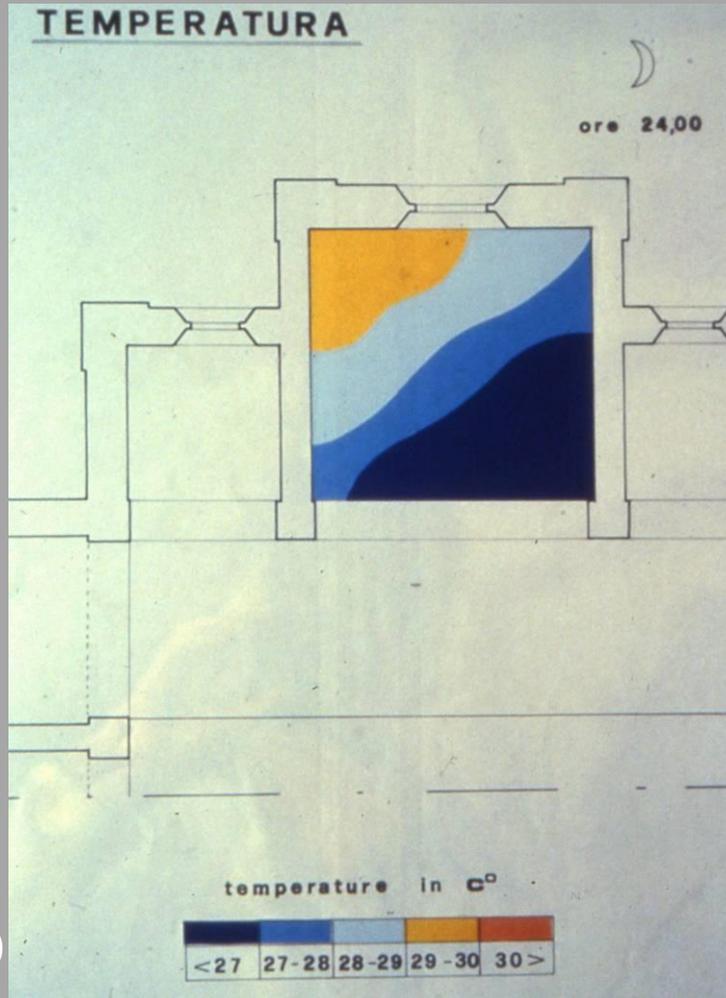
Camera automatica per l'esecuzione di cicli di invecchiamento accelerato (temperatura, umidità, agenti inquinanti, salificazioni) (ISMES)



Colorimetro computerizzato per l'analisi quantitativa delle variazioni cromatiche indotte dagli interventi di consolidamento e protezione, mediante analisi della luce riflessa dal materiale, illuminato da sorgente luminosa, standard.

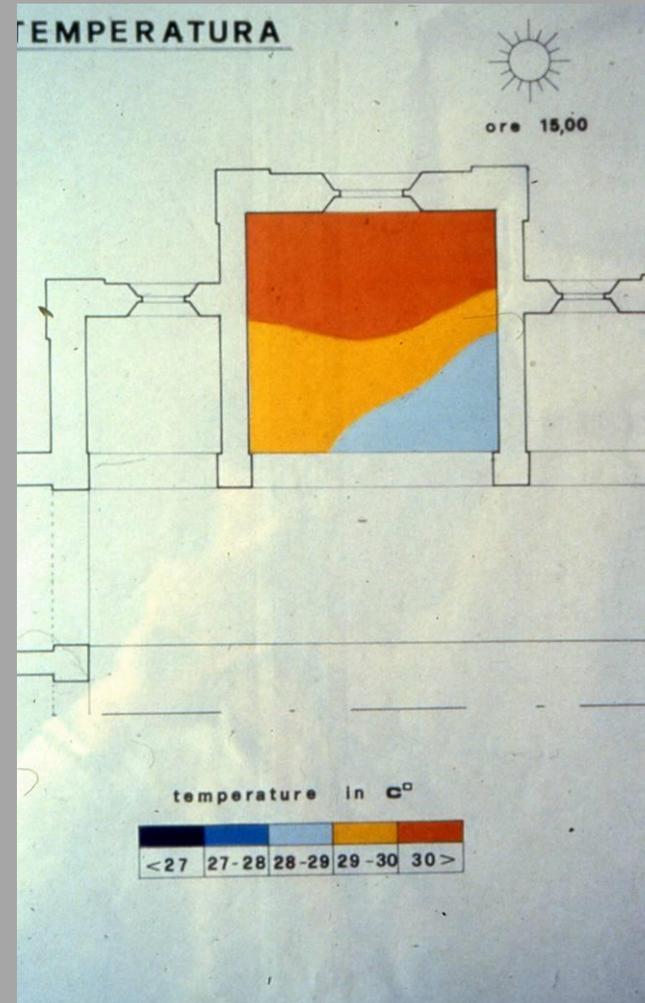
Monitoraggio ambientale termoisigrometrico

Ore 6,00



Ore 24,00

Ore 15,00

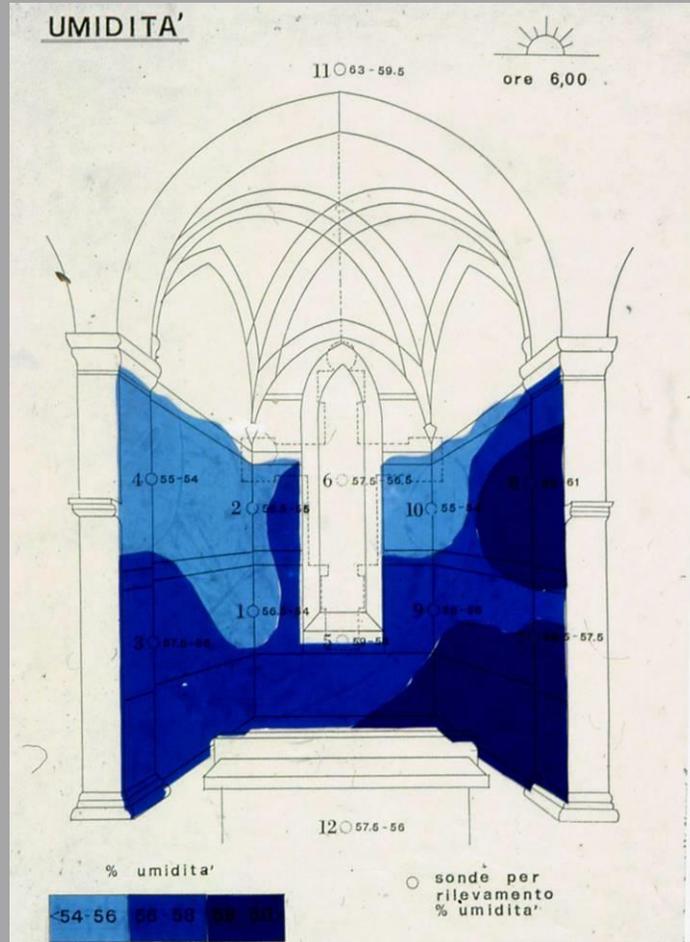


Arezzo, S. Francesco, Cappella Maggiore, misure discontinue di temperatura, con distribuzione in pianta dei valori (Conc. Centro Conservazione e Restauro, Arezzo)

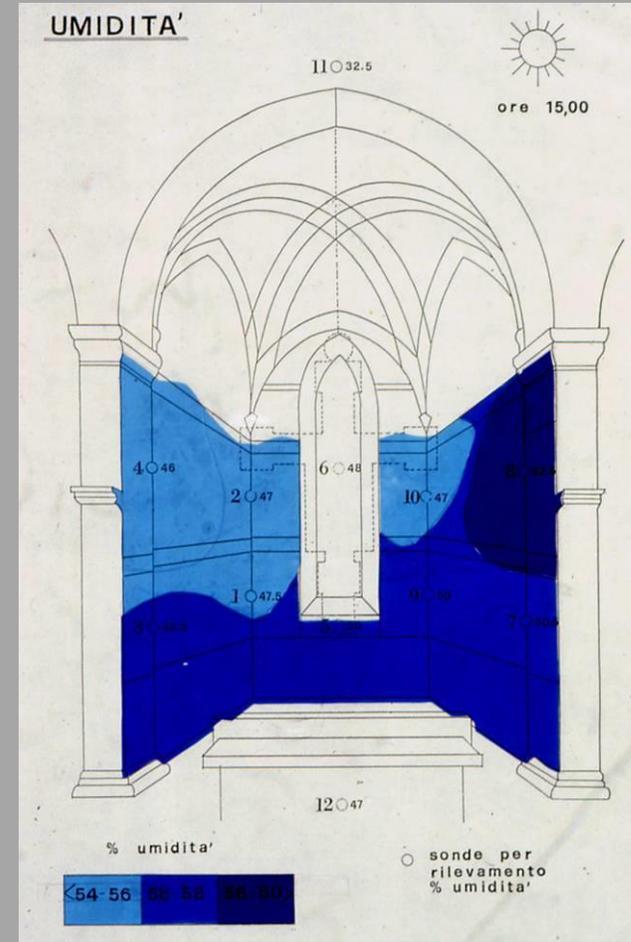
Prof. G. A. Centauro
Laboratorio di restauro

Monitoraggio ambientale termoisigrometrico

Ore 6,00



Ore 15,00



Arezzo, S. Francesco, Cappella Maggiore, misure discontinue di umidità, con distribuzione parietale dei valori (Conc. Centro Conservazione e Restauro, Arezzo)

Prof. G. A. Centauro
Laboratorio di restauro