

Monitoraggio termografico su rivestimenti murari della Basilica San Francesco di Paola, in Napoli

¹Arch. Annalisa De Lorenzo - ²Ing. Massimo Prencipe

1 - Libera professionista. Docente esperto nella Diagnostica specialistica
Consulente della Soprintendenza BB.AA.PP.SS.AA.DD di Napoli

Consulente come esperto estimatore per conto del Tribunale di Napoli - e-mail: annalisadelorenzo@libero.it

2 - Amministratore e Direttore Tecnico NDI TEC Srl

Terzo livello TT secondo UNI EN ISO 9712 - Terzo livello UT-MT-PT-ET-VT secondo UNI EN ISO 9712

Terzo livello PT-MT secondo EN 4179/NAS410 - e-mail: info@nditec.it



Figura A - Basilica San Francesco di Paola

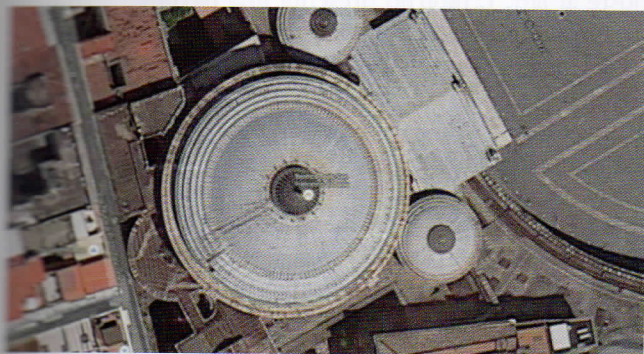


Figura B - Basilica vista dall'alto



Figura C - Ingresso principale e cantiere

Introduzione

Le attività termografiche ad infrarossi rappresentano un valido e consolidato strumento di diagnostica non distruttiva per il rilevamento di numerose anomalie costruttive. Questo metodo rappresenta un valido supporto alla realizzazione di un quadro di conoscenze preliminari per la validazione di conformità di numerose tipologie di manufatti. La metodologia è impiegabile, come è noto, in tutti quei casi in cui la temperatura superficiale (o le differenze di temperatura) possono rappresentare un indice di anomalia del manufatto.

La termografia ad infrarossi nel corso degli anni, anche grazie all'evoluzione tecnologica dei sensori adottati, ha preso ampio spazio nella diagnostica superficiale sia di manufatti in ambito industriale (impianti termici, elettrici ecc.) che in abito delle costruzioni civili e del Recupero Architettonico. Nell'ambito edile, in particolare, rappresenta un valido strumento per le indagini preventive e preliminari al recupero. Specificamente la termografia ad infrarossi è impiegata per diverse tipologie di problematiche quali:

- Ricerca cause di infiltrazioni di umidità all'interno della muratura
- Monitoraggio ed analisi della tipologia di umidità all'interno di edifici
- Analisi dello stato di conservazione ed aderenza dei rivestimenti murari (intonaci, clinker) su muratura
- Controllo della presenza di strutture metalliche e tubazioni all'interno della muratura
- Ricerca di eventuali aperture tamponate, della morfologia di muratura, tessitura di solai
- Controllo dell'aderenza di placcaggi in fibre di composito impiegati per il consolidamento di strutture edili
- Controllo dello stato di conservazione di guaine bituminose per ricopertura solai esterni di edifici
- Ricerca di linee elettriche e linee sanitarie all'interno di muratura

Questa metodologia, grazie anche alla notevole miniaturizzazione e portatilità della strumentazione disponibile sul mercato, riesce, se bene impiegata, a dare risultati notevoli in termini di precisione, rapidità ed affidabilità per dare informazioni sui quesiti diagnostici a cui il tecnico è chiamato a rispondere. Gli interventi risultano generalmente rapidi, con costi limitati rispetto ad eventuali operazioni esplorative di tipo distruttivo e con risultanze facilmente impiegabili dalla committenza per le successive fasi di recupero.

Elemento essenziale, affinché tale metodologia sia efficace è che l'intervento sia effettuato esclusivamente da personale certificato (sul territorio nazionale) almeno 2° livello secondo UNI EN ISO 9712 e con comprovata esperienza per i singoli casi richiesti.

Il metodo si basa sulla emissione naturale di radiazione infrarossa del componente da ispezionare. L'energia emessa dal corpo sotto forma di radiazione elettromagnetica, nella parte di frequenza della banda dell'infrarosso, viene captata dalla termocamera, e trasformata, mediante apposita elaborazione, in immagine termica i cui diversi livelli cromatici sono correlati ai livelli di temperatura della superficie [1]¹.

Eventuali anomalie superficiali possono essere evidenziate in funzione della differenza termica rispetto al livello energetico delle aree circostanti e assoggettate al medesimo livello di energia.

L'energizzazione delle superfici da ispezionare se non sufficiente in condizioni ordinarie, come nel caso di superfici interne di edifici, si rende necessaria mediante un riscaldamento superficiale che può avvenire attraverso diversi sistemi come set di lampade ad infrarossi, o mediante insufflaggio di aria calda.

La metodica impiegata nel caso oggetto di questa presentazione, oltre che individuare la presenza di aree non conformi, consente di quantificarne le superfici come valore percentuale rispetto alle aree complessive ispezionate.

Il vantaggio di tale metodica risiede, grazie alla quantificazione delle aree di distacco, nel poter gestire la migliore scelta d'intervento, che potrà essere localizzato per bassi valori percentuali di anomalie o radicale nel caso di elevate entità di aree di distacco.

1. Metodologia d'indagine

Termografia ad Infrarossi

2. Argomento

Applicazione del rilievo termografico per monitorare lo stato di adesione dei rivestimenti murari di una volta in tufo giallo napoletano, costituente parte del Pronao della Basilica di San Francesco di Paola in Napoli.

3. Inquadramento storico architettonico della Basilica

La basilica di San Francesco di Paola è il più imponente monumento neoclassico italiano. Fu costruita per vole-

re di Ferdinando I di Borbone nell'emiciclo della celebre Piazza del Plebiscito, fu iniziata nel 1816 e completata intorno al 1836 su progetto dell'architetto Pietro Bianchi. La basilica è posta al centro del colonnato di ordine dorico iniziato nel 1809 da Leopoldo Laparuta per ordine di Gioacchino Murat, il quale volle dare una più consona sistemazione allo spiazzo antistante il palazzo reale; prima di lui, Giuseppe Bonaparte, col decreto del 26/9/1806, aveva deciso l'abbattimento dei monasteri di Santo Spirito e di San Luigi, ivi esistenti. I lavori ebbero inizio soltanto nel 1810 con la demolizione degli edifici preesistenti e la costruzione delle fondazioni per poi essere interrotti a causa del ritorno dei Borboni[3]².

Fu incaricato Pietro Bianchi, un architetto luganese di 33 anni formatosi tra Milano e Roma, il quale iniziò la direzione dei lavori di costruzione della basilica di San Francesco di Paola per opera dell'appaltatore Domenico Barbaia secondo un progetto che si ispirava, sebbene senza una particolare originalità, alle grandi opere romane del Pantheon e del colonnato berniniano di San Pietro. È indiscutibile l'armonia compositiva che l'architetto luganese seppe improntare ed è altresì degna di nota la notevole precisione esecutiva e l'impiego di ottimi materiali e di una valida tecnica costruttiva[4]³.

Riguardo alla composizione architettonica, la facciata è preceduta da un severo pronao su sei colonne e due pilastri ionici sormontato da timpano triangolare con tre statue ai vertici, la Religione (al vertice), S. Ferdinando di Castiglia (a destra) e S. Francesco di Paola (a sinistra); la cupola centrale, che ha l'altezza di 53 mt, copre l'ampia *Rotonda* e due cupole di grandezze inferiori sono poste ai lati. L'interno presenta una pavimentazione in marmi policromi a disegni geometrici ed un colonnato circolare costituito da 34 colonne di ordine corinzio che sorreggono la grande cupola a lacunari. Al di sopra del colonnato si trova la tribuna destinata alla corte reale[5]. All'interno è possibile ammirare tele di Luca Giordano, Pietro Benvenuti, Tommaso De Vivo, statue raffiguranti Santi e, di particolare rilievo, l'altare maggiore proveniente dalla Chiesa dei SS. Apostoli, disegnato nel 1750 da Ferdinando Fuga e realizzato in porfido e decorato con lapislazzuli e pietre d'agata. Un magnifico ipogeo, infine, si nasconde al di sotto della basilica neoclassica e può considerarsi un vero capolavoro ingegneristico per l'epoca in cui è stato realizzato: lo spazio riproduce, sotterraneamente, le stesse dimensioni della chiesa sovrastante con forme ribassate[5]⁴.

Dal luglio del 2011 lavori di restauro dell'edificio religioso, a cura del Provveditorato alle Opere Pubbliche per opera dell'appaltatore Paolo Sibilio, interessano anche le strutture sotterranee finora interdette al pubblico. Il pro-

¹ ASNT: Non destructive Handbook "Infrared and Thermal testing" – Third edition – Vol. 3

² C. De Seta, Rendita e trasformazioni urbane a Napoli nell'ottocento. I catasti urbani dal 1806 al 1865, in "Storia urbana", 2 (1977).

³ R. Di Stefano, Storia architettura e urbanistica, in AA. VV., *Storia di Napoli*, vol. IX, Napoli, ESI, 1972

⁴ A. Venditti, *Architettura neoclassica a Napoli*, ESI, 1961

gato di restauro prevede, tra l'altro, il rispetto del tufo leggero utilizzato per la costruzione e dei resti delle precedenti chiese abbattute per erigere la Basilica; i lavori di recupero del grande porticato esterno mediante interventi di pulitura e sbiancatura e l'uso di appropriati prodotti chimici sono volti a preservare le strutture dalle azioni di vandalici che hanno imbrattato ripetutamente le pareti e le colonne del porticato.

Il sistema composto dall'ardita struttura centrale e dagli altri spazi e cupole sotterranee minori (tra queste la *volta degli echi* così denominata per un singolare gioco di rimbalzi sonori) potranno rendere l'ipogeo, una volta consegnato alla collettività al termine degli interventi di restauro, un luogo estremamente suggestivo da destinare a mostre ed eventi culturali che contribuiscano a rivitalizzare piazza del Plebiscito[5].

4. Caso di studio

Nel caso oggetto di questo articolo, nel quadro delle attività di riqualificazione dell'area antistante Palazzo Reale a Napoli, e specificamente del prospetto principale della Basilica di San Francesco di Paola, si è reso necessario verificare lo stato di conservazione dei rivestimenti murari delle volte interne del Pronao del suddetto complesso ecclesiastico.

Ad una prima indagine visiva effettuata dai responsabili tecnici dell'appaltatore alle opere di recupero Paolo Sibillo, si era evidenziata, alla semplice percussione sonica sulle superfici interne delle volte, l'ipotesi che vi fosse una ridotta adesione del supporto in gesso e malta alla struttura in tufo sottostante.

Tenendo conto della vetustà delle superfici, ed accertando anche la presenza di lesioni superficiali, in accordo con la Committenza, si è deciso di sottoporre l'intera superficie di una delle tre volte costituenti il Pronao, a monitoraggio termografico.

L'attività di diagnostica si poneva due obiettivi principali:

- 1) Accertare l'effettiva criticità dell'adesione del rivestimento al supporto
- 2) Valutare l'estensione dell'anomalia, localizzando i punti di maggiore criticità.

4.1 Strumentazione impiegata

I rilievi termografici sono stati effettuati impiegando un sistema videotermografico portatile associato ad un sistema riscaldante, necessario ad energizzare le superfici da ispezionare.

NEC Avio G100

Tipo di sensore : microbolometrico con matrice ad alta risoluzione 320x240 pixel

Risoluzione termica: $\leq 0,08^{\circ}\text{C}$ a 30°C

Registrazione immagini: mediante flash card

Software di elaborazione immagini: IRT Analyzer

Accessori : sistemi riscaldante portatili e fissi con termoconvezione di aria calda

4.2 Tipologia delle superfici ispezionate

Le superfici ispezionate sono costituite da due tipologie di struttura:

Tipo "A": parte interna dei riquadri, costituita da intonaco a base di calce. La struttura è applicata direttamente al supporto ed aderisce per effetto dei leganti di cui è in parte costituita (Fig. D)

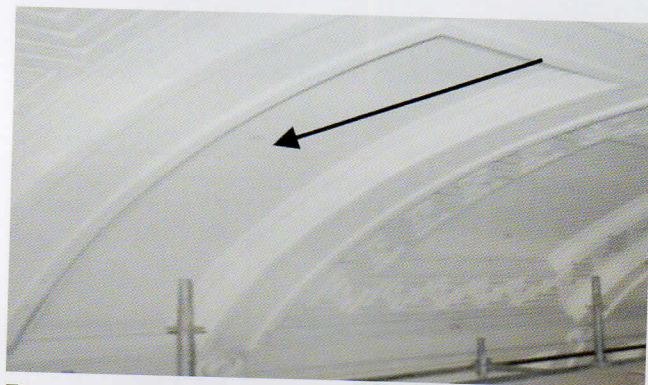


Figura D - Tipologia di rivestimento "A"



Figura E - Tipologia di rivestimento "B"

Tipo "B": bordatura dei riquadri, costituita da strutture a rilievo in gesso e pomice. Queste sono fissate alla parete mediante applicazioni parziali di malta e aggraffature metalliche (Fig. E)

Per quanto concerne le superfici piane, per le quali l'adesione al supporto murario era, originariamente, completa, il controllo termografico ha potuto garantire un ottimo risultato di valutazione.

Per esse, la presenza di condizioni "non conformi", cioè di distacco, vengono rappresentate da aree con temperatura superiore a quella delle condizioni standard di "buona aderenza".

Per quanto, invece riguarda le superfici a rilievo, a causa della loro morfologia e del tipo di ancoraggio di origine, la possibilità di avere un riscontro efficace dal solo controllo termografico non ha dato risultati efficaci.

Quindi per tali strutture si è provveduto ad aggiungere alle informazioni dei rilievi termici, l'esito delle verifiche visive (per la presenza di stati fessurativi e di eventuale umidità) e dell'auscultazione mediante tap-testing.

4.3 Aree ispezionate

Le aree da ispezionare sono rappresentate dai rivestimenti di una delle tre volte interne del Pronao.

Queste sono, quindi, state suddivise in n. 25 singoli settori (Fig. G), e sottoposte, prima delle attività termografiche, ad indagine visiva per individuazione di eventuali stati fessurativi, deformazioni, presenza di umidità.

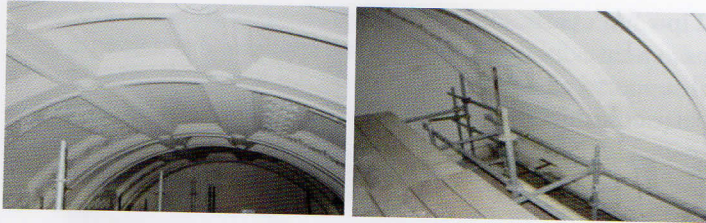


Figura F - Superfici della volta

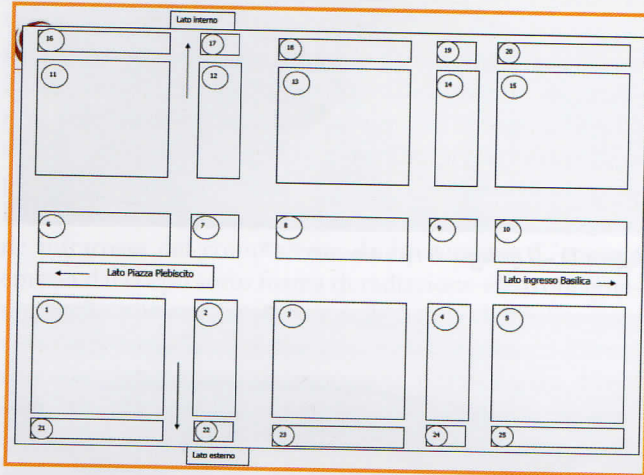


Figura G - Suddivisione delle superfici della volta

4.4 Attività sperimentali

Per raggiungere l'obiettivo della soluzione al quesito diagnostico posto dalla Committenza, si è applicata un'apposita Procedura tecnica le cui azioni principali sono le seguenti:

- Individuazione delle superfici di riferimento termico mediante localizzazione e marcatura.
- Definizione del range termico ideale di ispezione
- Riscaldamento termico delle singole aree da ispezionare
- Rilievo termografico e registrazione delle immagini
- Elaborazione in *back-office* dei dati mediante impiego di istogrammi e stima dimensionale delle singole aree
- Calcolo delle percentuali di distacco per singolo frame/area
- Valutazione complessiva dei dati

- Riferimenti termici:

Premessa: ogni metodo non distruttivo, essendo rappresentativo di una misura "indiretta", per poter consentire un'adeguata "taratura" della prova, ha necessità di un riferimento (segnale elettrico, immagine termica, immagine visiva, immagine radiografica, ecc.) che possa essere impiegato come "campione" di confronto per classificare ogni altro successivo rilievo ottenuto a pari condizioni di strumentazione impiegata e condizioni al contorno.

Quindi nel caso di un rilievo termografico è stato necessario individuare delle condizioni "termiche" di riferimento a cui poter associare degli stati superficiali noti.

Nel caso in esame, poiché si ricercava la eventuale presenza di mancata o parziale adesione del rivestimento in malta al supporto murario, è stato necessario individuare delle aree del supporto dove la condizione standard di "buona adesione" fosse accertabile in maniera oggettiva e senza l'ausilio del sistema termografico.

Attraverso l'esame visivo e *tap-testing* localizzato, è stata quindi individuata e classificata un'apposita area (Fig.H). Tale superficie è stata ricostruita *ex-novo* al fine di assicurarsi la condizione oggettiva di buona adesione. Pertanto, mantenendo le medesime condizioni di riscaldamento e di ripresa, le temperature superficiali rilevate, sono associabili a condizioni di conformità di adesione.

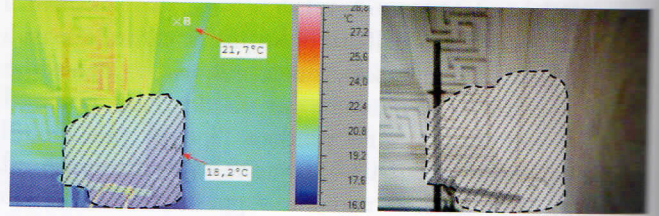


Figura H - Riferimenti termici

Tale area, classificata come "conforme" è stata quindi ispezionata al controllo termografico mediante preriscaldamento con insufflaggio di aria calda.

L'immagine termica risultante è stata quindi considerata come il "riferimento termico di conformità" e relativo a superfici delle medesime caratteristiche morfologiche[2]. Il controllo termografico sulle superfici campione, ha inoltre avuto lo scopo di fissare, a parità di ogni altra condizione di prova, il valore di temperatura superficiale minima di distacco **T_{min}**, cioè il minimo valore di T per il quale una superficie ispezionata fosse da considerare "non conforme" (Fig. I).

Nel caso delle superfici della volta, dalla parte superiore fino ad altezza dell'impalcato, la temperatura minima di distacco è stata stimata (tenendo conto del valore di quella ambientale) al valore superiore a 21°C.



Figura I - Stima della T_{min}

Per le superfici posizionate al di sotto del livello dell'impalcato, essendo sottoposte ad una T_a inferiore, il valore della **T_{min}** è stato stimato a circa 15,5°C.

- In base allo studio dell'immagine termica campione, si è determinato il livello termico associabile (nelle medesime condizioni ambientali e di riscaldamento) alla condizione di "conformità".

- Dopo aver impostato la strumentazione con i parametri associati, si è proceduto al riscaldamento ambientale mediante diversi sistemi riscaldanti fissi lungo l'intero impalcato, e un sistema di riscaldamento portatile impiegato per il controllo delle singole superfici. L'impostazione della fase

⁵ P.Desiderio/M. Prencipe "FRP Plating Inspection on static consolidation of buildings by Infrared Video Thermography and Low frequency (microseismic) ultrasound" Roma 2000 - 15th WCNT

Non-scaldato è risultata particolarmente importante per la necessità di garantire una sollecitazione termica uniforme alle superfici ispezionate. Al fine di assicurare un valore termico uniforme del volume di spazio sottostante la volta per una distanza media di circa 2 metri, si è provveduto ad eliminare eventuali fughe di calore, con apposita coibentazione delle pareti laterali della volta. Con tale sistema, l'intera superficie presentava un livello termico di base costante ed uniforme. Sono quindi sollecitate termicamente le singole aree che dovevano essere ispezionate.

Le valutazioni delle immagini termiche sono state effettuate suddividendo i frames, per famiglie di aree, con movimenti termiche al contorno affini.

Elaborazione delle immagini

Le singole immagini sono state elaborate mediante l'impiego di istogrammi delle aree d'interesse, con cursori termici posizionati tra T_{min} e la massima temperatura riscontrata nel range impiegato.

Realizzando, ad esempio, la superficie campione nella sezione complessiva piana, e predisponendo il corrispondente istogramma si ha una densità di temperatura associata a distacchi pari a circa il 56,62%. Infine attraverso una stima dimensionale dell'area, in cmq, è possibile avere un valore numerico dell'area da recuperare (Fig. J). Considerando che la stima dell'area circoscritta è di circa 1571 cmq, quella relativa a non conformità sarà pari al 56,62% di tale valore = 892 cmq

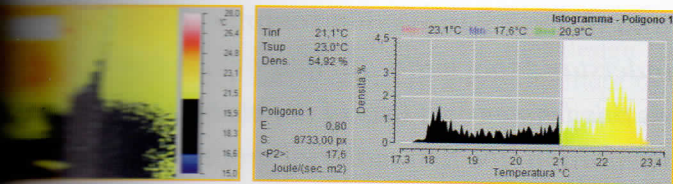


Figura J - Stima della superficie complessiva di distacco

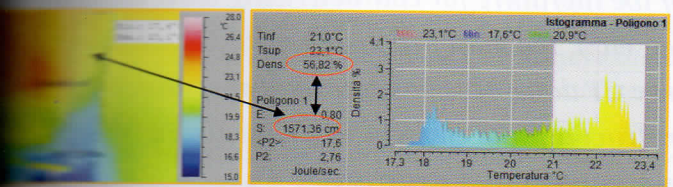


Figura K - Isotherma relativa ad area integra

Tale metodologia, stimando inoltre le dimensioni effettive delle aree ispezionate, ha consentito elaborando l'insieme delle immagini rilevate, di quantificare il valore complessivo delle superfici di distacco rispetto all'entità delle superfici ispezionate. Attraverso, infine, l'applicazione di una isoterma che esclude il range termico relativo alle condizioni di buona aderenza (area di colore nero), è possibile delimitare l'area non conforme (Fig. K) e quindi localizzarla anche ai fini di una rintracciabilità per le attività di recupero successive.

Di seguito alcune immagini esemplificative di difetti tipici riscontrati.

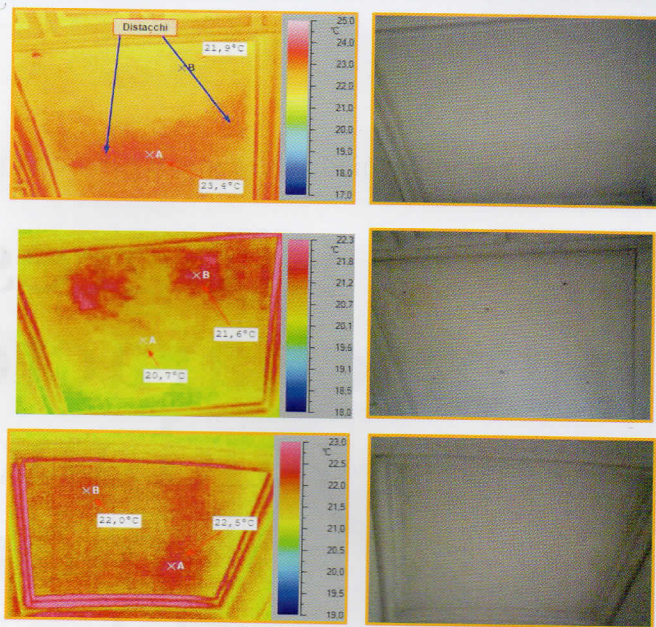


Figura L - Esempi di distacchi

Al termine dell'intervento, ed in base alle risultanze ottenute, si è proceduto ad effettuare, per le aree soggette a distacco, opportuni interventi di consolidamento mediante sistemi di iniezione di sigillante chimico e con applicazione di tasselli di sostegno direttamente sulle superfici.

Conclusioni e prospettive future

Il controllo termografico ha consentito, con tempi di rilievo estremamente rapidi (controllo di 200 mq in complessivi tre gg.) di poter programmare in tempo immediato le operazioni di consolidamento, consentendo all'appaltatore dei lavori:

- Tempi di avvio dei lavori rapidi
- Localizzazione delle aree semplice ed efficace
- Nessun costo aggiuntivo per saggi distruttivi,
- Nessun costo per attività preliminari,
- Nessun costo per manovalanza di assistenza.

Il metodo consente notevoli potenzialità operative legate ai tempi rapidi di risposta, alla precisa localizzazione delle anomalie, ed ad una buona quantificazione complessiva delle superfici da recuperare, senza alcuna necessità di saggi distruttivo.

Ringraziamenti

Si ringrazia la preziosa collaborazione della società **Paolo Sibilio** che ha fornito un importante supporto per la raccolta dei dati tecnici dei materiali, preliminare all'intervento.

Bibliografia

- [1] ASNT: Non destructive Handbook "Infrared and Thermal testing" - Third edition - Vol. 3
- [2] P.Desiderio/M. Prencipe "FRP Plating Inspection on static consolidation of buildings by Infrared Video Thermography and Low frequency (microseismic) ultrasound" Roma 2000 - 15th WCNDT.
- [3] C. De Seta, Rendita e trasformazioni urbane a Napoli nell'ottocento. I catasti urbani dal 1806 al 1865, in "Storia urbana", 2 (1977).
- [4] R. Di Stefano, Storia architettura e urbanistica, in AA. VV., Storia di Napoli, vol. IX, Napoli, ESI, 1972
- [5] A. Venditti, Architettura neoclassica a Napoli, ESI, 1961.