

Treball final de grau

Estudi: Grau en Arquitectura Tècnica

**Títol: LA TERMOGRAFIA APLICADA EN L'ESTUDI DEL
PATRIMONI ARQUITECTÒNIC**

Document: MÈMORIA TREBALL FINAL DE GRAU

Alumne: IDÒIA TORRENT I RAMIÓ

Tutor: MIQUEL ÀNGEL CHAMORRO TRENADO

Departament: Arquitectura i Enginyeria de La Construcció

Àrea: Construccions Arquitectòniques

Convocatòria (mes/any): JUNY 2015

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	5
2. OBJECTIUS.....	6
3. CONCEPTE DE TERMOGRAFIA INFRAROJA.....	8
4. HISTÒRIA DE LA TERMOGRAFIA.....	10
5. MARC NORMATIU NACIONAL I INTERNACIONAL.....	14
6. PRINCIPIS FÍSICS DE LA TERMOGRAFIA	24
6.1 CALOR I TEMPERATURA.....	24
6.2 TRANSMISIÓ, EMISSIÓ I REFLEXIÓ	25
6.2.1 TRANSMISIÓ DE LA CALOR.....	25
6.2.2 EMISSIÓ.....	29
6.2.3 REFLEXIÓ.....	34
6.2.4 LLEI DE KIRCHHOFF'S	35
6.3 EL COS NEGRE.....	38
6.4 INTERCANVI D'ENERGIA PER RADIACIÓ	38
6.4.1 RADIACIÓ TERMICA	38
6.4.2 RADIACIÓ INFRAROJA	40
7. APLICACIONS DE LA TERMOGRAFIA.....	43
8. TIPUS DE TERMOGRAFIA	47
8.1 TERMOGRAFIA PASSIVA (P).....	47
8.2 TERMOGRAFIA ACTIVA (A).....	48
8.2.1 TERMOGRAFIA ACTIVA POLSOS (<i>PULSED THERMOGRAPHY</i>) A-PT.....	48
8.2.2 TERMOGRAFIA PER POLSOS LLARGS (<i>STEP HEATING</i>) A-SH	48
8.2.3 TERMOGRAFIA MODULADA (<i>LOCK-IN THERMOGRAPHY</i>) A-LT	48
8.2.4 VIBROTERMOGRAFIA	49
9. LA CÀMERA TERMOGRÀFICA.....	52

10.	APLICACIONS DE LA TERMOGRAFIA INFRAROJA EN L'ESTUDI DEL PATRIMONI ARQUITECTONIC	56
10.1	CONDICIONANTS.....	57
10.2	METODOLOGIA	62
10.2.1	METODOLOGIA ESPECÍFICA EN PATRIMONI.....	65
11.	RESUM ARTICLES.....	66
11.1	A QUALITATIVE METHOD FOR COMBINING THERMAL IMPRINTS TO EMERGING WEAK POINTS OF ANCIENT WALL STRUCTURES BY PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY – A CASE STUDY	67
11.2	PATHOLOGY OF BUILDING MATERIALS IN HISTORIC BUILDINGS. RELATIONSHIP BETWEEN LABORATORY TESTING AND INFRARED THERMOGRAPHY	72
11.3	INFRARED THERMOGRAPHIC INSPECTION OF MURALS AND CHARACTERIZATION OF DEGRADATION IN HISTORIC MONUMENTS	79
11.4	NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES AS A TOOL FOR THE PROTECTION OF BUILT CULTURAL HERITAGE	84
11.5	THE COMBINED USE OF IRT AND LDV FOR THE INVESTIGATION OF HISTORICAL THIN VAULTS.	92
11.6	CHARACTERIZATION OF HISTORICAL LIME PLASTERS BY COMBINED NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE TESTS: THE CASE OF THE SGRAFFITO IN BO_ZNOW (SW POLAND)	96
11.7	MULTITEMPORAL THERMAL ANALYSIS TO DETECT MOISTURE ON A BUILDING FAÇADE	99
11.8	INFRARED THERMOGRAPHY AND GEORADAR TECHNIQUES APPLIED TO THE “SALA DELLAE NICCHIE” (NICHES HALL) OF PALAZZO PITTI, FLORENCE (ITALY)	103
11.9	SUITABILITY OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR THE EXAMINATION OF RURAL BUILDINGS: THE PARTICULAR CASE OF A SPANISH REGION	106
11.10	THERMOGRAPHY AND SPECTRORADIOMETRY APPLICATIONS IN THE STUDY OF THE DETERIORATION OF OUR NATIONAL ARCHITECTURAL HERITAGE.	114
12.	ELS EDIFICIS ESTUDIATS	119
12.1	ESGLÉSIA DE SANT PERE DE RIPOLL.....	119

12.1.1	EMPLAÇAMENT	119
12.1.2	SITUACIÓ ACTUAL.....	119
12.1.3	HISTORIA DE L'EDIFICI	120
12.2	ESGLÉSIA DE SANT JULIA DE VALLFOGONA DEL RIPOLLÈS	123
12.2.1	EMPLAÇAMENT	123
12.2.2	SITUACIÓ ACTUAL.....	123
12.2.3	HISTÒRIA DE L'EDIFICI	124
13.	LA TERMOGRAFIA APLICADA EN EL PATRIMONI	127
13.1	ELEMENTS DECORATIUS DEGRADATS	127
13.1.1	TERMOGRAFIA ACTIVA APLICADA EN L'ESTUI D'ELEMENTS DEGRADATS..	127
13.1.2	TERMORGAFIA PASSIVA APLICADA EN L'ESTUI D'ELEMETS DEGRADATS.....	135
13.2	DETECCIÓ D'ELEMENTS OCULTS. TERMOGRAFIA PASSIVA.....	137
13.3	ESTUDI DE LA DEGRADACIÓ DE LA PEDRA. TERMOGRAFIA ACTIVA.....	142
13.4	DETECCIÓ D'HUMITATS. TERMOGRAFIA PASSIVA.....	147
13.5	DETECCIÓ DE MATERIALS DE RESTAURACIÓ. TERMOGRAFIA PASSIVA	149
13.6	DETECCIÓ DE PINTURES DETERIORADES O OCULTES. TERMOGRAFIA PASSIVA I TERMOGRAFIA ACTIVA.	151
14.	FITXES INFORMES ESTUDI TERMOGRÀFIC.....	161
14.1	INFORME 1	162
14.2	INFORME 2	163
14.3	INFORME 3	165
14.4	INFORME 4	166
14.5	INFORME 5	167
14.6	INFORME 6	169
14.7	INFORME 7	171
14.8	INFORME 8	173
14.9	INFORME 9	175
14.10	INFORME 10.....	177

14.11	INFORME 11.....	178
15.	CONCLUSIONS.....	179
16.	AGRAÏMENTS	182
17.	BIBLIOGRAFIA	183
18.	ANNEXES.....	189

1. INTRODUCCIÓ

Al 1965 es va comercialitzar la primera càmera termogràfica al món, era la primera vegada que es disposava d'una càmera capaç de detectar variacions de temperatura per un ús que no fos el militar. Tot i que aquesta tecnologia inicialment no era a l'abast de tothom, va ser el fet de comercialitzar-se que va permetre descobrir noves aplicacions d'aquesta tècnica. Les càmeres termogràfiques avui en dia s'apliquen en camps tan diversos com la sanitat, la indústria, la seguretat, agricultura, medi ambient, etc. Més recentment també, s'ha començat a aplicar en el món de la construcció.

Pel que fa a aquest sector, la termografia ha adquirit una gran importància als darrers anys ja que té un gran ús en l'estudi de l'eficiència i estalvi energètic, tan en edificis de nova construcció com en edificis antics. I és que la termografia té la capacitat de transformar la radiació tèrmica emesa per un cos en una imatge visible, a partir d'aquests mapes tèrmics que genera, es poden detectar les variacions de temperatura i per tant les patologies tèrmiques que pateixen les edificacions.

Aquesta però, no és la única aplicació de la termografia en el camp de la construcció. Mitjançant els mapes tèrmics es poden detectar moltes altres característiques dels elements construïts, com per exemple, la detecció d'estructures ocultes, patologies constructives, variacions de materials, etc.

Aquest treball final de grau es centrarà doncs, en aquest darrer ús de la termografia, concretament en l'aplicació de la termografia en l'estudi del patrimoni arquitectònic. Donat que es tracta d'una tecnologia relativament recent i poc aplicada en el nostre país, abans d'iniciar l'aplicació en els edificis seleccionats, s'ha cregut convenient realitzar un estat de l'art de la termografia. Aquesta primera part pretén donar a conèixer la història de la termografia, el funcionament de les càmeres termogràfiques, la normativa que en fa referència tan nacional com internacional, i també analitzar els diferents estudis i articles que tracten aquesta aplicació.

La segona part del document constarà de l'aplicació de la termografia en el patrimoni arquitectònic. Es realitzaran assajos termogràfics en els dos edificis que s'han estudiat, l'Església de Sant Pere de Ripoll i l'Església de Sant Julià de Vallfogona, ambdós amb gran càrrega històrica i molts singulars. Un cop obtingudes les imatges termogràfiques se'n realitzarà l'anàlisi de la informació obtinguda i la comparació amb la bibliografia estudiada.

2. OBJECTIUS

La termografia, és una tecnologia que en el nostre territori encara és molt desconeguda, i més quan es tracta de l'aplicació d'aquesta en l'edificació. Aquest treball final de grau a pretès aplicar la termografia infraroja en aquest camp, però no només en l'edificació sinó que, anar una mica més enllà i aplicar-la en l'estudi del patrimoni arquitectònic.

Per tal de poder dur a terme l'aplicació de la termografia, cal conèixer el seu funcionament, els principis físics que la formen, la normativa que la regula, la seva història, etc. És per això que la primera part del document es centra en l'objectiu de realitzar un estat de l'art de la termografia infraroja. Amb aquesta part del document, es pretén assolir el màxim de coneixements teòrics de la termografia infraroja per tal d'agilitzar i fer més precisos els resultats dels assajos realitzats.

Pel que fa a la segona part del treball, l'objectiu general d'aquest és l'aplicació de la tècnica en els dos edificis històrics seleccionats. Aquesta segona part es centra en realitzar assajos termogràfics als elements històrics, i analitzar els mapes tèrmics per tal d'identificar possibles patologies, anomalies, elements ocults, etc. Els resultats obtinguts en les termografies realitzades es compararan amb els resultats dels diferents articles estudiats.

Cal esmentar que abans de realitzar els estudis termogràfics, es realitza un estudi històric de les dues esglésies on es duran a terme els assajos, d'aquesta manera es podran avaluar amb més precisió els mapes tèrmics generats. L'objectiu principal de l'aplicació d'aquesta tècnica, i el que podria definir el document, és poder aportar més informació a l'estudi dels edificis històrics mitjançant una tècnica no destructiva ni invasiva.

“L’arquitectura és el gran llibre de la humanitat”.

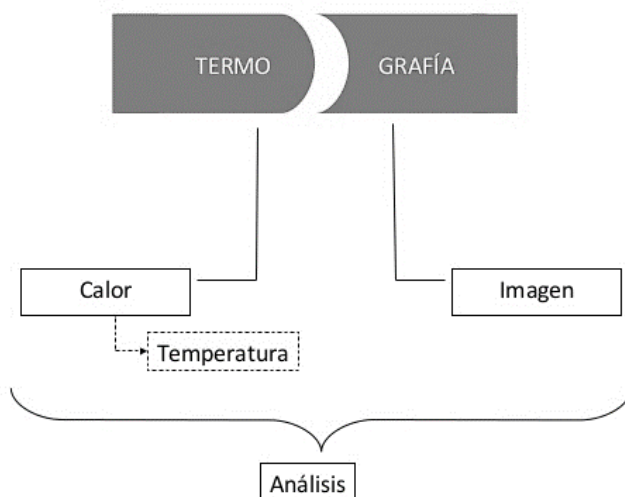
Victor Hugo, 1802-1885

3. CONCEPTE DE TERMOGRAFIA INFRAROJA

Per tal de poder entendre que és la termografia infraroja primer cal dividir el concepte en els seus dos mots. Primer de tot el concepte termografia es defineix com una tècnica per mesurar o registrar la distribució de temperatura sobre una superfície, és a dir, la termografia mesura les variacions de temperatura i en crea un mapa visual. Per altra banda, el concepte infraroja (IR) fa referència a les longituds d'ona compreses entre els 0,7 micròmetres μm fins als 1000 μm de l'espectre electromagnètic, ones no visibles per l'ull humà.

Els ulls humans estan dissenyats per detectar la llum visible però hi ha altres formes de llum que no podem detectar, només podem detectar una mínima part de l'espectre electromagnètic. No som capaços de detectar els rajos gamma, raig-X, ultraviolats, infrarojos, microones ni les ones de radio. La diferència entre aquests tipus de raig és la longitud d'ona, aquests que no podem veure és perquè tenen una longitud d'ona massa gran. Aquest fet és demostrable gracies a la llei de radiació de Max Planck (1858-1947) formulada el 1900. Com més gran és la temperatura d'un cos més quantitat d'energia emet.

Per tant doncs, la suma d'aquests dos conceptes defineix la termografia infraroja com la tècnica que es capaç de mesurar les diferents temperatures en l'espectre infraroig i crear-ne un mapa visual.



1. Esquema definició termografia.

Font: ITC *Infraraed Training Center*

Aquest sistema permet registrar la radiació que emet un material (radiacions infraroges) sense la necessitat d'estar en contacte amb la seva superfície, aquesta tècnica s'anomena teledetecció. Per poder mesurar aquestes diferències de temperatura és totalment imprescindible un equip de captació que permeti convertir les radiacions infraroges, en radiacions que puguin ser visibles en l'espectre visible humà. En aquest cas les càmeres termogràfiques són l'element que permeten captar aquest tipus d'ones infraroges i transformar-les en imatges infraroges mitjançant l'associació de les variacions tèrmiques de les temperatures als colors del rang visible.

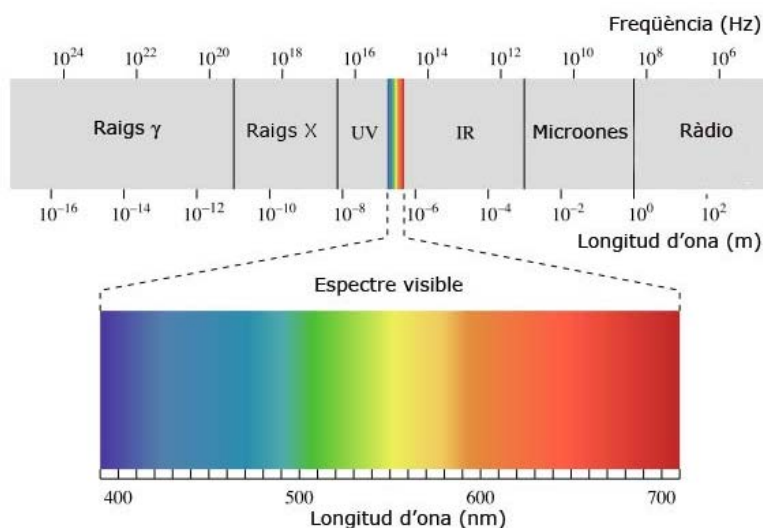
La termografia infraroja es caracteritza per ser:

- Una tècnica de mesura de temperatura i emissivitat superficial, no cal entrar en contacte directa amb el sistema sotmès a estudi (per aquest motiu es denomina com a tècnica no destructiva)
- Ser una tècnica totalment passiva, és a dir, que no requereix de font de llum externa, la qual cosa permet el seu funcionament, tant de dia com de nit i per tant poder realitzar les inspeccions termogràfiques sense alterar les condicions ambientals durant el procediment.
- Ser una tècnica ideal per l'estudi de les pèrdues d'energia. Aquesta informació s'aplica a l'estalvi i ús racional d'energia.
- També cal destacar que és un instrument que ens aporta informació en temps real, cosa que permet una gran fiabilitat per l'estudi d'observacions inesperades.
- Una de les seves aplicacions més rellevants (aplicació que ens ocupa en aquest treball), es troba en el denominat diagnòstic i manteniment preventiu: es tracta d'una aplicació creixent d'aquesta eina científica. La seva capacitat d'anàlisi in situ permet efectuar controls de processos tèrmics, això ens permet aportar informació vàlida pel diagnòstic.
- La termografia permet actuar en el patrimoni amb majors garanties ja que ens permet analitzar diferents elements.

4. HISTÒRIA DE LA TERMOGRAFIA

La termografia ha evolucionat considerablement en els últims anys tot i que la seva creació es deu als experiments del científic Frederick William Herschel nascut a Hannover, Alemanya el 1738. Qui va ser l'astrònom reial del rei George III d'Anglaterra. Va descobrir el planeta Urà (1781) i va crear potents telescopis.

Al 1800 va fer una gran descobriment gracies al seu afany per descobrir quanta calor travessava pels diferents filtres de color que utilitzava per observar la llum solar. Va observar que els diferents filtres de color deixaven passar més o menys calor en funció del seu color, així que va pensar que els diferents colors devien tenir diferents temperatures. Per poder corroborar aquest fet va fer passar llum solar a través d'un prisma de vidre (prisma de Newton) per crear un espectre i mesurar la temperatura de cada color. Va descobrir que les temperatures augmentaven progressivament des de la part del color violeta fins a la del vermell (observació que ja havia fet l'investigador Landriani el 1777). Va mesurar també la temperatura de l'espectre més enllà de la part vermella, en una regió sense llum solar visible, per tal d'obtenir una temperatura de control. Aquesta regió era la que donava una temperatura més alta, era la primera demostració empírica de que hi ha tipus de llums no visibles per l'ull humà. Un cop va fer públic el descobriment a aquesta llum la va denominar *espectre termomètric*, també s'hi referia com a *calor fosc* o simplement *rajos invisibles*.



2. Espectre electromagnètic.

Font: Revista Catalana de Geografia, juliol 2009

Posteriorment en documents impresos, aproximadament 75 anys després, es va començar a utilitzar el terme *llum ultraroja*, és a dir, llum situada més enllà del vermell. Avui coneguda com a radiació infraroja (el nom de infraroja és refereix a la freqüència d'aquesta llum. La freqüència de la llum és menor com més s'avança al llarg de la totalitat de l'espectre de la llum visible des de l'extrem violeta al vermell).

Que Herschel utilitzes cristall en els prismes del seu experiment original va provocar alguna controvèrsia inicial amb alguns dels seus contemporanis pel que fa a l'existència real de la longitud d'ona infraroja. Intentant confirmar la validesa del seu treball, alguns investigadors, van utilitzar diferents tipus de cristalls de manera totalment indiscriminada, obtenint diferents transparències en els infrarojos. Herschel, posteriorment, va observar la transparència limitada del cristall a la radiació tèrmica, va arribar a la conclusió que les diferents lents utilitzades per detectar els infrarojos havien de ser forçosament elements reflectants (miralls corbats i llisos). Al cap d'un temps al 1830 es va descobrir que aquesta conclusió no era totalment certa, l'investigador italià Melloni va fer el seu gran descobriment, la sal de roca (NaCl), material que estava disponible en cristalls naturals suficientment grans per fer lents i prismes, és considerablement transparent als infrarojos. Gracies a aquest descobriment la sal de roca es va convertir en el principal material òptic pels infrarojos, i ho va continuar essent durant els 100 anys següents, fins que es va denominar l'art de la creació del cristall sintètic durant els anys 30.

Paral·lelament als grans descobriments dels infrarojos, els grans científics del moment també investigaven com crear nous mesuradors de calor precisos. Fins al 1829, l'únic element que permetia mesurar la temperatura era el termòmetre, fou Leopoldo Nobili qui va presentar el primer Termoparell, un sensor de contacte que permetia mesurar la temperatura de la superfície d'un material o d'un element produint un efecte termoelèctric (el termòmetre de Herschel només podia mesurar fins a 0,2°C, mentre que els models posteriors permetien mesurar fins a 0,05°C). Només quatre anys més tard, al 1833, Melloni presentava la primera Termopila, un generador termoelèctric que constava de diferents termoparells en seqüència, fet que incrementava la sensibilitat de mesura fins a quaranta vegades, per detectar la radiació infraroja. Aquest nou instrument era capaç de mesurar la temperatura d'un cos humà des de 3 metres de distància.

Finalment, al 1840 el fill de William Herschel, John Herschel va aconseguir la primera imatge visible de la radiació infraroja utilitzant un evaporígraf. Amb aquest dispositiu, la imatge infraroja es forma exposant una làmina fina d'oli a un patró de calor enfocant-la, d'oli per una evaporació diferencial, s'evapora en les àrees més calentes del material. Per tant, la làmina produeix el que avui en dia es

coneix com a mapa d'isotermes d'aquesta superfície. Sir John Herschel també va aconseguir obtenir un registre primitiu de la imatge tèrmica en paper i ho va denominar *Termografia*.

Lentament es van anar millorant els aparells per tal de detectar amb més sensibilitat els rajos infrarojos. Al 1880, Samuel P. Langley va inventar el Bolòmetre. Un detector que consistia en una tira prima de platí enfosquida connectada a un dels braços d'un pont de Wheatstone sobre la qual s'enfocava la radiació infraroja i a la que responia a un galvanòmetre sensible. Aquest instrument teòricament era capaç de detectar la calor d'una vaca a una distància de 400 metres. Les primeres càmeres infraroges van utilitzar aquest sistema com a sensor tèrmic.

Al 1900 el científic Max Planck va publicar la teoria de la radiació, aquesta nova teoria clarificava el descobriment de Herschel. Les ones de màxima radiació λ_m (micròmetres) es determinen gràcies a una equació ($\lambda_m = 2898 / T$, on T és temperatura en graus Kelvin). La temperatura del sol és de 6000 K, per tant doncs, λ_m és aproximadament de 0,5 μm , aquest valor correspondria a una llum de color groc just al mig de la llum visible per l'ull humà (entre 0,4 i 0,75 μm).

Al principi del segle XX, les successives Primera Guerra mundial i la Segona Guerra Mundial, van ocasionar un progrés accelerat en la tecnologia tèrmica i infraroja. Els militars varen ser els primers interessats a desenvolupar aquesta tecnologia, atrets per la idea principal de idear un sistema de visió capaç de revelar possibles objectius en la foscor. Es varen crear un gran nombre de patents motivades per la idea de detectar persones, artilleria, avions, vaixells i inclús icebergs. Aquestes investigacions van provocar la millora dels dispositius coneguts fins al moment, van aconseguir obtenir un aparell que era capaç de detectar un avió a 1,5 km i una persona a una distància de 300 metres.

Durant les investigacions d'aquest període van descobrir que refredant els detectors tèrmics, com els bolòmetres, es podia millorar el rendiment. Va ser però en el període entre guerres quan és van fer grans avenços en el desenvolupament de nous detectors d'infrarojos totalment innovadors, els conversors d'imatges i els detectors de fotons. Al principi, el conversor d'imatges va ser el que va rebre més atenció per part dels militars, ja que era la primera vegada a la història es podia veure a un observador en la foscor. Tot i així, la sensibilitat del conversor d'imatges estava limitada a les longituds d'ona infraroja més properes i els objectius militars més interessants, per exemple els soldats enemics, havien de ser il·luminats per tal de fer infrarojos de recerca. Donat que, això implicava el risc de ser vistos i delatar la posició a l'enemic, aquests sistema es va anar deixant de banda progressivament.

Els desavantatges tàctics per als militars dels anomenats sistemes tèrmics d'imatge (actius), varen proporcionar un cert impuls després de la guerra de 1939 a 1945 a programes d'investigació militar secrets més ambiciosos, que tenien per objectiu el desenvolupament de sistemes passius, agafant de base els extremadament sensibles detectors de fotons. Durant aquest període de temps, les normatives sobre secrets militars evitaven per complet que es revelés l'estat de la tecnologia d'imatges infraroges. Aquest secretisme va començar a desaparèixer a mitjans dels anys 50, i des d'aquest moment la ciència i la indústria civil varen començar a tenir a la seva disposició dispositius d'imatges tèrmiques.

Al 1965 una companyia sueca va llençar al mercat la primera càmera infraroja comercial. Aquestes primeres càmeres se les coneix com a radiòmetres, utilitzada principalment per inspeccionar línies d'alta tensió. D'aquesta manera entre el 1960 i el 1970, sorgeixen els primers proveïdors comercials de càmeres infraroges, la seva aplicació a assajos no destructius va ajudar a la seva extensió i consolidació en el mercat.

El següent gran progres tecnològic va arribar als anys 1980, quan es va desenvolupar la primera càmera de plans facials focals seriatos per FPA (Focal Plane Array). Aquestes càmeres reduïen el nivell de soroll de les imatges, estalviaven temps i tenien connexió digital directa.

Per altra banda al 1985 es va tornar a millorar el sistema de refrigeració, es va aconseguir introduir un sistema que no requeria nitrogen líquid per refredar el detector, aquest sistema consistia en integrar un refrigerador criogènic dins l'aparell. Això, ha permès suprimir la necessitat de refredar els sensors amb cada mesura realitzada, i per tant millorar la mobilitat i portabilitat de la càmera durant les inspeccions.

Ha calgut esperar fins el 1997 per trobar al mercat una càmera tèrmica amb un detector no refrigerat, es podria dir que aquest ha estat un dels últims grans avanços en la tecnologia de les càmeres infraroges i de la termografia infraroja en general, el sistema que ha permès substituir el refrigerador ha sigut l'aparició dels microbolòmetres. Un dels principals avantatges del microbolòmetre és que no conté peces mòbils i és per tant, menys susceptible a les averies. A més a més la seva producció resulta menys costosa, fet que ha permès als fabricants de càmeres tèrmiques reduir el preu dels seus productes.

5. MARC NORMATIU NACIONAL I INTERNACIONAL

Actualment no existeix una normativa d'obligat compliment a Espanya de termografia com a tal, si que hi ha vèries normatives i directrius agrupades en dos conjunts principals, que consisteixen en requisits pel que fa a especificacions tècniques de les càmeres termogràfiques i per altra banda especificacions per la formació i qualificació del personal que utilitza la termografia. Es pot dir doncs, que no es troba normativa específica sobre termografia aplicada a la construcció a l'Estat Espanyol (normativa de referència a Catalunya).

S'han estudiat les normatives internacionals que fan referències de l'aplicació de la termografia aplicada a la construcció per tal de tenir una base solida de treball. No es disposa de normativa específica d'aplicació en estudis d'anàlisi del patrimoni arquitectònic històric.

A continuació s'especifiquen les normatives relacionades amb l'aplicació de la termografia i es resumeixen i expliquen les que fan especial referència al sector de la construcció.

Cal tenir en compte que cap de les normatives sobre termografia directament relacionades amb l'àmbit de la construcció no pretenen abordar tots els problemes de seguretat, en cas que n'hi hagi, relacionats amb el seu ús. És responsabilitat de l'usuari de qualsevol de les normes establir els criteris i pràctiques apropiades de seguretat i salut i determinar l'aplicabilitat de les limitacions reglamentàries de la legislació vigent abans del seu ús.

ISO (International Organization for Standardization):

- *ISO 13372:2012 Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary*¹

La norma defineix els termes utilitzats en el monitoratge de condició i diagnòstic de màquines. El seu objectiu és proporcionar als usuaris i fabricants de monitorització de condicions i sistemes de diagnòstic un vocabulari comú.

¹ *Condicions de de vigilància i diagnòstic d'imatges – Vocabulari.*

- ISO 13379-1:2012 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Data interpretation and diagnostics techniques -- Part 1: General guidelines*²

Aquesta norma proporciona directrius per a la interpretació de dades i diagnòstic de màquines. Pretén, als usuaris i de sistemes de diagnòstic de condició i monitoratge compartir conceptes comuns en els camps de diagnòstic de la màquina; Permet als usuaris preparar les característiques tècniques necessàries que s'utilitzen per al diagnòstic addicional de la condició de la màquina; Donar un enfocament adequat per aconseguir un diagnòstic d'avaries de la màquina.

Donat que es tracta de pautes generals, no s'inclou una llista dels tipus de màquines abordades. No obstant això, els grups de màquines cobertes per aquesta part de la norma ISO 13379 normalment inclouen màquines industrials com ara turbines, compressors, bombes, generadors, motors elèctrics, ventiladors, i caixes de canvi.

- ISO 9712:2012 *Non-destructive testing -- Qualification and certification of NDT personnel*³

Aquesta norma internacional especifica els requisits i principis per a la qualificació o certificació de personal que realitza assajos no destructius (END).

El sistema especificat en aquesta norma pot aplicar-se també a altres mètodes d'assajos no destructius o noves tècniques dins d'un mètode no destructiu establert, sempre que hi hagi un esquema integral de la certificació i el mètode o tècnica estigui cobert per les normes internacional, regionals o nacionals, o el nou mètode END o la tècnica hagi demostrat ser eficaç amb la satisfacció de l'entitat certificadora.

La certificació cobreix el domini d'un o més dels següents mètodes:

- Proves d'emissió acústica.
- Prova de corrents.
- Prova termogràfica infraroja.
- Proves de fuites (proves de pressió hidràulica excloses).
- Proves magnètiques.
- Proves de penetració.

² Condiciones de vigilancia i diagnòstic de màquines – Directrius generals per la interpretació de dades i les tècniques de diagnòstic – Part 1: Regles generals.

³ Assajos no destructius – Certificació de personal per END

- Proves amb radiografia.
 - Proves de calibratge de tensions.
 - Proves amb ultrasons.
 - Proves visuals (proves visuals sense ajuda directa i les proves visuals realitzades durant l'aplicació d'un altre mètode END estan excloses).
- ISO 17359:2011 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- General guidelines* ⁴

La norma estableix les directrius per als procediments generals que s'han de considerar en establir un programa de monitoratge de la condició de les màquines i inclou referències a les normes associades necessàries en aquest procés. Aquesta norma s'aplica a totes les màquines.

- ISO 18434-1:2008 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Thermography -- Part 1: General procedures* ⁵

Aquesta norma proporciona una introducció a l'ús de la termografia infraroja a la supervisió i diagnòstic de condicions de la maquinària, considerant maquinària com a qualsevol auxiliar de la màquina com les vàlvules, líquids, i las màquines elèctriques addicionals, i equip relacionat amb l'intercanvi de calor. A més a més, es tenen en compte els usos de la termografia infraroja per avaluar el funcionament de la maquinària.

El document descriu els tipus de procediments termogràfics, proporciona la direcció i estableix els criteris de la avaluació de les anomalies identificades amb la càmera. També determina els mètodes i requisits dels contorns per realitzar termografia infraroja a màquines. Inclou recomanacions de seguretat, proporciona informació de la interpretació dels resultats obtinguts i estableix criteris d'avaluació i requisits de divulgació.

La norma també proporciona mètodes de prova per determinar i compensar la temperatura aparent reflectida, la emissivitat, i com atenuar mitjans quan es mesura la temperatura de la superfície d'un objecte quantitatiu amb una càmera termogràfica.

⁴ Condicions de vigilància i diagnòstic de màquines – Directrius generales.

⁵ Condicions de vigilància i diagnòstic de màquines – Termografia – Part 1: Procediments generales.

- ISO 18436-3:2008 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for qualification and assessment of personnel -- Part 3: Requirements for training bodies and the training process*⁶

Aquesta norma defineix els requisits per a entitats que realitzen programes de capacitat de personal que realitza el monitoratge de condició de maquinària, identificar errors de la màquina, i recomanar mesures correctives. S'especifiquen els procediments per a la formació de personal de control de l'estat i de diagnòstic.

- ISO 18436-7:2008 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for qualification and assessment of personnel -- Part 7: Thermography*⁷

La norma defineix els requisits per a la qualificació i la avaluació del personal que realitzi la supervisió i el diagnòstic de condició de la maquinària utilitzant la termografia infraroja. Un certificat o una declaració de la conformitat de la ISO 18436-7:2008 proporciona el reconeixement de les qualificacions i de la capacitat dels individus per realitzar mesures i anàlisis termogràfics per la supervisió de condició de la maquinària utilitzant la càmera termogràfica. Aquest procediment pot no ser aplicat a equips especialitzats o a altres situacions específiques. Aquesta ISO determina un programa de classificació dels tres nivells de termògraf.

- ISO 13374-2:2007 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Data processing, communication and presentation -- Part 2: Data processing*⁸

La norma detalla els requisits per un model d'informació de referència i un model de procés de per la monitorització i diagnòstic d'elements en l'arquitectura. Els programaris professionals requereixen tant un model d'informació com un model de processament per a descriure adequadament tots els requisits de processament de dades.

⁶ Condicions de vigilància i diagnòstic de màquines - Requisits para la qualificació i avaluació de personal - Part 3: Requisits pels organismes de formació i el procés de formació

⁷ Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Requisits para la calificació y avaluació de personal - Part 7: Termografía.

⁸ Condiciones de vigilancia i diagnòstic de màquines – Processament de dades, la comunicació i presentació – Part 2: Processament de dades.

- ISO 13381-1:2004 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Prognostics -- Part 1: General guidelines*⁹

La norma proporciona una guia per al desenvolupament dels processos de pronòstic. El seu objectiu és permetre als usuaris i fabricants de sistemes de diagnòstic i de condició de monitoratge compartir conceptes comuns en els camps de pronòstic de maquinària; per permetre als usuaris determinar les dades necessàries, les característiques i el comportament necessari per al pronòstic exacte; esbossar un enfocament apropiat per al desenvolupament del pronòstic i introduir conceptes per tal de facilitar el desenvolupament de sistemes i formacions futures.

- ISO 18436-1:2004 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for training and certification of personnel -- Part 1: Requirements for certifying bodies and the certification process.*¹⁰

El document defineix els requisits per les persones i organismes que ofereixen sistemes de certificació per a personal que realitza la supervisió de condicions de la maquinària, identifica avaries de la màquina i recomana l'acció correctiva. S'especifica el procediment per la certificació de la supervisió de condició i personal de diagnòstic.

- ISO 13374-1:2003 *Condition monitoring and diagnostics of machines -- Data processing, communication and presentation -- Part 1: General guidelines*¹¹

La norma estableix directrius generals per a les especificacions de programari relacionats amb el processament de dades, la comunicació i presentació d'estat de la màquina de control i informació de diagnòstic.

⁹ Condicions de vigilància i diagnòstic de màquines – Pronòstic – Part 1: Regles generals.

¹⁰ Condicions de vigilància i diagnòstic de màquines – Requisits per la formació i titulació del personal – Part1: Requisits pels organismes de certificació i el procés de certificació.

¹¹ Condicions de vigilància y diagnòstic de màquines – Processament de dades, la comunicació i presentació – Part 1: Regles generals.

- ISO/DIS 10878 *Non-destructive testing -- Infrared thermography – Vocabulary* ¹²

Aquesta norma defineix els termes utilitzats en la termografia infraroja per assajos no destructius i forma una base comuna per a l'ús general estàndard.

- ISO 6781:1983 *Thermal insulation -- Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes -- Infrared method* ¹³

Aquesta norma especifica un mètode qualitatiu, a partir d'un examen termogràfic (mètode infraroig), per detectar irregularitats termals en l'embolcall de l'edifici. Aquest sistema s'utilitza per verificar diferents variacions en les característiques tèrmiques, incloent l'hermeticitat de l'aire, dels components que constitueixen les façanes de l'edifici. No s'aplica a la determinació del grau d'hermeticitat de l'aïllament tèrmic i de l'aire d'una estructura.

- EN 13187:1999 *Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method* ¹⁴

Normativa desenvolupada a Europa però actualment acceptada a nivell internacional com a ISO.

Aquesta norma defineix un mètode qualitatiu, mitjançant un examen termogràfic, la detecció d'irregularitats tèrmiques a la pell dels edificis. Per altra banda també s'utilitza per determinar la ubicació de les irregularitats tèrmiques i la ubicació de les zones on hi ha fugues d'aire al llarg dels tancaments. Inicialment el procés d'aquesta normativa es va utilitzar per identificar variacions en les propietats tèrmiques, com l'opressió a de l'aire, dels components que constitueixen l'embolcall de l'edifici. Actualment, no s'aplica aquesta norma per la determinació del grau d'aïllament tèrmic i estanqueïtat de l'estructura ja que per a aquestes determinacions són necessaris exàmens seguin altres metodologies.

Requisits generals de prova que especifica la normativa que es necessiten considerar en un estudi termogràfic.

¹² Assajos no destructius - Termografia infraroja - Vocabulari.

¹³ Aïllament tèrmic – Detecció qualitativa de irregularitats tèrmiques en façanes de l'edifici – Mètode infraroig.

¹⁴ Rendiment tèrmic de edificis. Detecció qualitativa d'irregularitats tèrmiques en façanes dels edificis. Mètode infrarojos (ISO 6781:1983 modificada).

- Les especificacions i capacitats de l'equip termogràfic.
- Les característiques dels tancaments de l'edifici com els diferents tipus i ubicacions dels sistemes de calefacció, elements estructurals, capes d'aïllament, etc.
- Les propietats radiants de la superfície, per exemple els materials del revestiment.
- Factors climàtics.
- Accessibilitat per una fàcil inspecció.
- Influències de l'entorn.
- Altres factors d'importància.

En aquesta normativa també s'especifiquen dues formes de termografia:

- a) Verificació amb una càmera IR: es dirigeix principalment a la inspecció de l'eficiència general del edificis de nova construcció o edificis que han sofert una gran rehabilitació.
- b) Verificació simplificada amb una càmera IR: quan es realitzen auditories, en diferents inspeccions de control en processos de constructius o de rehabilitació.

Aquestes dues aplicacions es diferencien principalment en la comunicació dels resultats i en la presentació dels informes. Els resultats obtinguts per mitjà d'aquest mètode han de ser interpretats i avaluats per personal qualificat per aquesta finalitat.

ASNT (American Society for Nondestructive Testing)

- ASNT SNT-TC- 1A *Recommended Practice - Standard Topical Outlines for Qualification of Nondestructive Testing Personnel (ANSI/ASNT CP-105)* ¹⁵

Aquest document estableix com realitzar els assajos, proporciona directrius per al personal que realitza proves i assajos no destructius.

¹⁵ Pràctica recomanada – Qualificació i certificació de personal en proves no destructives.

ASTM (American Society for Testing and Materials):

- ASTM E1934-99a (2014) *Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography.* ¹⁶

Aquesta guia enumera les responsabilitats de l'usuari final i el termògraf en examinar els sistemes elèctrics i mecànics. També descriu el contingut específic necessari per documentar exàmens realitzats amb càmeres termogràfiques tan qualitatives com quantitatives d'equips elèctrics i mecànics. El document pot implicar l'ús d'equips i materials en presència d'equips energitzats o en moviment. Aquesta norma no pretén considerar tots els problemes de seguretat, si n'hi han associats amb el seu ús. És responsabilitat de l'usuari d'aquesta norma d'establir pràctiques de seguretat i salut i determinar l'aplicabilitat de les limitacions reglamentàries abans del seu ús.

- ASTM D4788-03 (Reapproved 2007). *Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography* ¹⁷

Aquest sistema de prova es pot utilitzar conjuntament amb altres mètodes de prova en la determinació de la condició general d'una coberta del pont. Les àrees indicades com a deslaminades en cobertes del pont poden ser una indicació de la proximitat de l'enllaç entre el recobriments i la coberta subjacent del pont. Aquest mètode de prova amb càmeres termogràfiques pot ser utilitzat per la determinació de l'àrea específica que requereix ser reparada.

- ASTM C1046-95 (Reapproved 2007). *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components* ¹⁸

¹⁶ Guia estàndard per a l'examen d'equips elèctrics i mecànics amb termografia infraroja

¹⁷ Mètode de prova estàndard per la detecció de laminacions en cobertes de ponts utilitzant la imatge infraroja.

¹⁸ Mètode de prova estàndard per a la mesura "in situ" del flux de calor i la temperatura en components de la façana dels edificis.

Aquesta norma defineix la tècnica per a l'ús de transductors de flux de calor (HFTS) i transductors de temperatura (TTS) en els mesuraments del comportament tèrmic dinàmic in-situ i l'estat d'equilibri dels components opacs de la pell dels edificis. Les sol·licituds d'aquestes dades inclouen la determinació de resistències termals o de les constants de temps tèrmic. No obstant això, aquests usos estan fora de l'abast d'aquesta pràctica. La norma també aplica la termografia infraroja, en cas de desconeixement de les característiques del subsòl, per localitzar els llocs apropiats per col·locar els HFTS i TT.

- ASTM C1060-90 (Reapproved 2003). *Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings*¹⁹

Aquesta norma defineix com realitzar un ús adequat dels sistemes d'imatge d'infrarojos per a la realització d'inspeccions qualitatives tèrmiques dels edificis, tancaments, cobertes, etc. emmarcats en fusta o metall, que poden contenir l'aïllament en els espais entre peces del marc. Aquest procediment permet la detecció de cavitats on l'aïllament pot ser inadequat, insuficient, detectar punts en el que el material no ha estat ben instal·lat o la desaparició o dany provocat per l'ús. També proporciona un mitjà fiable per a la detecció del gruix parcial de l'aïllament.

En aquest document també queden descrits els requisits d'instrumentació, calibratge i els procediments de mesurament que s'han de tenir en compte per a realitzar les inspeccions, tant a l'exterior com a l'interior, i el ventall de variacions que poden tenir aquests requisits en funció d'unes condicions ambientals que també queden descrites. En temes de seguretat, a més d'aplicar la legislació vigent també s'ha de tenir especial precaució en el maneig de líquids criogènics o gasos a pressió necessaris per a l'ús en aquesta pràctica.

- ASTM C1153-97 (Reapproved 2003). *Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging*²⁰

Aquesta norma defineix les tècniques que empren imatges infraroges a la nit per determinar la localització de l'aïllament mullat en sistemes de cobertes que tenen aïllament per sobre

¹⁹ Mètode de prova estàndard per a la inspecció termogràfica d'instal·lacions d'aïllament tèrmic en cavitats de l'estructura de les façanes de l'edifici.

²⁰ Mètode de prova estàndard per a la localització de l'aïllament humit en sistemes de coberta utilitzant imatge infraroja.

de la coberta i en contacte amb la impermeabilització. Aquesta pràctica tracta els criteris necessaris per a l'ús d'equips infrarojos tals com la diferència de temperatura mínima resoluble, rang espectral, camp de visió instantani i camp de visió. Igualment té molt en compte les condicions de la coberta sobre les inspeccions infraroges, els procediments d'operació, les qualificacions de l'operador i les pràctiques operatives. Igualment s'encarrega de definir els mètodes de verificació de les dades infraroges fent servir mètodes invasius de prova. A més la normativa inclou inspeccions terrestres i aèries amb tot el que això comporta.

En temes de seguretat, a més d'aplicar la legislació vigent també s'ha de tenir especial precaució en el maneig de líquids criògens o gasos a pressió necessaris per a l'ús en aquesta pràctica. A més, com que aquesta norma es contemplan la possibilitat d'inspeccions terrestres i aèries, s'haurà de tenir molta cura quan s'accedeixi a prendre dades o caminar sobre superfícies del terra i quan els avions operin a baixa altura, especialment de nit. És una bona pràctica de seguretat que almenys dues persones estiguin presents en la superfície de la coberta en tot moment al llarg dels controls terrestres que s'estiguin duent a terme.

6. PRINCIPIS FÍSICS DE LA TERMOGRAFIA

6.1 CALOR I TEMPERATURA

Els termes calor i temperatura sovint han estat utilitzats indistintament. És clar que hi ha una estreta relació entre ells, però cal tenir clara la diferència ja que, no defineixen el mateix concepte.

Per tal de poder definir el concepte calor cal entendre que la matèria, per tant tot allò que ens envolta, està composta per petites partícules denominades àtoms i molècules; quan un objecte s'escalfa, les seves molècules vibren amb més energia, augmenten el seu moviment i per tant, la seva energia cinètica, aquest moviment constant origina un tipus d'energia anomenada *Energia Tèrmica*. Al refredar-se, un objecte calent perd energia tèrmica, però no perd tota la seva calor, senzillament té menys energia tèrmica que abans. Al escalfar un objecte, l'energia tèrmica es absorbida per les seves molècules. Si es tracta d'un sòlid, les seves molècules vibren amb més energia; si es subministra suficient energia, poden trencar-se els enllaços intermoleculars i el sòlid es fon i passa a un estat líquid. Com més fortes siguin les seves unions intermoleculars més energia tèrmica es necessitarà per produir una fusió. En el cas dels líquids, les molècules poden moure's lliurement dins del seu medi. Quan un líquid s'escalfa, les seves molècules es mouen gradualment amb més rapidesa, i arriba un moment en el que el líquid bull.

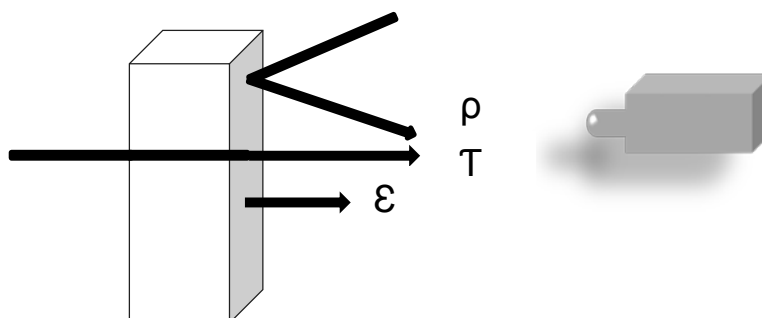
Es transfereix energia (calor) entre diferents cossos o diferents zones d'un mateix cos que es troben a diferents temperatures. Aquest flux de temperatures sempre és d'un cos de temperatura més alta a un cos a més baixa temperatura, hi haurà transferència de temperatures fins que el calor dels dos cossos siguin iguals i per tant hi haurà equilibri tèrmic.

Per mínima que sigui, tots els cossos tenen energia mesurable. Una de les unitats de mesura més usades per mesurar l'energia tèrmica d'un material és la temperatura. Aquesta consisteix en una mesura de la calor que representa l'energia tèrmica mitjana d'un dels cossos o materials. Per tant, la temperatura no és energia, sinó una manera de mesurar-la i depèn de la velocitat de les partícules en un determinat material o substància.

Per tant doncs, ja podem entendre la diferència de calor i temperatura. Calor és l'energia total continguda en el moviment molecular d'un determinat material. La temperatura representa la velocitat mitjana (energia cinètica mitjana) del moviment molecular en un material.

6.2 TRANSMISIÓ, EMISSIÓ I REFLEXIÓ

La radiació de rajos infrarojos registrada per una càmera termogràfica consisteix en la radiació de l'ona llarga emesa, reflectida i transmesa que sorgeix dels objectes presents en l'angle de visió de la càmera. Cada objecte té unes característiques específiques que poden influenciar en diferents graus la mesura de la temperatura per infrarojos.



3. Emissió, reflexió, transmissió.

Font: Idòia Torrent

6.2.1 TRANSMISIÓ DE LA CALOR

La transmissió de calor (τ) és degut a l'intercanvi d'energia entre diferents cossos o parts d'un mateix cos amb diferents temperatures. En aquest procés l'energia passa del cos de major temperatura al de menor temperatura, aquests fet es repetirà sempre que hi hagi dos cossos en contacte o un cos amb temperatura diferent.

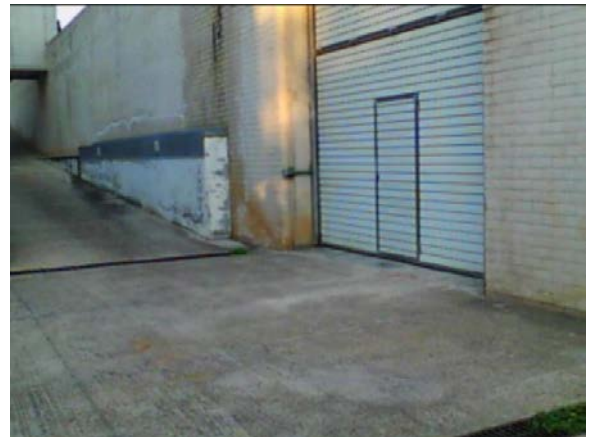
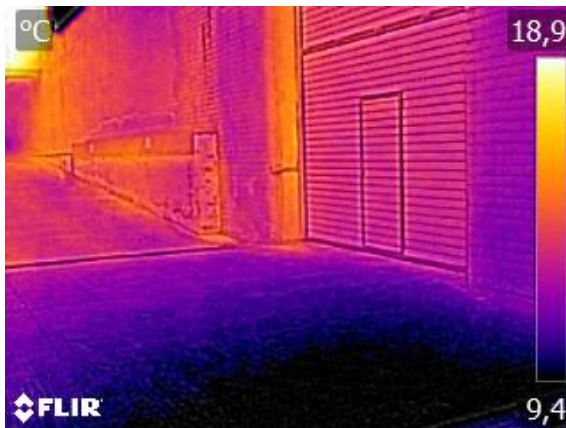
La transmissió de calor es produeix mitjançant tres processos: Conducció, Convecció i Radiació. Aquests processos es poden produir de manera simultània o que n'hi hagi un que prevalgui per sobre dels altres dos processos.

A més a més, cadascun d'aquests processos pot ser estable o inestable. En una transferència estable, la velocitat de la transferència de calor és constant, i no canvia de sentit. Aquest tipus de transferència necessita condicions molt estables. Fora d'estudis a laboratori, es pot dir que no

existeix un flux de calor estable ideal, a la pràctica els fluxos són inestables i presenten certes fluctuacions.

Quan es realitzen estudis de termografia a camp seran en condicions inestables ja que la temperatura exterior d'un edifici té fluctuacions, aquestes tenen forma sinusoidal amb un període de 24 hores.

- **RADIACIÓ:** es produeix quan els cossos emeten energia en forma d'ones electromagnètiques, en aquest procés la matèria o els cossos, no han d'estar en contacte perquè es produeixi la transferència de calor.

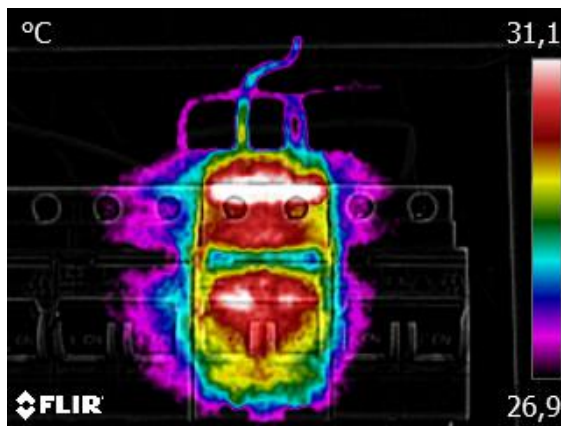


4. Imatge termogràfica d'un espai exterior de l'Edifici PII de l'Escola Politècnica de la Universitat de Girona. Al canto la mateixa imatge en format digital.

Font: Idòia Torrent, imatge realitzada amb una càmera termogràfica Flir E5

En aquesta imatge es pot veure un espai exterior amb murs en diferents orientacions, gracies a la termografia es pot veure com les superfícies de murs que han estat més exposades directament al sol presenten una temperatura més elevada. Aquest fenomen és l'escalfament per radiació.

- **CONDUCCIÓ:** aquest procés consisteix en la transferència de calor entre objectes sòlids i es produeix mitjançant el contacte físic. En aquest procés es transmet la calor sense transport de matèria, es realitza per la interacció entre els àtoms o les molècules.

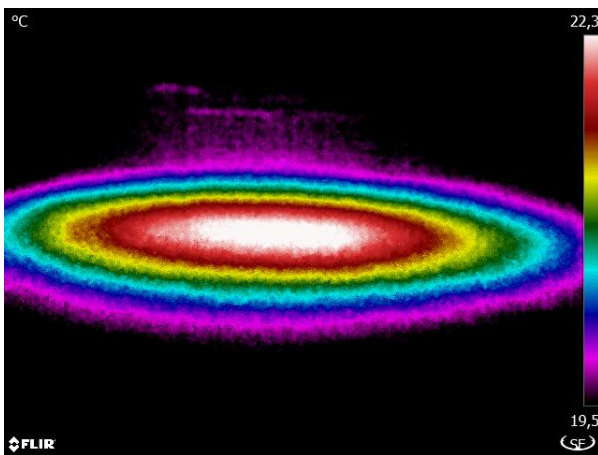


5. . Imatge termogràfica d'un quadre elèctric de l'Edifici PII de l'Escola Politècnica de la Universitat de Girona. Al canto la mateixa imatge en format digital.

Font: Idòia Torrent, imatge realitzada amb una càmera termogràfica Flir E5

En aquesta imatge es pot veure una filera de diferencials d'un quadre elèctric. Es detecta que un dels diferencials està treballant a més temperatura que els altres (possible sobrecàrrega). Per conducció tèrmica els diferencials contigus al diferencial sobreescalfat també presenten escalfor en les zones que estan en contacte.

- CONVECCIÓ: consisteix en la transferència de calor entre líquids i gasos, normalment es produeix amb el moviment de la calor d'una part del fluid cap a l'altre.
 - Convecció natural: el moviment es degut a la variació de densitat amb la temperatura. La força de la gravetat és l'encarregada de provocar el moviment. Que succeeixi dependrà de la temperatura, la orientació de la superfície i de la direcció del flux de calor.
 - Convecció forçada: el moviment es produeix externament, gracies a algun element com per exemple un ventilador. Aquest fet dependrà principalment de la velocitat de l'aire.



6. Imatge termogràfica d'un forjat de l'Edifici PII de l'Escola Politècnica de la Universitat de Girona. Al canto la mateixa imatge en format digital.

Font: Idòia Torrent, imatge realitzada amb una càmera termogràfica Flir T640

En aquesta imatge es pot veure com en un forjat que aparentment no hauria de presentar diferències de temperatura, s'hi aprecia una forma circular a major temperatura. Es coneix que sota d'aquest forjat hi ha un dipòsit d'aigua calenta. Per tant per, l'aire calent que desprèn aquest dipòsit escalfa el forjat superior, aquest és una exemple d'escalfament per convecció.

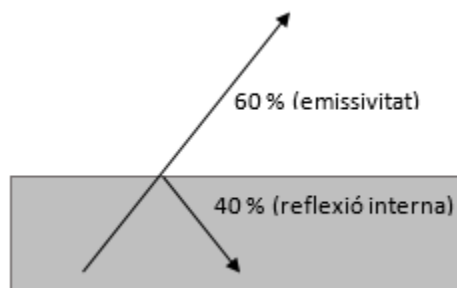
6.2.2 EMISSIÓ

La quantitat d'energia radiada per un objecte dependrà de la seva temperatura i de la seva emissivitat. Donat que només el cos negre és capaç d'emetre el total de la radiació que absorbeix, es pot dir que els objectes no són emissors perfectes d'energia infraroja. L'energia es mou cap a la superfície però certa quantitat d'energia es reflexa cap a l'interior i mai surt. L'emissivitat d'un element és el quocient entre l'energia emesa respecte de l'energia emesa si fos un cos negre.

Així doncs la emissivitat s'expressa de la següent manera,

$$\text{Emissivitat } \varepsilon = \frac{\text{radiació emesa per un objecte a temperatura T}}{\text{radiació emesa per un cos negre a temperatura T}}$$

Per tant, la emissivitat és l'expressió de la capacitat d'un objecte d'emetre energia infraroja. Tots els cossos que estan a una temperatura superior al 0 absolut (-278° K) emeten energia radiant, la qual cosa està subjecte a la emissivitat, valor que varia en funció de diferents variables com el color i la rugositat de la superfície, per exemple, com més rugosa sigui la superfície del material més alt serà el valor de la emissivitat i com més llisa, més baix. Aquestes característiques es veuen en la Llei de Stefan-Boltzmann



7. Exemple cos amb emissivitat 0.6 i reflexió 0.4.

Font: Idòia Torrent

Energia Radiant (W/m²) $E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ On;

σ : constant (5.67 · 10⁻⁸)

T: Temperatura (K)

ε : emissivitat

Els valors d'emissivitat estan compresos entre el 0 i l'1 com major sigui l'emissivitat més proper a 1. Per exemple, els metalls donat que no son rugosos (suposant que no estiguin rovellats), tenen un valor d'emissivitat molt baix (acer brillant 0.18) en canvi els materials més aspres tenen un valor més elevat (acer oxidat 0.85, ciment 0.90).

S'ha demostrat que hi ha relació entre l'emissivitat i la reflectivitat. Per un objecte opac, aquesta relació ve determinada com a:

$$\text{Emissivitat} + \text{Reflectivitat} = 1,0$$

(Llei de Kirchhoff)

Aquesta relació torna a fer evident el fet que els materials metàl·lics tenen un valor d'emissivitat molt baix ja que el seu valor de reflectivitat és molt elevat, per tant podem dir que els materials altament reflectants tenen una emissió d'energia infraroja molt pobre.

Quan es vol utilitzar una càmera termogràfica s'ha de tenir molt clar el concepte d'emissivitat i saber-lo aplicar en funció del material que s'estigui estudiant. L'emissivitat ens pot crear una percepció errònia de la temperatura, per exemple, si es col·loquen dos materials amb emissivitats totalment diferents (un material amb emissivitat molt elevada i un altre amb emissivitat molt baixa) junts dins d'un forn i s'escalfen exactament a la mateixa temperatura, degut a la diferència d'emissivitats dels materials, es provoca radiacions a diferents nivells. Això farà que el material amb baixa emissivitat aparegui més fred que el material amb emissivitat elevada, encara que tots dos estiguin a la mateixa temperatura. La càmera termogràfica veuria els materials igual que l'ull humà produiria un error en la mesura de la temperatura. La temperatura d'un objecte no es pot determinar mitjançant l'energia infraroja que emet, també cal conèixer els valors d'emissivitat.

Per poder determinar l'emissivitat d'un objecte hi ha diferents sistemes:

- **EMISSIVITAT SEGONS TAULES:** Els materials més utilitzats en les imatges termogràfiques tenen els valors d'emissivitats referenciats en les taules de materials que faciliten els diferents fabricants d'aparells termogràfics. Cal assegurar-se que han estat avaluats a la longitud d'ona de treball de la càmera termogràfica que es vol utilitzar, i que la emissivitat pot variar amb la longitud d'ona. En aquestes taules hi apareixen els materials més utilitzats.
- **DETERMINACIÓ SEGONS LA NORMA:** La norma ISO 18434-1 determina dos mètodes per determinar l'emissivitat dels materials. Aquests processos es realitzen en condicions

estàndards a laboratori. Els dos mètodes són, el mètode directa i el mètode del reflector, els termògrafs haurien de tenir en compte que el mètode directa normalment no inclou l'efecte del calor generat pel propi termògraf i la càmera, fet que en alguns casos suposa una font significativa d'error.

a. Mètode directa:

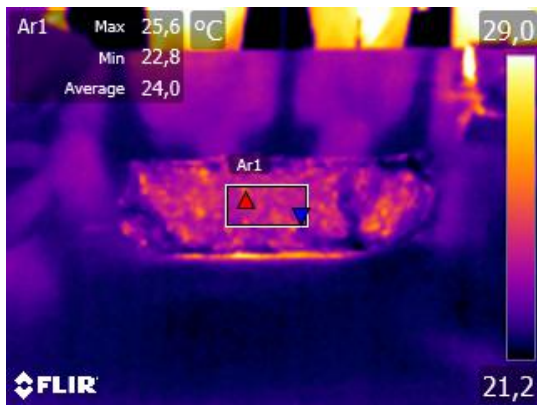
Per mesurament de la temperatura per contacte mitjançant instrumental (termocupla, termòmetre, etc):

Un cop es coneix la temperatura del cos que es sotmet a estudi amb un dels aparells indicats, s'enfoca l'objecte amb la càmera termogràfica, s'ajusta la emissivitat a la càmera per tal de que aquesta indiqui el valor de temperatura mitjana trobat anteriorment. Quan les temperatures són iguals, l'emissivitat que indica la càmera és la de l'element a estudiar.

b. Mètode del reflector:

A continuació s'especifiquen els passos que cal dur a terme per determinar l'emissivitat a partir del reflector.

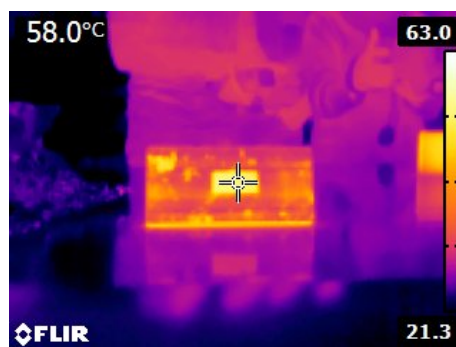
1. Agafar un material que actuï com a reflector difusor perfecte, per exemple un tall de paper d'alumini que hagi estat arrugat i tornat a allisar (és important que quedin plans amb diferent orientació com més petits millor). Col·locar-lo just a sobre la superfície del material que s'estigui estudiant, és aconsellable tenir una fullola folrada amb aquest material, d'aquesta manera sempre estarà totalment recta.
2. Mesurar amb la càmera la temperatura de sobre el reflector. La mesura és realitza buscant la temperatura mitjana d'una zona que quedi dins del reflector, aquest procés es realitzarà mitjançant el software de la càmera termogràfica.



8. A la dreta imatge digital del paper d'alumini sobre de l'element que s'estudia. A l'esquerra la mateixa imatge amb termografia.

Font: Idòia Torrent, imatge realitzada amb una càmera termogràfica Flir E6

3. Es retira el material reflectant de sobre del cos que s'analitza, quedant al descobert l'element del qual es vol conèixer l'emissivitat. Prèviament se li haurà enganxat un tall de cinta aïllant amb emissivitat coneguda ($\epsilon = 0.96$) i s'haurà escalfat el conjunt 20°C per sobre de la temperatura inicial.
4. Llegir la temperatura que marca la cinta aïllant havent corregit la distància, la temperatura atmosfèrica, la humitat, etc, per un millor processament posterior és important haver fet una captura de la imatge.



9. Termografia de l'element que s'estudia amb el curso a la cinta aïllant

Font: Idòia Torrent, imatge realitzada amb una càmera termogràfica Flir E6

5. Seguidament, moure el cursor de la pantalla digital de la càmera termogràfica cap a un punt del cos que s'estudia, s'haurà de moure tenint en compte que quedi dins del mateix rang de temperatura.



10. Termografia de l'element que s'estudia amb el curso al material

Font: Idòia Torrent, imatge realitzada amb una càmera termogràfica Flir

6. En aquest punt de l'element, la temperatura que es mostra a la càmera serà diferent que la temperatura que donava a la cinta. Caldrà anar ajustant l'emissivitat al software per tal d'igualar les dues temperatures obtingudes.

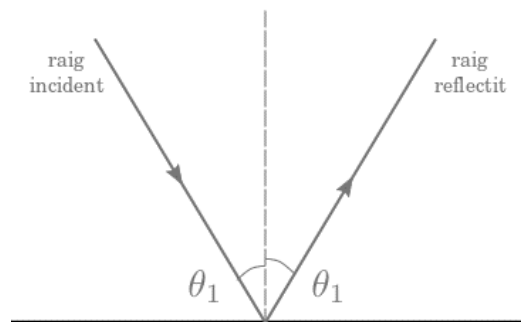
En el moment en que les dues temperatures són totalment iguals, l'emissivitat del cos serà la correcta.

A l'apartat d'annexes, s'inclouen les taules d'emissivitat estandarditzades que s'han utilitzat en els diferents assajos termogràfics que s'han realitzat.

6.2.3 REFLEXIÓ

S'entén per reflexió (ρ) la mesura de la capacitat d'un objecte de reflectir la radiació infraroja, la reflexió podrà ser especular (com un mirall) o difusa (reté l'energia). Aquesta propietat depèn de les característiques de la superfície, de la temperatura i del tipus de material. Generalment, les superfícies llises i polides reflecteixen més que no les superfícies que presenten irregularitats o que no estan polides encara que siguin del mateix material.

L'angle de radiació infraroja reflectida sempre coincideix amb l'angle de radiació que li insereix.



11. Esquema de la reflexió d'un raig d'energia infraroja a l'incidir sobre un cos.

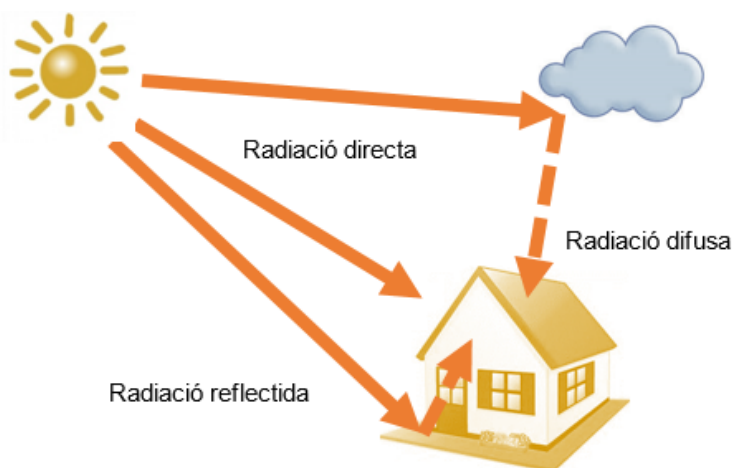
Font: Bloc Univers Físic 2012

TEMPERATURA REFLECTIDA DIFUSA

Entre l'objectiu de la càmera termogràfica i el cos que s'estudia sempre hi ha un espai (mínim de 40 cm). Aquest espai permet a altres cossos reflectir temperatura i falsejar la lectura de la radiació infraroja pròpia del cos. La temperatura reflectida és 1 menys l'emissivitat del material, en el moment en que es determina la emissivitat a la càmera, el mateix sistema ja realitza aquesta diferència i discerneix el que és calor propi del cos del que és temperatura reflectida. Per exemple, en un cos que la seva emissivitat sigui 0.30, la càmera automàticament calcula que el 0.70 restant que rep de radiació infraroja és temperatura reflectida. A la càmera caldrà especificar aquest valor, serà diferent per interiors i per exteriors:

- Temperatura reflectida en interiors, per defecte s'utilitza 23°C tot i que dependrà de la temperatura ambiental real.

- Temperatura reflectida en exteriors, aquest valor serà d'aproximadament -20°C , en cas de no tenir en compte aquesta temperatura l'error tampoc seria molt gran. Generalment quan es realitzen termografies exteriors els elements a estudiar són materials petris i per tant amb una emissivitat elevada ($\epsilon = 0.95$), per tant la seva reflectida serà de l'ordre de 0.05. Suposant que a la càmera per error hi hagi introduïda una temperatura de 20°C la diferència entre la temperatura errònia i la real seria de 40°C aproximadament, un 5 % (valor reflectida de 0.05) de 40 és 2. Per tant, l'error que apareixeria en la lectura dels rajos infrarojos de l'element seria d'uns 2°C , valor que en estudis de termografia quantitativa no tindrien especial rellevància.



12. Esquema radiació directa, reflectida i difusa.

Font: Idòia Torrent

6.2.4 LLEI DE KIRCHHOFF'S

La radiació infraroja registrada per la càmera consisteix en:

- La radiació emesa per l'objecte que es mesura
- La reflexió de la radiació ambiental
- La transmissió de radiació del objecte que es mesura

El resultat de la suma d'aquests factors es sempre 1 (100%):

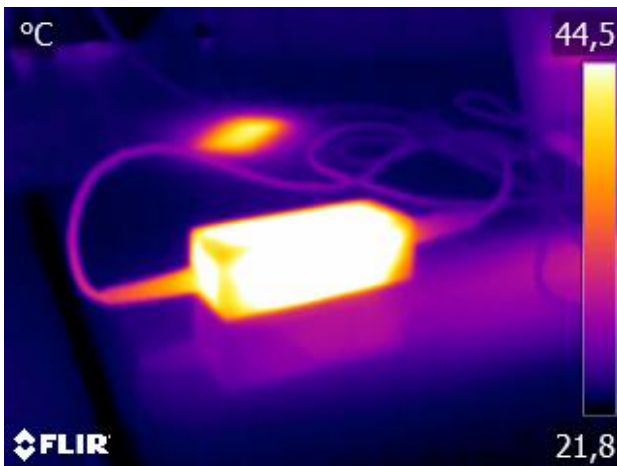
$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Donat que a la pràctica la transmissió juga un paper inapreciable, la variabilitat de τ es pot ometre a la fórmula i es simplifica a

$$\varepsilon + \rho = 1$$

CORRELACIÓ ENTRE EMISSIÓ I REFLEXIÓ

- La mesura dels objectes amb emissivitat elevada ($\varepsilon \geq 0.8$):
 - Presenten un nivell de reflexió baix (ρ): $\rho = 1 - \varepsilon$
 - Es pot mesurar la seva temperatura molt fàcilment amb la càmera termogràfica
- La mesura dels objectes amb emissivitat mitjana ($0.6 < \varepsilon < 0.8$):
 - Presenten un nivell de reflexió mitjà (ρ): $\rho = 1 - \varepsilon$
 - Es pot mesurar la seva temperatura fàcilment amb la càmera termogràfica.
- La mesura dels objectes amb emissivitat baixa ($\varepsilon \leq 0.6$)
 - Presenten un nivell de reflexió alt (ρ): $\rho = 1 - \varepsilon$
 - Es pot mesurar la seva temperatura amb la càmera termogràfica, però els resultats s'han de valorar molt escrupolosament.
 - Es primordial ajustar la compensació de la temperatura reflectida de forma correcta, ja que és un factor de vital importància pel càlcul de la temperatura.



13. Imatge termogràfica d'un carregador d'ordinador portàtil. a. Al canto la mateixa imatge en format digital.

Font: Idòia Torrent, imatge realitzada amb una càmera termogràfica Flir E6

En aquesta imatge es pot veure com sobre de la taula (pintura plàstic brillant amb valor d'emissivitat mitjà) es reflexa l'escalfor emesa per un carregador d'ordinador portàtil que està connectat a la corrent.

La verificació del correcte ajust de emissivitat es particularment important quan hi ha grans diferències de temperatures entre l'objecte mesurat i el seu entorn.

- En el cas que la temperatura de l'objecte mesurat sigui superior a la temperatura ambient
 - Un ajust de l'emissivitat massa alta dóna per resultat unes lectures de temperatura massa baixes.
 - Un ajust de l'emissivitat massa baix dóna per resultat unes lectures de temperatura massa altes.
- En el cas que la temperatura de l'objecte mesurat sigui inferior a la temperatura ambient
 - Un ajust de l'emissivitat massa alta dóna per resultat unes lectures de temperatura massa altes.
 - Un ajust de l'emissivitat massa baix dóna per resultat unes lectures de temperatura massa baixes.

6.3 EL COS NEGRE

Un cos negre és un element que absorbeix totalment l'energia irradiant de qualsevol direcció i longitud d'ona. Un cos negre emet la mateixa quantitat d'energia radiant que absorbeix. Ja que també té la propietat, seguint les lleis de Kirchhoff $\left(\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi) = \alpha(\lambda, \theta, \varphi)\right)$ de transmetre aquesta energia fins que s'arriba a l'equilibri termodinàmic amb l'ambient que l'envolta, aquest instrument se l'anomena *radiador perfecte*, el seu índex d'emissivitat doncs serà sempre 1.

El concepte de cos negre es considera ideal i no perfecte, ja que en realitat no existeix un cos que sigui capaç d'absorbir perfectament tota la radiació, tot i així, aquest principi serveix com a model de referència per al càlcul i mesura d'altres característiques derivades com la emissivitat.

Aquest concepte permet realitzar una classificació dels cossos depenent del seu comportament en front a les radiacions. Com ja hem vist, el *cos negre* és aquell que és capaç d'absorbir tota la radiació incident. El cos que reflexa tota la radiació i que per tant no n'absorbeix és el *cos blanc o especular*. Els cossos que permeten el pas de les ones electromagnètiques sigui quina sigui la seva longitud d'ona és el *cos transparent*.

6.4 INTERCANVI D'ENERGIA PER RADIACIÓ

6.4.1 RADIACIÓ TÈRMICA

L'emissivitat és una característica dels materials que influeix en la mesura de la radiació tèrmica emesa per un cos, però hi ha altres factors que també tenen influència en aquest valor. Cal saber doncs, que la radiació que arriba en el detector de la càmera termogràfica està composta, a més de la radiació emesa pel propi cos, per la radiació reflectida provinent d'altres cossos o de fonts lluminoses externes.

Per tal d'obtenir valors fiables caldria reduir aquestes radiacions "paràsit" ja que ens poden mostrar en l'anàlisi temperatures aparentment superiors a les temperatures reals, com per exemple en el cas d'una cantonada, que a causa de les reflexions mútues entre les dues pedres que la formen podrien estar emetent una temperatura a la càmera que no seria la real.

Un altre factor a considerar és l'angle d'incidència de les observacions realitzades. La emissivitat d'un material varia en funció de la direcció d'aquesta (cossos no-lambertians), arribant a ser nul·la per alguns angles d'observació. El paràmetre de l'emissivitat decreix en augmentar l'angle d'observació de manera proporcional.

Per últim, un altre element que influeix en les lectures termogràfiques és l'atmosfera, el medi en el que es transmet la radiació tèrmica, aquest influeix sobre les emissions absorbint i dispersant part d'aquesta radiació. Cal fer especial esment a les finestres de transmissió, és a dir, intervals de longitud d'ona per als que l'atmosfera és pràcticament transparent. Entre aquestes, existeixen les situades entre els 8 i 13 μm que, precisament, corresponen amb la longitud d'ona del màxim d'emissió per a cossos situats a temperatures ambient, segons la coneguda expressió de la Llei de Wien ($\lambda_{\text{max}} = \frac{2897.7}{T} = \frac{c3}{T}$)

TRANSMISSIÓ DE CALOR EN RÈGIM ESTACIONARI O TRANSITORI

En els estudis termogràfics es poden trobar aquest dos tipus de situacions. La transmissió de calor en règim estacionari succeeix quan les condicions ambientals són estables, és a dir, sense canvis de temperatura i amb un flux de calor constant. Per tant serà quan la potència de calor i l'escalfament són iguals.

Per altra banda, la transmissió de calor en règim transitori és aquell en el que hi ha canvis de temperatura i de flux de calor, aquest procés és el més habitual quan s'estudien edificis des de l'exterior per determinar les pèrdues calorífiques.

Transmissió de calor en regim estacionari

En l'estudi d'una paret que es troba en règim estacionari, si es consideren els mecanismes de transmissió tèrmica, els valors de la resistència superficial (convecció + radiació), s'incorporen a la resistència del tancament com una resistència en sèrie

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 +, \text{ etc} + R_{se}$$

$$\text{Transmissió tèrmica: } U = 1/R_T$$

Transmissió de calor en règim transitori

Durant el dia a l'exterior es donen variacions de temperatures significatives. Aquestes variacions de temperatura poden provocar que durant el dia la temperatura augmenti a l'exterior fent que aquesta temperatura sigui superior a la de l'interior de l'edifici, per tant, que la calor penetri a l'edifici. Durant la nit, pot succeir aquest fenomen de manera contrària i que per tant la temperatura exterior refredi l'edifici.

Els tancaments d'un edifici van acumulant i dissipant calor al llarg del dia. La difusivitat tèrmica α , indica la facilitat amb la que els canvis de temperatura es propaguen dins d'un cos. Aquest concepte es pot calcular mitjançant la següent expressió:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (m^2/s, m^2/h) \text{ on;}$$

α : difusivitat tèrmica

λ : conductivitat tèrmica (W/m k)

ρ : densitat (kg/m³)

c_p : calor específic (J/kg K)

$\rho \cdot c_p$: capacitat tèrmica volumètrica (J/m³k)

La propietat que indica la quantitat de calor que pot conservar un cos i la velocitat amb què la cedeix o absorbeix de l'entorn s'anomena *inèrcia tèrmica*. Per exemple, en una edifici que tingui una difusivitat baixa, l'evolució de temperatura serà més lenta i per tant tindrà una major inèrcia tèrmica

6.4.2 RADIACIÓ INFRAROJA

La radiació infraroja és un tipus de radiació tèrmica que pel seu rang de longitud d'ona no és visible al ull humà. La quantitat d'energia que radia un cos està directament relacionada amb la temperatura, per tant com més calent sigui el cos més energia radiarà. Si el cos emet més energia de la que absorbeix es considera un cos calent, essent aquest principi la base amb la que es va identificar originalment la radiació infraroja. Una de les característiques per la qual s'ha difós la seva aplicabilitat en diversos camps es que pot detectar-se òpticament amb l'ajuda d'equips tecnològics

sense entrar en contacte amb el cos o substància directament. Un instrument que permet aquesta visualització és la càmera termogràfica.

RADIACIÓ INCIDENT

La radiació incident és tota aquella radiació que arriba a un objecte des de qualsevol font del seu entorn. A la superfície d'un objecte hi poden arribar una o varies radiacions infraroges provinents de diferents fonts, una part d'aquesta energia és absorbida pel cos (W_a), una altre part és reflectida (W_p) per tant aquesta no afectarà a l'objecte, i la última part de l'energia és transmesa (W_T) i aquesta tampoc l'afecta. En conseqüència:

$$W_a + W_p + W_T = W \text{ incident}$$

Les proporcions d'aquestes parts dependrà de l'emissivitat tal i com s'ha expressat a l'apartat 4.2.1 *Llei de Kirchhoff*.

RADIACIÓ SORTINT

La radiació sortint és aquella que abandona la superfície d'un objecte, al marge de quina sigui la seva font original.

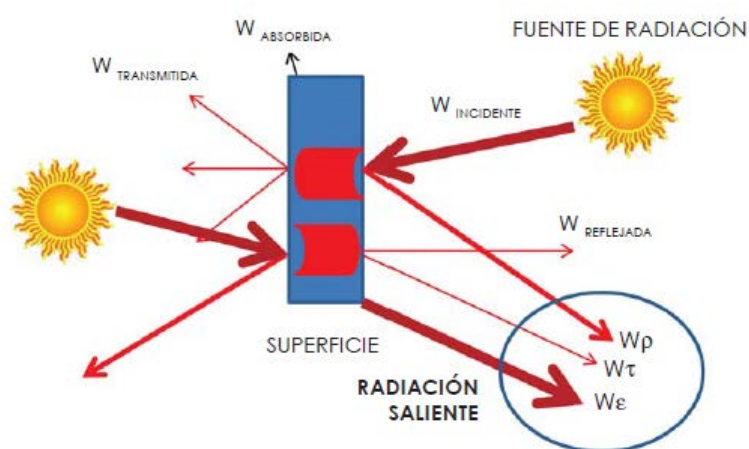
Quan es realitza un estudi termogràfic la radiació sortint és la que s'analitza amb la càmera termogràfica. Aquesta energia infraroja està composta per tres tipus de radiacions però la més important per la termografia és la emissivitat (ϵ), la capacitat que té un determinat cos per emetre la seva pròpia energia en forma de radiació. Encara que normalment en els esquemes aquesta energia és grafia amb una única fletxa, el cos emet energia en totes direcció, és per això que es pot realitzar una termografia des de molts angles diferents.

Cal dir però, que la quantitat d'energia que emeti un cos dependrà de la seva temperatura, i de la seva emissivitat. A major temperatura major radiació emet i també a major emissivitat més radiació emet. Encara que la temperatura de dos cossos sigui diferent, el que tingui una emissivitat més elevada serà el que irradiarà més, per tant, a la càmera es veurà de diferent color. En conclusió, els factors temperatura i emissivitat són els que determinen la *potència de radiació* d'un cos.

Las altres dues fonts de radiació sortints són la radiació reflectida d'altres fonts i la transmesa a través de l'objecte i que prové també d'altres fonts externes. Aquestes dues variables no depenen

de la temperatura pròpia del cos que s'estudia, sinó de les emissivitats de les altres fonts de transmissió i reflexió. Per altra banda també dependrà de la reflectivitat i la transmissivitat del cos. En resum, part de la radiació sortint d'un cos provindrà de la radiació emesa pel propi cos de la reflectida de qualsevol font propera a l'element que s'estudia i de la transmesa de fonts que estan darrera o en contacte amb el cos.

$$W_{\varepsilon} + W_{\rho} + W_T = W_{\text{sortint}}$$



14. Esquema radiació infraroja sortint d'un cos.
Font: Guia de la Termografia Infraroja Fenercom. 2011

7. APLICACIONS DE LA TERMOGRAFIA

Actualment és molt complicat determinar amb exactitud quants camps d'aplicació té la termografia. La tècnica bàsica és un procés molt senzill, donat que consisteix en veure l'escalfament dels cossos, no presenta límits d'aplicació i per aquest motiu es troba present en disciplines ben variades. És cert però, que en alguns camps s'ha desenvolupat més i els processos estan més estandarditzats.

A continuació es fa referència a algunes de les aplicacions de la termografia, s'analitzaran amb més profunditat les que es troben lligades amb el camp de l'edificació.

- Recerca i rescat

Donat que els humans presenten un excel·lent contrast tèrmic en la majoria d'escenaris, és molt fàcil detectar la presència d'alguna persona a través de les imatges termogràfiques. Aquests sistema pot facilitar molt les tasques de rescat de persones en boscos, rius, muntanyes, enderrocs, pous, mines, en restes de catàstrofes aèries, etc.

- Medi ambient

Tot i que les tasques de termografia relacionades amb el medi ambient es solen realitzar des de satèl·lits o avionetes, també es poden dur a terme amb equips a peu de terreny. Les aplicacions d'aquest sistema en aquest camp també són molt amplies, per exemple, control de contaminació d'aigua, control de desforestació, meteorologia, temperatura de mars i oceans, etc.

- Agricultura i geologia

En aquesta camps d'aplicació les termografies es realitzen a través de satèl·lits o vols de baixa alçada, les imatges que proporcionen permeten conèixer el terreny amb més profunditat. La reflexió i emissió de radiació dels sòls, està influenciada pel contingut de minerals, químics, humitat, estructura, i grandària de les partícules i del contingut orgànic. Els minerals i les plantes emeten energia en rangs diferents en l'infraroig tèrmic i també reflecteixin de manera diferent. Per tant doncs les aplicacions en aquest camp són moltes i la termografia permet obtenir molta informació dels sòls, entre d'altres l'absorció de clorofil·la, l'anàlisi de la distribució de la irrigació de l'aigua i de l'estat de la vegetació, cartografia de les costes, de les zones geològiques i dels límits terra-aigua, comptabilitat d'animals, determinació d'estructures de sòls regionals i de la humitat de vegetació i sòl, determinació de les condicions del sòl, localització i seguiment de fonts geotèrmiques i erupcions volcàniques i avaluació de l'impacte de sequeres i evolució de la collita i productivitat.

- Control de plagues

A través de les ones infraroges detectades per les càmeres termogràfiques es poden localitzar les galeries que deixen els diferents animals en els seus medis, com per exemple les termites en la fusta. També es poden trobar on habiten alguns animals ja que aquests tindran una temperatura diferent a la del medi en que viuen.

- Medicina i veterinària

En els darrers 20 anys s'ha desenvolupat la termografia en el camp de la medicina. La termografia té una gran aplicació ja que normalment tot allò del cos humà que no es troba en un estat òptim presenta una temperatura més elevada que la resta del cos, ja sigui en el sistema vascular, muscular, nerviós i ossi. Aquests coneixements també s'han aplicat a la veterinària. Algunes de les aplicacions mèdiques més desenvolupades són estudis d'oncologia, disfuncions respiratòries, desordres digestius, desordres cardiovasculars i circulatoris, disfuncions del sistema limfàtic, etc.

En els darrers temps degut a la proliferació de les epidèmies mèdiques en països subdesenvolupats s'ha utilitzat càmeres termogràfiques per estudiar la població, en moltes malalties d'aquests tipus un dels símptomes comuns és la febre. Les càmeres termogràfiques permeten detectar canvis de temperatura del cos humà i per tant conèixer si la població està afectada. Aquest sistema és molt utilitzat donat que les càmeres termogràfiques són de fàcil maneig.

- Anàlisis mecànics

Les aplicacions en la mecànica dels materials és molt amplia, podem utilitzar les imatges termogràfiques per analitzar molts processos, per exemple, quan un cos sòlid està sotmès a càrregues pot augmentar o disminuir de temperatura lleugerament depenent de si les tensions que se li aplica són a tracció o compressió, tot i que aquests canvis de temperatura són molt petits, la càmera termogràfica és capaç de detectar-ho.

La termografia es pot aplicar també a l'observació d'engranatges, assajos, observació de comportament d'estructures metàl·liques, monitoritzar bieles de motors, estudi de soldadures, entre altres moltes aplicacions.

- Electricitat

Aquesta és una de les aplicacions més populars de la termografia, generalment els problemes elèctrics estan lligats en a problemes tèrmics o canvis de temperatura de part o totalitat de les instal·lacions elèctriques. Aplicant la termografia és pot detectar si alguna instal·lació presenta una

patologia i solucionar el problema abans que succeeixi un fallo greu. Als darrers anys s'ha desenvolupat aquest sistema de detecció de problemes tant en instal·lacions d'alta tensió com mitja o baixa tensió. El sistema d'imatges termogràfiques pot detectar diferents patologies, però se'n destaquen les aplicacions per la comprovació de sistemes i elements d'instal·lacions com relés, transformadors, resistències, fusibles, caixes de connexions, i/o diferencials, entre altres. Aquest sistema presenta el gran avantatge de que no cal estar en contacte amb l'anomalia per detectar-la i així mantenir la seguretat de qui està inspeccionant el problema.

- Mecànica

En el sector de la mecànica la termografia té una aportació molt important, ja que pot detectar problemes i/o reduir costos en processos industrials i comercials. Tots els equips mecànics tenen un límit en la seva temperatura operacional, estar per sobre o per sota d'aquests límits podria indicar alguna errada del sistema o pèrdua econòmica, la termografia permet conèixer la temperatura quan el sistema està en servei o en operació, aquest fet permet controlar qualsevol incidència sense haver de parar cap procés. Es poden analitzar diferents equips com motors, sistemes elèctrics, bombes, etc, per tant les imatges infraroges permeten realitzar un manteniment preventiu de plantes i màquines mentre estan en funcionament, comprovació de motors, coixinets, bombes i eixos, monitoritzar aïllaments, comprovació de problemes de fricció, etc.

- Automoció

En el sector de l'automoció la termografia també té moltes aplicacions. Aquest sistema pot permetre comprovar les temperatures dels discos després d'una frenada, distribucions de calefacció de l'espai interior dels vehicles o dels seients, comprovació dels aïllaments, anàlisis de de l'escalfament de les rodes, etc.

També es pot utilitzar aquest procés en accidents de transit ja que en el moment en que els vehicles frenen creen un fregament amb l'asfalt i això provoca escalfor, d'aquesta manera es pot detectar com han succeït els accidents.

- Seguretat i vigilància

Degut que els darrers anys la termografia ha reduït molt el seu preu ha permès la popularització d'aquests sistema. En molts casos aquests sistema s'ha instal·lat per millorar la vigilància, les càmeres termogràfiques són més efectives ja que permeten visualitzar cossos tan de dia com de nit, a més a més és molt senzill detectar aquests cossos ja que normalment la temperatura corporal

és de 36.6°C (309.76°K) i per contra la temperatura mitjana de la terra és de 14.84°C (288°K) de mitjana tant de dia com de nit.

Aquest camp també té una gran importància dins del sector militar, aquest sector disposa de grans avenços tecnològics, ja que són els que tradicionalment han investigat més sobre la tecnologia infraroja.

- Detecció de gasos

La càmera infraroja permet detectar fins a 80 tipus de gasos diferents entre ells el butà, el diòxid de sulfur, el propà. etc. Aquesta aplicació té molts avantatges en procés d'emergència ja que en permet la detecció sense haver d'acostar-se als gasos o la font de la fuga.

- Edificació

En els darrers anys s'ha desenvolupat l'aplicació de la termografia en l'estudi de diferents elements de les edificacions. Aquest sistema es pot realitzar tant en edificis d'obra nova per a comprovacions de que el conjunt s'ha executat correctament, com en edificis antics per tal de detectar patologies, problemes en les instal·lacions, manca de aïllament, etc, també s'està obrint un gran camp d'aplicació en tasques de restauració de patrimoni, camp subjecte d'estudi en aquest document. Els diferents anàlisis que es poden dur a terme amb les càmeres termogràfiques en les edificacions són per exemple:

- estudi de l'eficiència energètica dels tancaments
- localització de ponts tèrmics
- comprovació d'aïllaments
- detecció de fugites de canonades de calefacció
- localització de l'entramat de les canonades en parets o terres radiants
- establiment dels danys per humitat
- valoració dels riscos per condensació
- monitorització de l'assecat dels materials de construcció
- localització de zones on hi ha humitat
- estudis en obres civils

8. TIPUS DE TERMOGRAFIA

Avui en dia es coneixen dos sistemes diferents de termografia. Es tracten de la termografia passiva i l'activa, la primera s'utilitza quan els cossos sotmesos a estudi produeixen el seu propi flux de calor per tant, aquests se'ls considera cossos tèrmicament actius. El segon sistema, la termografia activa, s'aplicarà en aquells cossos que necessitin una font de calor o refredament per generar flux de calor, aquests elements es consideren cossos tèrmicament passius.

Pel sistema de termografia activa hi ha diferents metodologies d'aplicació en funció del tipus d'element que s'estigui estudiant o dependent del que es necessiti trobar en les inspeccions. A continuació s'especifiquen els diferents tipus de termografia.

8.1 TERMOGRAFIA PASSIVA (P)

Aquest tipus de termografia és la més senzilla. Estarem parlant de termografia passiva en aquells casos en que l'aplicació de la termografia no requereix cap estímul extern d'escalfament o refredament per tal de provocar un flux de calor en el cos sotmès a inspecció. En la termografia infraroja passiva, els perfils anormals de temperatura indiquen un problema probable. Per realitzar-ho es pren un punt de referència, aquest es considera delta-T (ΔT), els valors que apareixen majors de 4° C aproximadament, al punt de referència es consideren evidències importants d'un comportament anormal de l'objecte sotmès a estudi.

Generalment, la termografia passiva es considera una anàlisi més aviat qualitatiu ja que l'objectiu d'aquest és simplement identificar anomalies. No obstant això, algunes investigacions han proporcionat mesures quantitatives si el model tèrmic és correcte, de manera que les temperatures de superfície mesurades poden estar relacionades amb comportaments específics o defectes superficials.

8.2 TERMOGRAFIA ACTIVA (A)

La termografia activa és aquella termografia que utilitza un font externa per atreure energia a l'element estudiat, provocant així un flux de calor intern que té la finalitat d'obtenir diferències de temperatura significatives. Aquestes diferències de temperatura poden captar defectes superficials i subsuperficials, ja que la presència d'aquests a l'interior del objecte modifiquen la seva difusió tèrmica fent aparèixer contrastos en l'àrea no afectada que les envolta.

Quan s'està fent un estudi de termografia d'un edifici des de l'exterior, es pot parlar de termografia activa encara que no s'hi apliqui cap font externa explícita, en aquesta cas la variabilitat de la temperatura exterior i la influència del sol ja provoquen diferències de temperatura a la superfície de l'edifici. És per aquest motiu que caldrà determinar molt bé quina hora és la més convenient per fer termografies de façana, depenent del que s'estigui buscant serà adequat o no que hi hagi tocat el sol. Caldrà analitzar cada cas.

8.2.1 TERMOGRAFIA ACTIVA POLSOS (*PULSED THERMOGRAPHY*) A-PT

La termografia activa per polsos és la més comuna en estimulació tèrmica degut a la seva aplicació senzilla i la ràpida inspecció. Aquesta tècnica consisteix en utilitzar un escalfament polsat curt i intens sobre l'element inspeccionat per després mesurar els descens de la temperatura. S'ha de tenir en compte no sotmetre l'objecte a llargues exposicions de calor i evitar que s'arribi a temperatures molt elevades, ja que en el cas que passes això, es podria provocar lesions sobre la superfície de l'objecte sotmès a estudi.

8.2.2 TERMOGRAFIA PER POLSOS LLARGS (*STEP HEATING*) A-SH

En aquest mètode l'element que es vol estudiar es sotmet a un escalfament continu i prolongat de baixa potència o intensitat. A diferència de la resta de mètodes, com el polsat curt, la importància recau en mesurar el procés d'escalfament i no la fase de refredament de l'objecte estudiat.

8.2.3 TERMOGRAFIA MODULADA (*LOCK-IN THERMOGRAPHY*) A-LT

La termografia modulada és aquella en que l'objecte a examinar es sotmès a un escalfament sinusoidal per generar ones tèrmiques en l'interior de la peça, en el cas que existeixin defectes

interns, causen alteracions en les ones. Per tal de que això succeeixi amb èxit es sincronitza la senyal d'entrada que alimenta les ones de calor amb la senyal de sortida que proporcionen les càmeres termogràfiques, aquesta monitorització es realitza mitjançant un ordinador.

8.2.4 VIBROTERMOGRAFIA

La vibrotermografia és una tècnica de termografia activa basada en el principi de que sota vibracions mecàniques induïdes externament a l'element, la calor és alliberada per friccions just en els punts on l'objecte presenta defectes en la continuïtat del material com esquerdes, forats, etc.

A la taula que es mostra a continuació s'especifiquen els tipus de termografia que s'apliquen en funció del sector on s'estigui aplicant la termografia i del tipus d'anomalia que s'estigui inspeccionant.

APLICACIONS		PROCEDIMENT*
EDIFICACIÓ		
	Parets, evolució d'humitats, sostres, materials ocults, esquerdes, etc.	P
	Aigua estancada, presència d'aigua.	A-PT
COMPONENTS I PROCESSOS		
	Eficiència de sistema de frens d'automòbils, dissipació de calor de mòduls electrònics, identificacions en el procés de reciclatge, control procés de soldadura, indústria del vidre (ampolles, bombetes, etc.), indústria del metall, etc.	P
	Inspecció de components estructurals d'aeronaus, control qualitat soldadura dels components electrònics, inspecció de soldadures per punts.	A-PT
DETECCIÓ DE DEFECTES I CARACTERITZACIÓ		
	Corrosió al metall, detecció d'esquerdes, despreniment, danys per impacte en plàstic reforçat amb fibra de carboni, àleps de la turbina, caracterització de defectes no superficials en materials compostos, fusta, metall i plàstic (profunditat, mida, propietats, etc).	A-PT
	Defectes d'adherència i juntes de solapament en les soldadures per punts.	A-SH
	Identificació d'esquerdes, de despreniments, i danys per impacte.	A-LT
	Caracterització del desgast de recobriments, proves de fatiga, detecció d'esquerdes tancades.	A-VT

MANTENIMENT		
	Rodaments, compressors, canonades, revestiments refractaris, forns giratoris, àleps de turbina, instal·lacions elèctriques, fuites de gas, etc.	P
MEDICINA I VETERINÀRIA		
	Angiografies coronaries tèrmiques, reaccions al·lèrgiques, tumors de mama humans, reumatologia, trastorns neuromusculars, lesions de teixits tous.	P
	Control flux dels vasos sanguinis.	A-LT
PROPIETATS		
	Gruix de l'esmalt en ceràmiques, investigacions en assaig d'aixafament.	P
	Propietats, de diferents aliatges de recobriment d'acer, humitats, caracterització de material anisòtrop.	A-PT
	Mesurament de la conductivitat tèrmica.	A-SH
	Força d'adhesió de materials, caracterització de materials anisòtrops, espessor de recobriments en ceràmiques, perfil de profunditat de la conductivitat tèrmica o difusió, humitat, etc.	A-LT
SERVEI PÚBLIC		
	Detecció de foc forestal, localització de persones de nit o en focs, monitorització del transit de carreteres, detecció de blancs (militar).	P

9. LA CÀMERA TERMOGRÀFICA

La càmera termogràfica és un instrument capaç de convertir una distribució especial de radiació tèrmica, canviar una senyal d'ona infraroja del espectre electromagnètic invisible per l'ull humà, en senyals elèctriques computeritzables, "píxels", generant una imatge visible.

En les mesures realitzades amb la càmera hi intervenen dos paràmetres, la emissivitat i la temperatura (ja descrites anteriorment). Per poder realitzar mesures quantitatives és necessari conèixer prèviament una de les dues, sabent un d'aquests dos valors en podem conèixer l'altre. Cal deixar clar que l'aparell és menys fiable a l'hora de realitzar mesures d'emissivitat ja que l'error d'aquest valor pot arribar a ser de fins al 30 %, mentre que quan es realitzen mesures de temperatura l'error màxim que podem tenir està al voltant del 5 %.

La termografia infraroja ens pot aportar informació sobre les capes més superficials del material o element sotmès a estudi. En alguns casos, quan la radiació incident sobre el cos està reforçada per una longitud d'ona determinada, la radiació electromagnètica és capaç de penetrar en un cert gruix i reflectir-se en una capa d'una determinada profunditat. Som capaços de conèixer el que passa darrera dels materials superficials gràcies a la radiació reflectida recollida amb la càmera.

FUNCIONAMENT

Bàsicament, l'òptica de la càmera termogràfica fa convergir sobre el seu detector la radiació infraroja que emet l'objecte sotmès a estudi, obtenint així una resposta (canvi de tensió o resistència elèctrica) que serà llegida per uns elements electrònics (la placa electrònica) de la càmera. Aquesta senyal electrònica és convertida en una imatge electrònica en una pantalla, on les diferents tonalitats de colors corresponen amb diferents senyals de radiació infraroja procedents de l'element que s'analitza.

SENSIBILITAT I RESOLUCIÓ

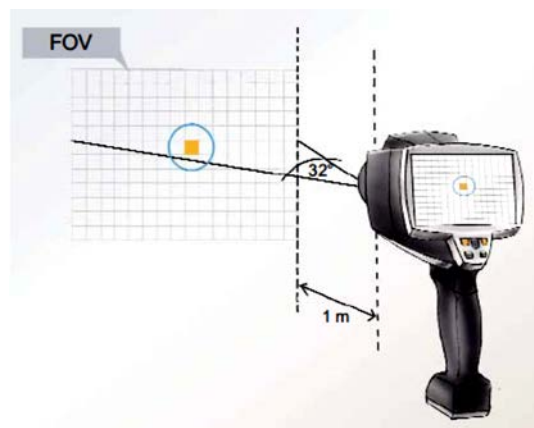
La resolució visual afecta a la claredat amb la que es poden veure els components o elements quan s'estudien. Sovint, quan es vol diagnosticar un problema, cal distingir el causant d'entre dos o més fonts de possibles problemes, amb la màxima precisió possible encara que hi hagin molts elements pròxims. Com més clar es pugui veure cada element a través de la imatge més fàcilment es podrà distingir la font del problema.

Aquest fet en termografia dependrà de diferents factors com el disseny del detector, el número de píxels que sigui capaç de generar la imatge i de la qualitat de la òptica utilitzada.

Al mercat existeixen diferents càmeres termogràfiques amb més o menys píxels, tot i que es poden trobar càmeres de fins a 307.200 píxels, cal deixar clar que la visió de les imatges termogràfiques mai serà amb tanta resolució com amb una càmera digital.

A banda dels píxels, hi ha diferents elements de les càmeres que influeixen en la resolució i en la sensibilitat, aquest elements són el FOV i el IFOV.

- PÍXEL: El píxel és la menor unitat homogènia en color que forma part d'una imatge digital, en termografia serà doncs la menor unitat que pot detectar energia infraroja.
- FOV: (*Field Of View, camp de visió*) El FOW determina l'angle horitzontal visible a través d'una lent d'infrarojos.



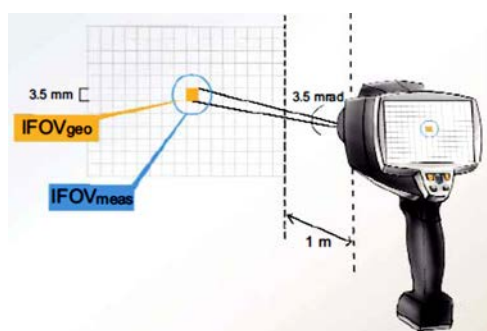
15. Esquema FOV .

Font: Guia Termografia de Testo, 2008

- IFOV (*Instantaneous Field Of View, camp de visió instantani*) El IFOW és la mesura de la resolució geomètrica d'una càmera d'infrarojos. Aquest element determina la dimensió del píxel en la imatge, però no és la dimensió del detector el que determinarà la resolució de la càmera, sinó que és la distància entre cada punt mesurat per cada detector.
 - IFOVgeo *resolució geomètrica*: objecte identificable més petit a través d'una lent infraroja. Aquesta especificació, estableix la grandària d'un píxel segons la distància, és a dir, mesura la resolució geomètrica d'una càmera infraroja. Així doncs, si l'IFOV és gran, però el cos que es mesura és molt petit, pot ser que no es generi una senyal

suficientment forta al incidir la radiació sobre el detector i que no es vegi el cos. Això també dependrà de la temperatura del cos, si la seva temperatura és molt elevada, pot ser que si que generi aquest senyal.

- IFOV_{meas} (*Measured Instantaneous Field of View*): és la designació de l'objecte més petit el qual la seva temperatura es pot mesurar de forma precisa amb una càmera termogràfica. A aquest concepte també se'l pot denominar com a marca de mesura.



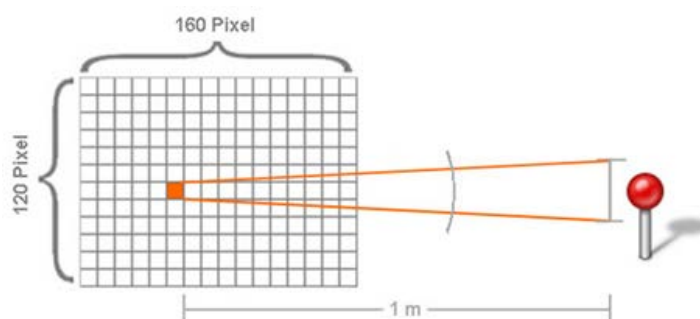
16. Esquema FOV i IFOV.

Font: Guia Termografia de Testo, 2008

Per tant caldrà tenir especial atenció quan es vulgui mesurar la temperatura d'un cos petit. Pot ser que l'objecte no quedi completament dins d'un píxel i que per tant la temperatura que estigui indicant la càmera termogràfica sigui una mitjana del diferents valors que percep.

➤ Exemple d'objecte mesurat

Es col·loca un cap d'agulla davant d'una paret, a un metre de distància de l'objectiu de la càmera i és considera aquest cap d'agulla com l'objecte visible més petit que pot mesurar la càmera termogràfica.



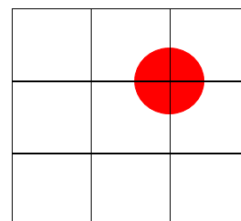
17. Esquema IFOV.

Font: Guia Termografia de Testo, 2008

Cas real

El cap de l'agulla només omple part del píxel/bolòmetre del detector.

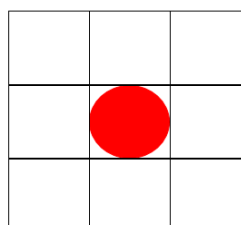
Conseqüentment, la temperatura mesurada per la càmera termogràfica no correspon ni amb la temperatura de l'agulla ni amb la de la paret sinó amb la mitjana de totes les temperatures detectades



Cas ideal:

L'objecte mesurat, en aquest cas el cap de l'agulla omple completament un píxel del detector.

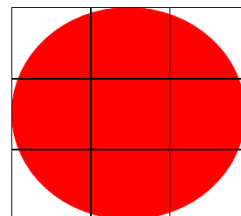
La temperatura mesurada pel bolòmetre de la càmera termogràfica és molt pròxima a la temperatura real de l'agulla.



Regla general

$IFOV_{meas} = 3 \times IFOV$

Només si un cos és tres vegades major que la dimensió de l'objecte visible més petit, un píxel del detector queda cobert per complert. En aquest píxel es detecta la temperatura real de l'objecte mesurat.



18. Esquemes del l'objecte mesurat respecte la seva posició amb el píxels.

Font: Idòia Torrent

10. APLICACIONS DE LA TERMOGRAFIA INFRAROJA EN L'ESTUDI DEL PATRIMONI ARQUITECTONIC

En el moment en que s'inicien les activitats de restauració d'un monument es de vital importància conèixer les causes que han fet que l'edificació o el monument arribes a l'estat de degradació en que es troba, així com tots els processos o actuacions que ha seguit des de la seva existència. Conèixer i haver estudiat aquests factors ens ajudaran a interpretar els resultats de les imatges termogràfiques i per tant obtenir resultats més concrets i determinants.

Quan es realitza una termografia inicial per estudiar-ne l'estat de conservació i el grau cal tenir clar que es tracta de primers resultats i que per tant no seran concloents, si que ens ajudaran a establir una línia d'actuació però caldrà realitzar estudis paral·lels per contrastar la informació.

En el procés de l'estudi de l'estat de conservació d'un edifici històric, i especialment en aquells de caràcter monumental, cal que es realitzin estudis exhaustius que determinin, tan les propietats físiques i químiques dels materials utilitzats en la construcció, com el seu estat d'alteració. En aquest context, les diferents tècniques d'anàlisi no destructiu juguen un paper molt important pels seus avantatges evidents, i en alguns casos, poden arribar a constituir un mètode de diagnòstic ràpid.

- Establiment de la cronologia de les diferents fases constructives, permet diferenciar portes i finestres tapiades o obertes posteriorment, la estructura dels murs, els diferents materials emprats, etc.
- Localitzar el pas de diferents canalitzacions i vies de servei.
- Detectar la presència d'humitats o problemes de capil·laritat.
- Anàlisi d'irregularitats sota estucats o frescos. Heterogeneïtats constructives.

10.1 CONDICIONANTS

Quan es vol realitzar un estudi termogràfic a un element o a un conjunt d'elements s'han de tenir en compte diferents factors que poden influir en la presa de dades amb la càmera termogràfica. Aquests factors poden ser característiques del mateix objecte o factors externs que ens poden influenciar a l'emissivitat del material i per tant modificar les temperatures obtingudes o directament modificar les temperatures de la superfície dels materials. No tenir en compte aquestes modificacions podria proporcionar una lectura errònia i conseqüentment un error en l'estudi realitzat.

Durant les inspeccions termogràfiques l'entorn està en constant canvi, entre el cos a mesurar i la càmera, existeix una certa quantitat d'aire, aquest influeix en les mesures. Aquest espai d'aire conté diferents elements que emeten radiació cap a ell, això es reflectirà cap a la càmera.

A continuació s'especifiquen els factors que poden condicionar la presa de dades i d'imatges amb la càmera termogràfica.

OBJECTE MESURAT

- El color del material

Les superfícies que presenten colors més foscos, absorbeixen més radiació infraroja d'ona curta que les superfícies amb colors més clars, per tant, els colors més foscos s'escalfen més ràpid. Tot i això, la radiació infraroja emesa, depèn de la temperatura i no del color de la superfície de l'objecte a mesurar, és a dir, el color tindrà afectació en l'absorció de calor però no l'alliberament.

- La superfície del material

Aquest factor sí que presenta influència en la mesura de temperatura amb càmeres termogràfiques, ja que l'emissivitat del material varia segons el grau de rugositat de la superfície del material. Generalment, la emissivitat en les superfícies lises, brillants, reflectants i polides, és més baixa que en les superfícies mat, quartejades, rugoses, erosionades i ratllades; per tant, en els cossos en que la emissivitat és més baixa emeten menys energia infraroja que els cossos amb índex d'emissivitat elevat.

- Emissivitat del material

Cada material té una valor d'emissivitat específic, a partir d'aquest valor es deriva la quantitat de radiació infraroja que emet i que per tant és capaç de llegir la càmera termogràfica. L'emissivitat estarà subjecte a les dues propietats anteriors, color, superfície i al tipus de material.

FACTORS EXTERNNS

- Brutícia i partícules en la superfície

El fet que l'objecte que es vulgui termografiar estigui cobert de brutícia o de pols pot complicar la lectura i la precisió de l'obtenció de dades ja que aquests elements (lubricants, olis, grassa, pols, etc.) tenen una emissivitat diferent. s'haurà de tenir en compte ja que ens poden estar donant resultats erronis.

- Humitat, neu i gelbre a la superfície del material

L'aigua, la neu i la gelbre tenen unes emissivitats relativament altes (valors d'entre $0.85 < \epsilon < 0.96$ aproximadament) fet que proporciona lectures de rajos infrarojos de valors elevats i sense complicacions. S'ha de tenir en compte però, que el fet que hi hagi algun d'aquests elements interferint amb el material que volem sotmetre a estudi, s'haurà de considerar en la lectura dels valors obtinguts. La humitat refreda la superfície de l'objecte degut a l'evaporació, i la neu té una gran capacitat aïllant. Normalment, la gelbre no és aïllant, i per tant se'n haurà de conèixer l'emissivitat per tal d'estudiar-ne la interacció amb l'emissivitat del material que s'estudia i que està cobert de gelbre.

- L'angle d'obtenció d'imatges

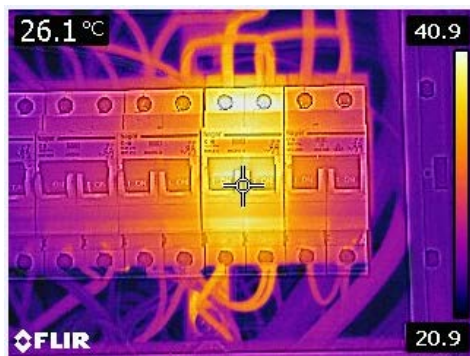
Com ja s'ha explicat anteriorment, l'angle d'incidència de les observacions realitzades a través de càmera poden modificar la presa de dades i obtenir valors irreal. L'emissivitat dels materials varia en funció de la direcció en que emeten podent arribar a ser nul·la per alguns angles d'observació. El paràmetre de l'emissivitat decreix en augmentar l'angle d'observació de manera proporcional.

- La radiació

Tot objecte amb una temperatura superior als 0°C emet radiació infraroja. Per aquest motiu, els objectes propers a l'objecte a mesurar amb gran diferència de temperatura, poden alterar la mesura de l'energia infraroja com a resultat de la seva pròpia radiació. En aquests casos, cal evitar que aquestes fonts d'energia interfereixin en el cos sotmès a estudi, es poden col·locar pantalles que els

aïlli (cartrons, teles, etc.) per tal de minimitzar la seva incidència. En el cas que no es pugui evitar, caldrà tenir en compte que la temperatura reflectida no es correspon a la temperatura ambiental.

En la imatge següent, es mostra com un diferencial està sobreescalfat, es diferencia del voltant també mostren temperatura però és degut a les radiacions tèrmiques que genera el diferencial malmès.



19. Imatge d'una caixa de diferencials on n'hi apareix un sobreescalfat.

Font: Idòia Torrent

- La temperatura ambient

En molts casos, la temperatura reflectida correspon a la temperatura ambient, la qual es pot mesurar amb un termòmetre específic. Quan hi hagi una gran diferència de temperatura entre la del objecte a mesurar i la temperatura ambient, és important ajustar correctament la emissivitat.

- La radiació celestial

La radiació infraroja emesa en un dia sense núvols es denomina col·loquialment *radiació celestial freda difusa*. Si el cel està ras i per tant no hi ha núvols, la radiació (entre -50 a -60°C) i la llum solar (aproximadament de 5500°C) es reflecteixen durant el dia. L'àrea del cel supera en extensió l'àrea del sol, això comporta que la temperatura reflectida en la termografia d'exteriors sempre surti amb valors negatius. En dies de molt de sol, la temperatura reflectida tindrà valors molt per sota dels 0°C en canvi en dies on hi ha presència de núvols la temperatura reflectida apareix amb valors més suaus. Els objectes emmagatzemen calor com a resultat de l'absorció dels rajos del sol, fet que afecta a la temperatura de la superfície, en alguns casos fins a hores després de l'exposició al sol.

- Els núvols

Les condicions ideals per mesurar temperatures a partir de termografies exteriors, és en els dies que hi ha núvols, ja que la capa de núvols evita que els objectes es vegin afectats pels rajos solars i la radiació celestial difusa freda. En el cas que es vulguin realitzar termografies per detectar diferents elements i que no sigui imprescindible determinar la temperatura exacta, serà interessant realitzar les imatges en dies en els que el sol hagi tingut incidència sobre ells. D'aquesta manera es destacaran visualment, en les imatges infraroges, els elements i materials segons la seva inèrcia tèrmica.

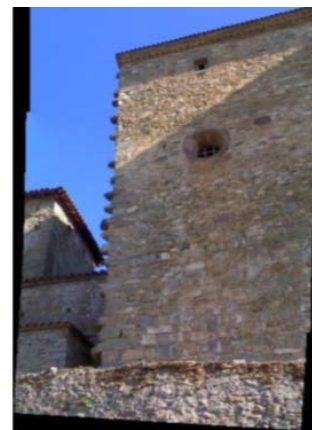
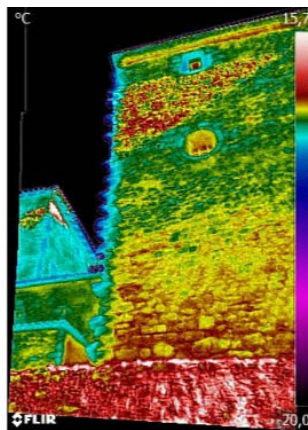
- Les precipitacions

Una forta precipitació pot distorsionar els resultats de les mesures. L'aigua i els seus derivats d'estat (gel, neu, vapor, etc.) tenen una alta emissivitat i per tant, són impermeables a la radiació infraroja. A més quan es mesuren objectes mullats els valors obtinguts són erronis, ja que la temperatura de la superfície de l'objecte es refreda a mesura que s'evapora l'aigua.

- El sol

En la presa d'imatges termogràfiques és recomanable evitar que la llum del sol incideixi directament a l'objecte ja que aquests poden emmagatzemar calor com a resultat de l'absorció dels rajos solars i alterar la temperatura. Per això, és recomanable realitzar els estudi a primera hora del matí o a última hora del dia.

En la imatge que es mostra a continuació es pot observar la incidència del sol a través de la termografia. A la imatge tèrmica es mostra una forma triangular a major temperatura que es podria detectar com una anomalia de la construcció, en canvi a la imatge digital es pot veure que es tracte d'una zona on hi insereixen els rajos solars.



20. Imatge façana Sud de l'església de Sant Julià de Vallfogona

Font: Idòia Torrent

- La humitat ambiental relativa

La humitat ambiental relativa ha de ser suficientment baixa per a que no hi hagi condensació a l'aire, o baf en l'objecte a mesurar, o inclús en l'objectiu de la càmera. En cas que hi hagi algun d'aquests fenòmens la temperatura que llegeix la càmera no seria la real, ja que els rajos infrarojos emesos per l'objecte no poden penetrar l'aigua o el vapor i per tant no poden arribar al sensor de la càmera.

Una boira carregada també afecta al mesurament perquè la rosada present en el canal de transmissió bloqueja part de la radiació infraroja.

- Els corrents d'aire

Qualsevol flux o corrent d'aire en un espai, afecta al mesurament de la temperatura. Com a resultat de l'intercanvi de calor (convecció), l'aire proper a la superfície té la mateixa temperatura que l'objecte mesurat. Si hi ha corrents d'aire, aquesta capa desapareix, substituïda per una altra capa, temperatura de la qual encara no s'ha adaptat a la de l'objecte. Per mitjà de la convecció, l'objecte mesurat desprèn o absorbeix calor fins que la temperatura de la seva superfície i la de l'aire han arribat a un equilibri (s'han igualat temperatures). L'efecte de l'intercanvi de calor s'incrementa com més gran és la diferència de temperatura entre la superfície de l'objecte a mesurar i la temperatura ambient.

- La contaminació

Tots els elements que es troben en suspensió a l'aire tenen influència en la lectura de la temperatura de l'element a estudiar. Les matèries que s'hi poden trobar com la pols, el fum, etc, tenen un índex d'emissivitat molt elevat i gairebé no permeten la transmissió, per tant es poden obtenir lectures errònies donat que la càmera pot estar llegint la temperatura dels elements suspesos a l'aire i no la temperatura que emet el cos. A més a més aquestes matèries absorbeixen i dispersen part de la radiació infraroja emesa per l'element que s'està estudiant, la qual cosa també fa variar significativament la temperatura de lectura.

- La llum

La llum solar o la il·luminació artificial no afecten significativament el mesurament a través de càmeres termogràfiques, fins i tot es poden obtenir imatges en la foscor, ja que la càmera crea les imatges a partir de la radiació infraroja i no a partir de la llum.

Tot i així, algunes fonts de llum calenta emeten radiació infraroja, aquestes poden influir en la temperatura de l'element que s'estudia si aquest es troba proper a la font. Alguns exemples són la incidència directa de la llum solar o també ho pot ser una bombeta calenta.

10.2 METODOLOGIA

Quan es realitza un estudi termogràfic hi ha diferents passos que caldrà seguir, sempre es prendran imatges seguint la següent metodologia. Establint aquest procés sempre s'obtidran les dades amb la màxima fiabilitat possible i seran comparables entre mostres obtingudes en diferents dies i/o situacions.

1. Establir la temperatura, humitat, i condicions climatològiques per a cada zona on es prenen imatges termogràfiques. Encara que sigui dins d'un mateix espai a cada espai on s'actua pot ser que hi hagi diferents condicions.
2. Selecció de les zones on s'ha de realitzar inspecció termogràfica. La selecció d'aquests serà considerant:
 - a. Grau d'alteració de l'element
 - b. Diferents característiques dels materials
 - c. Variabilitat en la ubicació (orientació, exposició, agents meteorològics, etc.)
3. Estudi dels factors que poden influenciar en la presa d'imatges, i anotar-los per tal de considerar-los en el moment de realitzar les imatges termogràfiques i/o tenir-los en compte en l'informe de l'estudi termogràfic.
4. Escombrat termogràfic amb registre digital pel posterior tractat d'imatges. Per realitzar les imatges termogràfiques hi ha diferents regles que cal respectar
 - a. Enfoc
Cal obtenir una bona imatge. Si està desenfocada, la imatge no serà nítida i no es podrà percebre correctament quins elements hi apareixen, per altra banda també pot ser que les temperatures no siguin correctes. En cas que la superfície que s'està estudiant sigui molt homogènia i presenti dificultats per enfocar, es pot col·locar un

objecte en el mateix pla del cos, enfocar la càmera i retirar l'objecte, d'aquesta manera la imatge continuarà estant ben enfocada.

b. Ajust tèrmic

Per defecte, moltes càmeres utilitzen un ajust tèrmic automàtic, és adequat utilitzar primer aquest sistema ja que ajusta els colors a les temperatures màximes i mínimes que apareixen dins de la imatge termogràfica. Després és convenient acabar d'ajustar l'escala tèrmica de manera que es ressaltin els elements que s'estiguin buscant amb la termografia.

c. Límit d'enfocament

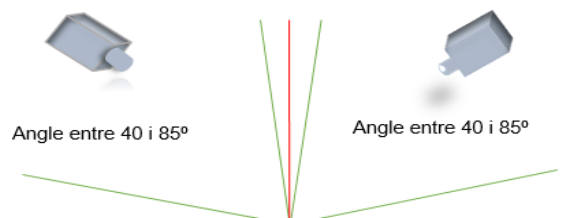
Com qualsevol dispositiu òptic, la càmera termogràfica té un límit de resolució. Utilitzant el punter que apareix a la pantalla es pot saber si s'està enfocant l'element que es vol estudiar. Per tal que la temperatura que dona la càmera sigui realment la que es vol conèixer, caldrà que tot el punter estigui completament dins del cos que s'estudia, en cas que no hi estigui, la càmera donarà una mitjana de les diferents temperatures que percep dins del punter.

d. Límit de resolució

El límit de resolució dependrà exclusivament de la dimensió del detector i de l'òptica de l'aparell. Com més gran sigui el nombre de píxels de la càmera (quadricula màxima comercialitzada, 640 x 480) més bona definició tindrà la imatge.

e. Angle de visió

Per realitzar una imatge termogràfica l'angle de visió no pot ser superior als 45° respecte la tangent. En cas que es prenguéssim una termografia amb un angle superior a aquest els valors d'emissivitat i de temperatura que estaria donant la càmera no serien valors exactes, i per conseqüència tampoc ho seria la imatge i els colors que hi apareixen.



21. Angles en els que és correcte realitzar les termografies

Font: Idòia Torrent

- f. Reflectivitat del termògraf
Quan el termògraf estigui prenent imatges cal que no es col·loqui de manera perpendicular a l'element que s'està estudiant ja que aquest podria reflectir la seva pròpia energia infraroja al cos.

 - g. Distància
En cada situació la distància mínima i màxima serà diferent. Donat que la termografia és un assaig no destructiu i que no emet cap element que sigui nociu, les imatges es poden prendre tan a prop com sigui necessari fins a un límit de 40 cm. Caldrà mantenir una distància de seguretat en cas que es tracti d'una zona perillosa o a prop d'un component elèctric amb càrrega. No hi ha cap limitació pel que fa a la distància màxima.
S'ha de tenir en compte a l'hora d'establir la distància que els objectius de les càmeres termogràfiques tenen una reducció de la imatge, és a dir que en el format digital s'estarien veient una sèrie d'elements però que en la imatge termogràfica l'enquadrament és més reduït. En objectius estàndards, la reducció normal és de 25° i en objectius de plans curts la reducció és de 45°.

 - h. Enfocar elements amb emissivitat elevada
Per tal de realitzar termografies sense complicacions es adequat mesurar la temperatura en zones o elements que tenen una emissivitat elevada, aquests poques vegades presenten problemes d'elements reflectits.
5. Tractament informàtic de les imatges per ressaltar i detectar irregularitats. És important tenir en compte que hi ha tres elements que no es poden modificar amb el tractament informàtic, aquests són:
- a. Enfoc: Si la imatge s'ha realitzat desenfocada ja no es podrà tornar a enfocar.

 - b. Rang: Indicar a la màquina entre quins valors es situaran aproximadament els valors màxims en que estarà treballant. En la majoria de situacions li podem indicar el rang 0-120°C a no ser que es necessitin lectures fora d'aquests valors.

c. Composició: Tirar a l'element tantes termografies com es cregui necessàries encara que es solapin, ja que posteriorment no se'n poden realitzar més en les mateixes condicions.

6. Si escau, realitzar un informe amb la informació obtinguda amb les imatges.

10.2.1 METODOLOGIA ESPECÍFICA EN PATRIMONI

En el cas que es realitzi un estudi termogràfic previ a una restauració o rehabilitació de patrimoni, caldrà conèixer la història de l'edifici i els seus antecedents, estudiar tota la documentació original que en sigui possible trobar, i analitzar l'estat de conservació dels materials que el componen, d'aquesta manera se'n podrà extreure més informació de les imatges tèrmiques.

Les patologies més significatives que pateixen els edificis històrics (com la formació d'eflorescències, descamació, polvorització, i alveolitzacions) requereixen un anàlisi que ha de començar amb un diagnòstic i estudi. Posteriorment, la termografia pot ajudar a detectar aquestes patologies, detectar el grau d'afectació i concretar les zones afectades. Per altra banda la termografia infraroja també pot ajudar a detectar i analitzar altres elements en els edificis, com elements ocults, canvis de materials, restauracions mal aplicades, etc.

En patrimoni caldrà triar quin tipus de termografia és la més indicada per a cada estudi. Generalment, s'utilitzarà la termografia passiva en les façanes i grans espais. En canvi, la termografia activa (mitjançant focus de llum) per estudiar elements de dimensions inferiors i quan s'estigui estudiant alguna patologia o element en concret.

11. RESUM ARTICLES

A continuació, es mostra un resum dels articles que han aportat informació bibliogràfica per a l'anàlisi dels estudis termogràfics realitzats. Aquests documents originàriament es troben redactats en altres llengües, anglès i castellà, per a la millor comprensió i estudi han estat traduïts al català. També cal tenir en compte que s'ha adjuntat només la informació relacionada amb la termografia i que no s'han redactat els articles complets. En els annexes es pot trobar l'article original.

Al final de cada resum dels documents, s'ha incorporat el punt "*idees principals*", on es pretén resumir la informació més significativa que ha aportat l'article.

11.1 A QUALITATIVE METHOD FOR COMBINING THERMAL IMPRINTS TO EMERGING WEAK POINTS OF ANCIENT WALL STRUCTURES BY PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY – A CASE STUDY ²¹

Document: Journal of Cultural Heritage 15 (2014) 199–202

Autor/s: *Fabio Bisegnaa, Dario Ambrosinib, Domenica Paolettib, Stefano Sfarrab, Franco Gugliermettia.*

- *SAPIENZA, University of Rome, Department of Astronautical, Electrical and Energetic Engineering, 18, Via Eudossiana, 00184 Rome, Italy*
- *University of L'Aquila, 18, Via G. Gronchi, 67100 L'Aquila, Italya*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

La termografia infraroja (TIR) en el diagnòstic d'edificis pot identificar anomalies que podrien passar desapercebudes i que podrien evolucionar i acabar ocasionant problemes més greus. Per això és una excel·lent eina que ajuda a identificar de manera ràpida els murs de maçoneria, permeten veure discontinuïtats, estructures o forats ocults, patrons d'esquerdes, falles estructurals, humitats i problemes derivats de les humitats. La TIR ofereix informació en la investigació de les estructures arquitectòniques on les restauracions i les intervencions mal executades podrien causar més danys, també aporta informació d'altres elements com pintures, mosaics, frescos, etc.

Aquest mètode és excel·lent en les investigacions a través de patrons tèrmics superficials: la temperatura que varia en l'espai i el temps pot revelar discontinuïtats sota la superfície, presència d'humitat, esquerdes o altres tipus de defectes. És per això que recentment s'ha començat a aplicar la TIR com a mètode per la detecció de danys provocats per terratrèmols en edificis històrics, a més, hi ha estudis que demostren que algunes esquerdes subsuperficials no detectades a simple vista poden ser vistes a través de la termografia.

²¹ Un mètode qualitatiu per combinar mapes tèrmics pels punts febles de les antigues estructures de la paret mitjançant termografia infraroja passiva – cas d'estudi – .

Per corroborar aquesta informació es va dur a terme un estudi termogràfic al poble de l'Aquila abans i després dels terratrèmols del 2009, fenomen que va ocasionar greus danys a diferents edificis. En el document es comparen les imatges obtingudes abans amb les imatges de després dels fets. Aquesta investigació va incloure un nombre relativament gran d'edificis històrics per tal de d'analitzar la potencialitat i els límits d'aquesta nova aplicació de la TIR.

2. Ubicació i característiques dels edificis històrics considerats en la investigació

Tots els edificis històrics considerats es troben a la població d'Aquila, la capital de la regió d'Abruzzo, al centre d'Itàlia. La zona és plena d'edificis històrics i monuments de diferents èpoques. A l'Abril del 2009, la zona es va veure afectada per un terratrèmol i la majoria d'aquestes estructures van patir danys greus.

Els cinc edificis estudiats són:

- Santa Maria ad cryptas, Fossa (AQ)
- Sant Silvestro, L'Aquila
- Santa Maria di Roio, L'Aquila
- Santa Giusta, Bazzano (AQ)
- San Domenico, L'Aquila

3. Materials i mètode

En aquest document es realitza una comparació qualitativa entre una anàlisi basada en l'observació a simple vista (abans i després del terratrèmol) i una observació a través de la termografia passiva (també realitzada abans i després).

L'anàlisi qualitatiu pot implicar l'observació directa de l'estructura per identificar l'estat de conservació i el dany, per determinar si els danys s'han estabilitzat i per decidir si hi ha riscos immediats i determinar les mesures d'actuació.

L'aplicació de la termografia en el diagnòstic d'edificis implica l'avaluació dels patrons tèrmics superficials: la variació de la temperatura en l'espai i el temps pot revelar discontinuïtats sota la superfície, les patologies modifiquen el flux de calor. Per tal de determinar amb precisió les patologies i identificar-les és important conèixer les característiques dels materials i les condicions de l'entorn.

Per a les façanes i els espais grans es dur a terme termografia passiva, mètode en que es prenen diverses imatges del mateix punt en diferents hores del dia (cicle tèrmic natural). En canvi, per les termografies d'elements interns o detalls es dur a terme la termografia activa, l'escalfament és realitza mitjançant làmpades.

Es va tenir especial atenció a la distància que hi havia entre l'element sotmès a estudi i la càmera termogràfica per tal de reduir al màxim els errors de lectura.

A partir d'una retícula es van dividir les façanes dels edificis en parts i se'n van prendre imatges termogràfiques, posteriorment mitjançant el software és van unir per tal d'obtenir una termografia de la façana completa.

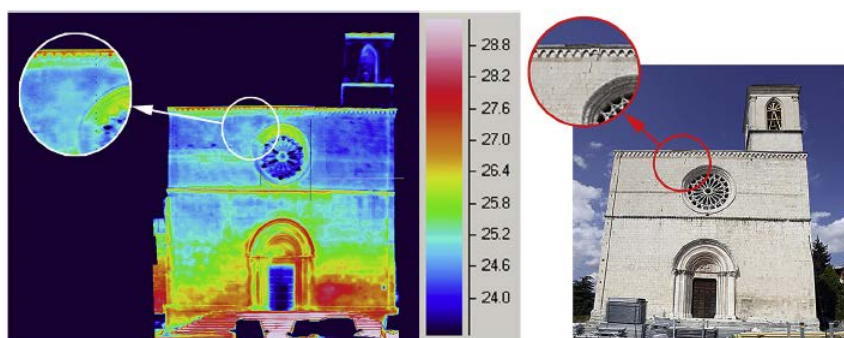
4. Els resultats experimentals

Tots els edificis van ser estudiats amb termografia entre els anys 2003 i 2008, van tornar a ser analitzats el 2009 després dels seisme.

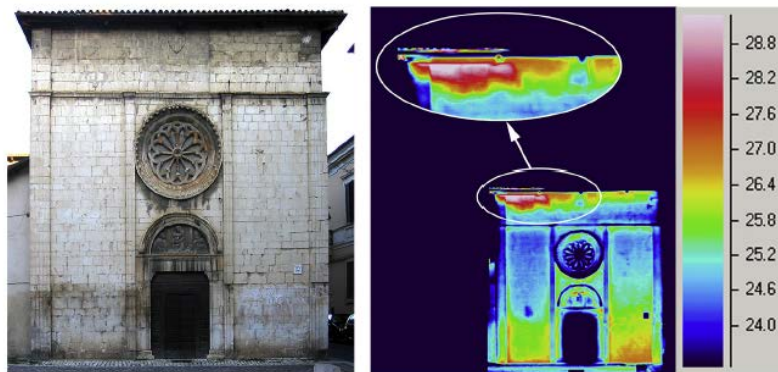
En les primeres termografies abans del terratrèmol es podien observar humitats per capil·laritat, inici de formació d'esquerdes, i manca d'homogeneïtat entre els diferents materials. En les imatges tèrmiques de després del sisme es podien detectar danys que requerien intervencions immediates degut a danys greus ocasionats en façanes i estructura que no eren visibles a simple vista.

Mitjançant la comparació de les imatges, es poden detectar:

- A Sant Silvestro, la bolcada de la part superior esquerra de la façana, així com també dany a la torre del campanar.



- A Santa Maria di Roio, els danys són evidents a la part superior esquerra.



- A Sant Giusta, el campanar es va estavellar tot el sostre, especialment prop de la finestra central. Aquesta termografia és particularment interessant ja que estudis de reconstrucció històrica van demostrar que hi havia hagut una remodelació substancial de la façana en la zona malmesa, amb una rosassa substituïda per la finestra principal.



- A Sant Domenico, es poden observar danys en l'entrada principal i en la part inferior de la façana. La comparació amb la imatge antiga permet veure com els danys de la part esquerra de la porta coincideixen amb una canvi de material (possible actuació de restauració).



5. Conclusions

En el diagnòstic d'edificis, o especialment en la intervenció de les estructures històriques, la TIR s'utilitza per a la identificació d'esquerdes, falles estructurals, humitats, problemes derivats de les humitats, etc

En aquest estudi, l'anàlisi va mostrar que els danys es van produir després del terratrèmol, ja que els mapes tèrmics de les façanes no es corresponen els d'abans amb els de després. El document justifica la importància de l'aplicació de la termografia en estudis per l'avaluació dels danys ocasionats per seismes.

IDEES PRINCIPALS:

- Aquest mètode és excel·lent en les investigacions a través de patrons tèrmics superficials: la temperatura que varia en l'espai i el temps pot revelar discontinuïtats sota la superfície, presència d'humitat, esquerdes o altres tipus de defectes
- A partir de les termografies es pot valorar la gravetat de la patologia (esquerdes, fissures, desprendiments, etc) i ajuden a valorar els terminis d'intervenció en el patrimoni arquitectònic.

11.2 PATHOLOGY OF BUILDING MATERIALS IN HISTORIC BUILDINGS.
RELATIONSHIP BETWEEN LABORATORY TESTING AND INFRARED
THERMOGRAPHY ²²

Document: Materiales de Construcción Vol. 64, Issue 313, January–March 2014, e009

Autor/s: *C. Lermaa, Á. Masa, E. Gila, J. Verchera, M.J. Peñalvera*

- *Universitat Politècnica de València. (Valencia, España)*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

En el moment d'examinar edificis històrics cal tenir cura per tal de no ocasionar més danys, l'ús de tècniques no destructives com les imatges termogràfiques infraroges que ja faciliten l'estudi dels materials. En l'edifici que s'ha estudiat, igual que en molts altres edificis, s'han utilitzat diferents materials. Aquest diversitat es deu a consideracions arquitectòniques, requisits constructius o artístics, i la proximitat als materials de pedrera. L'estat de deteriorament d'un edifici es caracteritza pel tipus, intensitat i extensió del dany.

Les imatges termogràfiques d'aquest document pertanyen a les parets exteriors del Seminari-Col·legi de Corpus Christi a València.

Hi ha diversos mètodes per utilitzar la tecnologia infraroja, la termografia activa i la termografia passiva, en aquest cas s'ha utilitzat la passiva ja que els carrers són estrets.

2. Metodologia

El procediment consisteix en un anàlisi d'imatges termogràfiques de l'edifici. Comparant els resultats obtinguts amb estudis realitzats a laboratori.

Els materials utilitzats són blocs de pedra calcària tradicionals com la pedra de Godella i Riba-roja i Bateig blau calcari.

²² Patologies dels materials de construcció en edificis històrics. Relació entre les proves de laboratori i la termografia infraroja.

2.1. La termografia infraroja

La capacitat de veure clarament defectes en un material depèn de la diferència entre les característiques tèrmiques del material i el grau d'homogeneïtat, mentre que el comportament tèrmic d'un material depèn en gran mesura de les seves característiques (difusió tèrmica, porositat, densitat, etc). El valor d'emissivitat pels materials de construcció més comuns és superior al 90%, per tant en aquest estudi s'ha pres com a valor de referència d'emissivitat 0,95, els resultats del mesurament doncs, es poden considerar fiables.

Tant en els estudis in situ com en els realitzats al laboratori s'ha utilitzat termografia passiva, en absència de calor del sol, les dades obtingudes a partir d'imatges termogràfiques són molt precises per la ceràmica, pedra i tova. Si els rajos del sol incideixen en les façanes poden alterar els resultats, per tant en aquest treball les imatges s'han pres a l'alba.

En aquest estudi es pretén vincular les imatges tèrmiques amb algunes de les propietats de les pedres, i examinar les propietats que tenen relació amb l'estat de deteriorament de l'edifici ja que impliquen mecanismes de circulació d'aigua. Els materials de construcció són porosos i poden deteriorar-se a través de l'entrada d'humitat, compostos dissolts, la migració i la cristallització de sal, o canvis volumètrics com butllofes, esquerdes o descamació.

2.2. Descripció de la prova

2.2.1. Humitat capil·lar

Les parets de l'edifici descansen sobre el terra que es troba humit, aquest s'eleva a través de les parets a causa de l'acció capil·lar, mentre que l'assecat es produeix en les parets a causa de l'evaporació superficial. Normalment hi ha un equilibri d'aquests dos fenòmens.

El procés d'assecat pot dividir-se en dues etapes: la primera, correspon a l'evaporació de la superfície i depèn de l'acció capil·lar i la naturalesa de la solució i és una funció lineal en el temps. La segona etapa té un ritme molt més lent d'evaporació i correspon a la difusió del vapor d'aigua a través del medi porós cap a la superfície.

2.2.2. Cristal·lització de sals

La eflorescència és la cristal·lització de les sals a la superfície del material. Sovint s'identifiquen crostes negres i dures o escorces degut a diversos productes carbonosos de la contaminació (incloent sutge i pols). Crostes, escates i descamacions, produeixen làmines de pocs mil·límetres de gruix i paral·leles a la superfície. Aquest fet està causat pels cristalls de sal, com ara potassi, sodi o sulfats que es troben normalment en materials de façana, i es produeix sobretot a l'estiu.

2.2.3. El deteriorament causat per la pèrdua de densitat

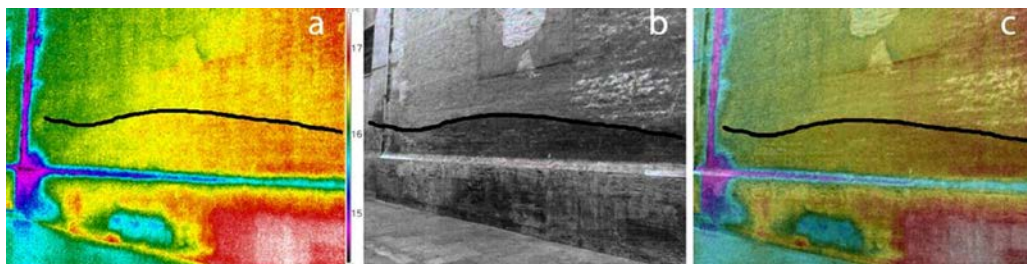
La densitat expressa la relació entre el pes de material i el volum. Com més gran sigui la densitat major és la conductivitat.

3. Resultats

3.1. La capil·laritat

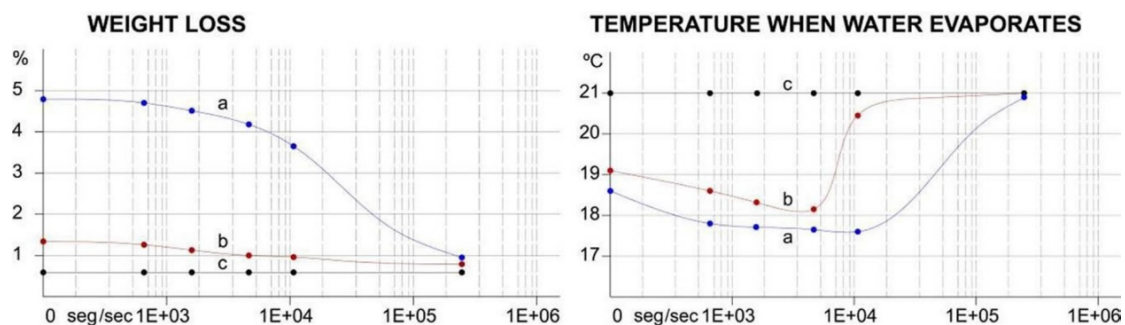
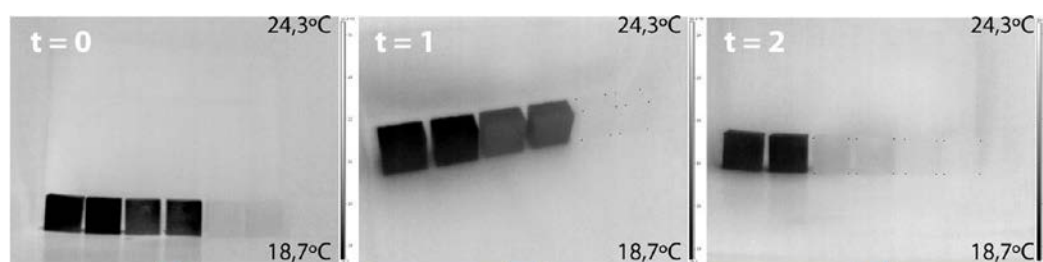
Una vegada un material està humit, els factors dels que depèn l'assecat són: temperatura, humitat relativa, micro ambient, porositat, comportament mecànic del material, i la durada del cicle humit/assecat.

La figura mostra clarament com la corba generada per l'augment d'humitat per l'acció capil·lar de les aigües subterrànies es reflecteix en la imatge infraroja.



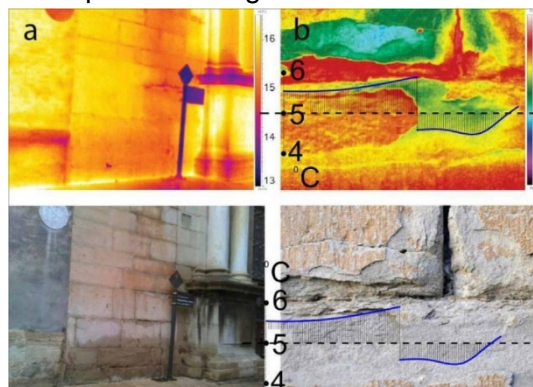
En proves de laboratori, es pot observar que l'evaporació comença en el moment en que un material s'humiteja, la temperatura de la superfície cau clarament. A mesura que el material perd humitat, la temperatura de la superfície i la de l'aire que l'envolta comencen a igualar-se.

En la següent imatge mostra tres etapes del procés d'evaporació. De les sis mostres, les dues primeres (esquerra) corresponen a la corba (a); les dues del centre la corba (b); i les dues últimes (dreta) la corba (c). En aquesta imatge termogràfica a escala de grisos, el negre representa les temperatures més baixes (18,7°C) i el blanc les temperatures més elevades (24,3°C temperatura ambient). A mesura que avança l'assaig les mostres es van assecant i assolint la temperatura ambient (blanc). En el gràfic es pot observar la relació humitat – temperatura.



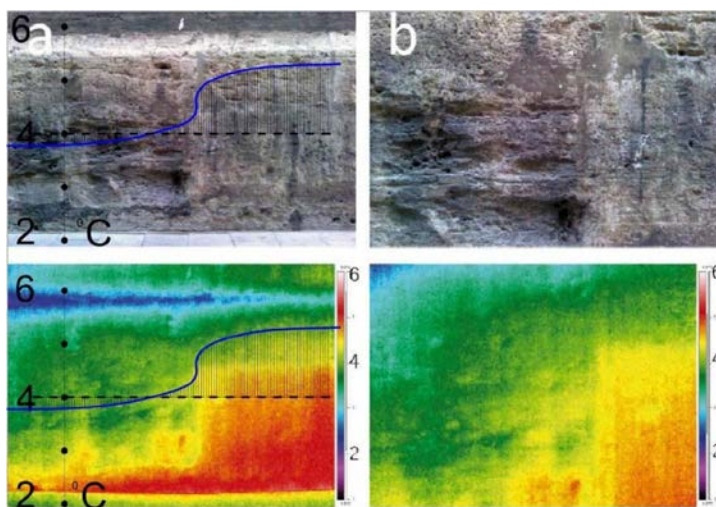
3.2. Cristal·lització de sals

La porta del Seminari està patint la degradació en línies paral·leles i generant escates a la superfície. No totes les escates són visibles a simple vista, però si que es detecten a través de la termografia. La descamació que pateix la pedra implica la separació d'una o més capes de gruix uniforme (diversos mil·límetres). On hi ha escates la temperatura a través de la imatge es mostra més freda ja que hi ha circulació d'aire i es refreda.



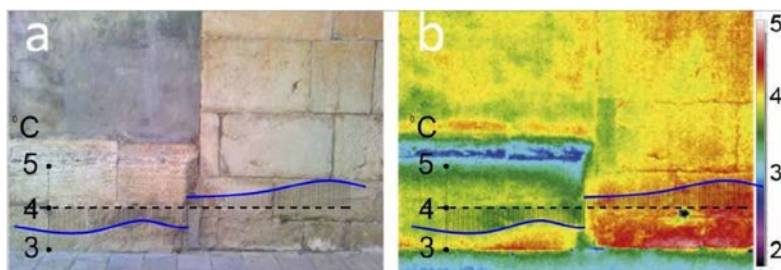
3.3. Deteriorament causat per la pèrdua de densitat

A la imatge que es mostra a continuació es pot apreciar una zona de la base de pedra (Godella). Tots els blocs són del mateix tipus de pedra i posicionats mirant cap a l'oest, però a la part esquerra de la imatge es pot veure que s'han produït alveolitzacions. Les imatges termogràfiques mostren com a la zona afectada la temperatura es redueix un 15% (4,1 – 4,8 °C).



3.4 Identificació de les característiques de diferents materials

El la il·lustració es pot veure una part de la façana on hi apareixen els dos tipus de pedra (Godella esquerra i Riba-roja dreta). Tenint en compte que la Riba-roja és menys porosa i per tant més densa, la imatge termogràfica mostra una temperatura un 20% superior que la pedra de Godella. Es pot concloure que les pedres més denses i més compactes tenen una major inèrcia tèrmica i mantenen més temps la temperatura constant.



4. Discussió

Al laboratori s'han dut a terme els assajos necessaris per tal de corroborar la informació obtinguda in situ. S'ha confirmat que l'augment d'humitat per l'acció de la capil·laritat a través de les parets, generalment és un procés llarg i tendeix a estabilitzar-se d'acord amb les condicions ambientals. En el cas estudiat, l'alçada teòrica de capil·laritat coincideix amb el resultat obtingut a través de la termografia.

Al laboratori es va confirmar l'efecte de refredament com a conseqüència de l'evaporació i la seva relació amb la temperatura del material. Es va demostrar que en el moment en que s'inicia el procés la temperatura cau significativament a causa de la transformació de líquid a gas. Amb el temps, el material perd la humitat i la temperatura tendeix a igualar-se amb la temperatura de l'aire que l'envolta.

L'acció capil·lar ascendent està vinculada a la precipitació de sals. En els casos on les sals arriben a la superfície (eflorescències) o just sota la superfície (descamació) les diferències de temperatura són detectables ja que la pedra ja no té la mateixa densitat que la resta de la paret, les zones afectades mostren una temperatura inferior.

Per tal d'identificar dos materials, com ara dos tipus de pedra, les condicions ambientals han de ser les mateixes (temperatura i humitat relativa), ja sigui en edificis o en un laboratori. Els materials amb una major densitat i menor porositat reflecteixen una temperatura més elevada.

5. Conclusió

Una gran part dels danys causats als materials de construcció es deu a l'efecte de l'aigua de pluja. Amb imatges termogràfiques es pot detectar l'efecte de refredament quan l'aigua s'evapora de la superfície d'una façana, així com identificar el front que causa la humitat. En cas que sigui una humitat ascendent per capil·laritat, provinent de les aigües subterrànies d'on descansen els murs, mitjançant les imatges infraroges es pot determinar fins a quina alçada ha pujat la humitat.

També es poden detectar la presència de sals en les pedres del mur gracies a la termografia, ja que el contingut de sal altera la densitat i per tant varia la temperatura. Per tant no només es poden apreciar les taques superficials (eflorescències) sinó que tot tipus d'alteracions de la superfície com descamacions.

IDEES PRINCIPALS:

- Mitjançant la termografia es poden detectar problemes de capil·laritat. En les imatges tèrmiques es pot apreciar la corba d'humitat que forma el problema de la capil·laritat a la base dels murs, es mostrarà una zona més freda resseguint la zona afectada.
- A mesura que el material perd humitat, la temperatura de la superfície i la de l'aire que l'envolta comencen a igualar-se.
- On hi ha escates, la temperatura a través de la imatge termogràfica es mostra més freda ja que hi ha circulació d'aire i es refreda.
- Es poden detectar alveolitzacions o pèrdues de densitat a partir de la termografia, en les pedres deteriorades per aquest problema hi ha un augment de la porositat i per tant la temperatura és inferior que en les zones no afectades
- Es poden detectar diferents tipus de materials en continguts en una mateixa façana. En aquest cas es pot determinar on hi ha un tipus de pedra, les pedres més denses i més compactes tenen una major inèrcia tèrmica i mantenen més temps la temperatura constant.

11.3 INFRARED THERMOGRAPHIC INSPECTION OF MURALS AND CHARACTERIZATION OF DEGRADATION IN HISTORIC MONUMENTS ²³

Document: Construction and Building Materials 48 (2013) 1261–1265

Autor/s: E.Z. Kordatos, D.A. Exarchos, C. Stavrakos, A. Moropoulou, T.E. Matikas

- *Department of Materials Science and Engineering, University of Ioannina, Greece*
- *Department of History and Archaeology, University of Ioannina, Greece*
- *School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Greece*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

La termografia infraroja es basa en el seguiment de la variació de la temperatura superficial de l'objecte. Les càmeres termogràfiques detecten la radiació infraroja emesa pels material i creen imatges tèrmiques mostrant la distribució tèrmica superficial. Aquesta distribució tèrmica és influïda per algunes condicions físiques i propietats dels materials, com la humitat relativa, la temperatura atmosfèrica, la temperatura aparent reflectida, i l'emissivitat dels materials.

Aquesta metodologia s'ha utilitzat amb èxit pel coneixement de l'estat de conservació i degradació de diferents estructures històriques, i també per a l'avaluació de materials i tècniques com la neteja de superfícies, la restauració amb morters de reparació i consolidació i conservació de pedres.

A més, un dels principals avantatges de l'aplicació de la termografia és la detecció de la humitat i el seu augment en els edificis i estructures d'obra. També cal esmentar que la termografia infraroja és una eina molt potent per a la caracterització de materials, detecció de delaminacions en frescos, l'eficiència d'aïllament, etc.

²³ Inspecció termogràfica infraroja de murs i la caracterització de la degradació dels monuments històrics.

El monument històric que s'estudia en aquesta recerca es troba al nord de la ciutat de Ioannina (Grècia), a la vall del riu Aaos i prop de la frontera d'Albània. Es tracta del monestir de la Mare de Déu de l'Assumpció.

L'objectiu d'aquest estudi és l'avaluació dels danys en els murs i en la maçoneria del monestir esmentat. Per tal d'aconseguir aquest objectiu, s'ha dut a terme com a inspecció no destructiva la termografia infraroja. En el treball, es van utilitzar tres tipus de termografia per tal d'avaluar els danys amb més exactitud.

2. Estudi experimental

2.1. Metodologia de la investigació termogràfica.

L'avaluació no destructiva d'una estructura a través de la termografia infraroja es pot aconseguir mitjançant dos sistemes, la termografia activa i la passiva. La termografia activa es basa en la excitació tèrmica de la mostra inspeccionada amb la finalitat d'obtenir diferències de temperatura significatives que testifiquin la presència de defectes superficials. En aquest estudi, s'han emprat tres mètodes termogràfics actius per la caracterització de la cúpula del monestir, per detectar defectes en profunditat sobre la placa on hi apareixen les inscripcions dels donants, i en altres punts de la maçoneria.

El primer mètode utilitzat va ser la termografia activa per polsos llargs (A-SH). La taxa d'excitació tèrmica i la durada van ser estipulats després d'haver realitzat altres estudis, es va procedir a l'escalfament de la superfície amb quatre llums. L'augment de la temperatura superficial va ser controlat per tal de que aquesta no arribes a un valor superior als 50°C, en el cas que es sobrepassés aquesta temperatura es podrien causar danys addicionals.

Un altre mètode que es va utilitzar va ser el de termografia modulada (A-LT). Aquest sistema consisteix en el control i monitoratge de la relació exacta entre el temps i la senyal de temperatura registrada en l'element i la temperatura de referència.

D'altra banda, el tercer mètode que es va utilitzar va ser el de termografia activa per polsos (A-PT). Aquest sistema combina els avantatges dels altres mètodes.

2.2. Arranjament experimental

El muntatge experimental va incloure quatre llums (4 x 1 kW), una unitat de control pel processament de la imatges, un amplificador de polsos, i dos tipus diferents de càmeres termogràfiques.

Donat que ens les superfícies estudiades hi ha presència de diferents materials es va considerar que l'emissivitat mitjana era de 0,75.

3. Resultats i discussió

La inspecció termogràfica IR va ser precedida per una inspecció visual per tal de detectar ja prèviament les zones del monestir amb danys crítics i importància històrica considerable.

Una de les àrees que varen ser inspeccionades mitjançant termografia va ser la cúpula del monestir, aquesta cúpula es troba a cinc metres per sobre del nivell de terra fet que dificulta la inspecció ocular simple, aquest element va ser inspeccionat amb el mètode A-SH.

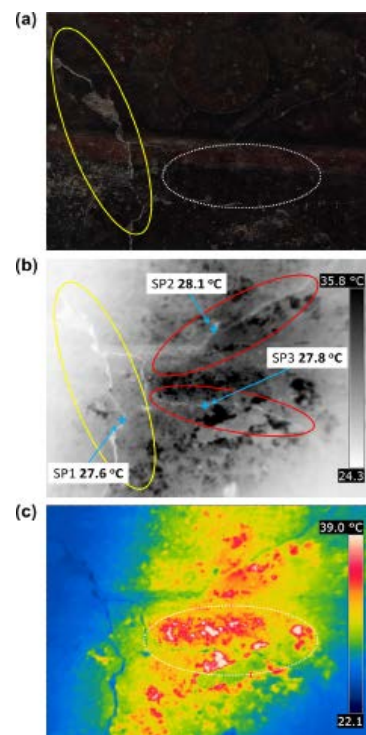
- Resultats cúpula:

Tot i que visualment ja es podien detectar les esquerdes d'aquest element la termografia va poder mostrar-ne la gravetat i la existència d'altres esquerdes que no eren detectables a simple vista però que són també greus. Es determina que són de la mateixa gravetat ja que les seves temperatures són pràcticament iguals.

- Esquerda visible dins del cercle groc (Fig a i b).
- Esquerdes només visibles a través de la termografia les que estan dins de cercle vermell (Fig b).

La termografia també va revelar l'existència de zones amb exfoliacions i delaminacions.

- Zones amb delaminacions, apareixen més blanques a la imatges termogràfica (més calentes). Aquest fet és degut a que aquesta part del mur s'ha separat i s'escalfa amb més facilitat quan se li aplica calor (menys inèrcia tèrmica).



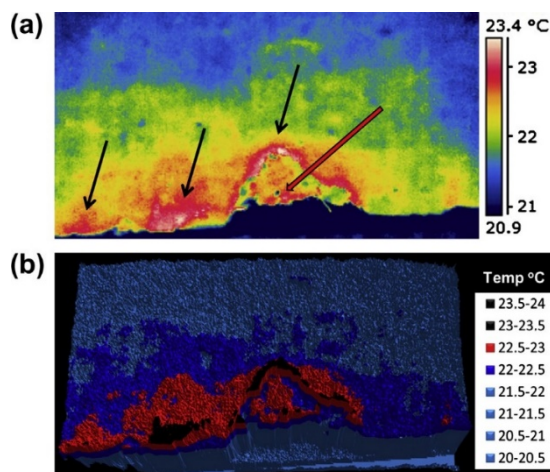
La inspecció termogràfica de la cúpula va donar com a resultat que aquesta part del monestir està molt deteriorada i que per tant necessita intervenció immediata per tal d'evitar danys irreversibles.

Una altra zona que s'ha inspeccionat és on hi apareix la inscripció del donant, aquesta es troba sobre la porta Oest de l'Església. Aquesta inscripció proporciona informació molt útil sobre l'any de la fundació de l'església i altres detalls històrics.

La termografia es va aplicar a prop de la part destruïda de la inscripció per tal d'avaluar la possible existència d'un major dany. En aquest espai es va aplicar el mètode termogràfic A-SH, les imatges van revelar tres regions separades a major temperatura (fletxa negra Fig a).

- Resultat inscripció:

- A la zona indicada amb una fletxa vermella s'hi ha revelat una altra inscripció de donant.
- Zones amb diferencial de temperatura, no es determina cap patologia com exfoliació o descamació ja que es considera que aquesta diferència és deguda a que es tracta de diferents materials i amb diferents profunditats.

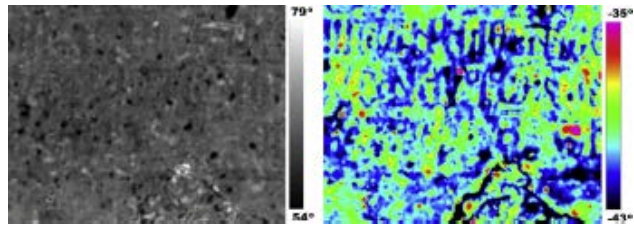


El mètode de termografia A-LT també ha estat aplicat a la inscripció per tal de detectar problemes més profunds. En la imatge digital no es distingeix cap element, mentre que en la termografia es detecten diferents patrons amb formes geomètriques, aquestes diferències de temperatura definits són deguts a la variació de materials emprats per pintar el fresc.

- Zones amb diferencial de temperatures amb formes geomètriques ajuden a la identificació del mural i dels diferents materials utilitzats.

Per detectar defectes en profunditat en el mural on hi apareixen les inscripcions s'ha utilitzat el tercer mètode, la termografia A-PT.

- Zones representades amb el color magenta representen defectes en el subsòl que no són visibles en inspeccions visuals. Aquest forats detectats es creu que són forats realitzats per tal de subjectar murals més moderns i ocultar el més antics.



Es pot concloure doncs que aquest sistema de termografia és capaç de detectar defectes en profunditat.

4. Conclusió

Aquest estudi demostra que la termografia IR és un mètode amb un gran abast, permet l'avaluació dels danys en els monuments històrics. Aquesta tecnologia és útil per treure resultats i conclusions en temps real sobre l'estat dels danys.

En aquest estudi la termografia va ser útil per determinar que calia una actuació urgent a la cúpula.

IDEES PRINCIPALS:

- Quan es detecten esquerdes en inspeccions visuals i en les imatges termogràfiques apareixen aquestes i altres, si la temperatura de les visibles i les no visibles és molt similar es pot determinar que la gravetat és la mateixa encara que unes es puguin veure a la superfície i les altres no.
- Si es detecten molts colors diferents en una imatge termografia però se sap que l'element té diferents materials i diferents gruixos no es poden detectar les taques més calentes com a patologies.
- Amb termografia activa si apareixen zones més calentes dins d'un mateix element pot ser que es tracti de defectes interns.

11.4 NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES AS A TOOL FOR THE PROTECTION OF BUILT CULTURAL HERITAGE ²⁴

Document: Construction and Building Materials 48 (2013) 1222–1239

Autor/s: *Antonia Moropoulou, Kyriakos C. Labropoulos, Ekaterini T. Delegou, Maria Karoglou, Asterios Bakolas*

- *National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, Greece*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

6. Introducció

En el passat, les decisions relatives a les intervencions de conservació i protecció dels monuments es van basar en gran mesura en l'experiència prèvia, però aquesta experiència era insuficient i no sistemàtica ja que no identificava amb exactitud els problemes existents i no gestionava els recursos tecnològics disponibles. Aquest enfocament limitava l'eficàcia de les intervencions realitzades, i en alguns casos fins i tot va causar més deteriorament dels monuments.

Encara que hi ha una gran varietat de tècniques disponibles que es poden utilitzar en el camp de la protecció del patrimoni, les dificultats relacionades amb l'accessibilitat i el mostreig destructiu irreversible no permeten un ampli ús d'aquests recursos analítics disponibles. En contrast, l'ús de tècniques no destructives (NDTS) que es poden aplicar in situ i que no requereixen presa de mostres són preferibles.

El decaïment dels materials de construcció pot ser definit com a la degradació en el temps de les propietats dels materials (físiques, químiques, mecàniques, etc.) i característiques (mineralogia, textura, etc.) el que porta el seu col·lapse com a element constructiu. El deteriorament dels materials pot ser degut al contacte amb el medi ambient o amb altres materials, aquests dos elements corresponen als anomenats factors intrínsecs i extrínsecs. L'anàlisi d'aquest factors no només és important per a l'estudi de les patologies de l'element estudiat sinó que també poden ajudar a la interpretació dels assajos no destructius. Els factors intrínsecs fan referència als materials de construcció, les seves propietats, la seva

²⁴ Les tècniques no destructives com una eina per a la protecció del patrimoni cultural construït.

distribució massiva, el seu origen i la seva tecnologia de processament, totes les intervencions que hagi sofert i la seva compatibilitat amb altres materials. Els factors extrínsecs inclouen les característiques climàtiques, el microclima prevalent, els tipus de atmosfera, l'acció de l'aigua, i les càrregues estàtiques i dinàmiques que ha sofert.

En el passat, les intervencions de conservació incompatibles i/o l'ús de materials incompatibles ha causat danys significatius i ha afavorit a la decadència en edificis històrics i monuments.

7. Resultats i discussió

La conservació i protecció del patrimoni cultural construït implica molts processos i materials. Proves i avaluacions tècniques no destructives com la termografia ajuden a aquest processos i a l'anàlisi dels materials que hi intervenen.

7.1. Termografia infraroja

La termografia infraroja (IRT) és una tècnica no destructiva d'avaluació amb una àmplia gamma d'aplicacions que van des de la millora de la visió nocturna fins a la detecció de defectes en superfícies arquitectòniques. En el camp del patrimoni la IRT és una eina molt valuosa per a investigació d'estructures, els materials constructius i el seu estat de conservació, ja que ofereix els avantatges de la investigació sense la necessitat de la presa de mostres i per la seva qualitat de ser capaç d'examinar grans àrees.

Les propietats físiques dels materials s'hauran de tenir en compte i serà essencial identificar-les i interpreta-les a l'hora de realitzar estudis termogràfics. En els elements constructius històrics no sempre se'n coneixen les propietats físiques, per exemple, en un material amb buits o porus, la seva conductivitat tèrmica i la densitat disminueixen fent que la seva difusivitat tèrmica s'alteri i per tant també se'n vegi afectada la transferència de calor dins del material. A més, quan el material investigat conté humitat, les seves propietats queden alterades, la densitat, la calor específica, i la seva conductivitat tèrmica en aquest cas també es veuen afectades provocant que els canvis de temperatura siguin molt més lents en una àrea humida. Per altra banda, el coneixement de l'emissivitat és crucial en els estudis de caràcter oficial.

La pràctica d'estudis de termografia és molt útil en l'avaluació del rendiment de diverses intervencions de conservació de patrimoni (com ara l'aplicació de materials de restauració,

neteja i consolidació), també l'avaluació de l'estat de conservació de maçoneria (detecció d'humitat residual), i en l'estudi de les superfícies amb valor artístic (com mosaics).

7.1.1. Avaluació de materials de restauració en grans superfícies.

Com s'ha esmentat, la termografia és un sistema utilitzat per avaluar el rendiment dels materials de restauració en grans superfícies (altres assajos NDT no permeten avaluar grans superfícies).

Aquest sistema s'ha aplicat en la inspecció de la fortificació construïda amb pedra davant de l'estadi Nacional de Heraklion, Creta, on l'ús de morter de ciment utilitzat en la restauració ha causat més danys al morter original. En un estudi anterior, es van examinar diverses mostres de maçoneria tipus sandvitx (consistien en dues pedres poroses fixades entre si amb morter de restauració, calç, calç hidràulica o ciment) al laboratori. En les observacions es va demostrar que els morters de ciment presentaven incompatibilitat fisicoquímica amb materials calcaris o amb morters de calç.

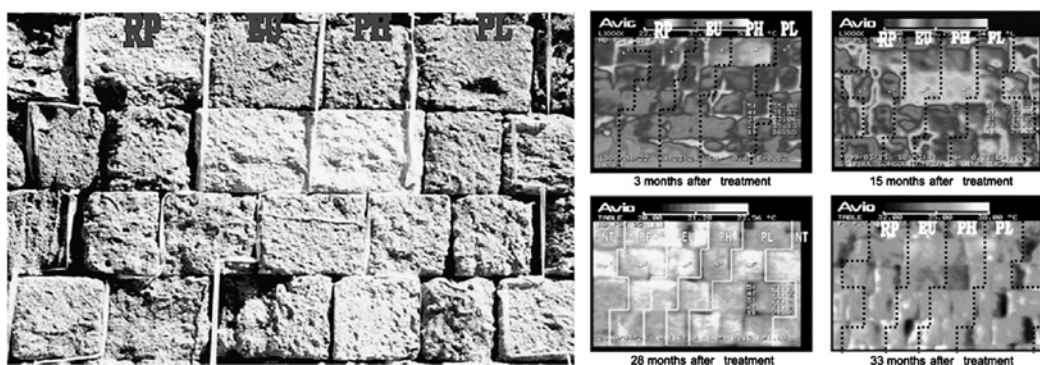


També es va verificar in situ a través d'imatges tèrmiques les diferències de comportament entre els diferents morters en les juntes (morters de restauració i morters originals).

A les imatges es podia detectar que els morters originals arriben a temperatures similars a les pedres, mentre que, els morters de restauració de ciment arriben a temperatures molt més elevades, degut a la seva capacitat impermeabilitzant en vers les solucions de sal. Una investigació de la microestructura va validar aquesta informació obtinguda amb TIR in situ, va revelar que els morters de ciment tenen diferents valors de porositat i distribució de mida de porus comparat amb els morters històrics, causant calor diferencial i de transferència de massa entre els materials porosos de maçoneria.

7.1.2. Avaluació de les intervencions de neteja sobre superfícies arquitectòniques.

La termografia infraroja també s'utilitza amb altres NDT per avaluar, in situ, la neteja de les intervencions en les superfícies arquitectòniques. Aquesta aplicació consisteix en l'avaluació de l'eficiència de tractament de neteja sobre certes superfícies arquitectòniques de diferents materials i patrons de desintegració. Aquesta aplicació s'ha experimentat al Banc de Grècia, un edifici històric, on els mètodes de neteja aplicats sobre una superfícies de pedra porosa (pedra kapandriti) era un mètode de raig d'aigua sota pressió controlada i un plasma de sepiolita.



La termografia revela que a la part de l'esquerra de la superfície, hi ha indicació d'humitat (zona de temperatura baixa en les termografies), a causa de la presència de residus de sepiolita (no s'elimina correctament de la superfície de la pedra porosa), aquest material reté humitat.

En contrast, a la part dreta de la imatge tèrmica, la neteja es va dur a terme amb eficàcia utilitzant el mètode del raig d'aigua. Atès que el calor específic de l'aigua és aproximadament cinc vegades més gran que el del marbre o de la pedra porosa, això significaria que qualsevol canvi en la temperatura seria molt més lent en una zona contaminada per l'aigua. Així, les àrees afectades per l'aigua presenten temperatures més baixes i poden ser detectades per TIF.

7.1.3. Avaluació de les intervencions de consolidació sobre superfícies arquitectòniques.

L'ús de la TIR per a l'avaluació de les intervencions de consolidació del patrimoni és basa en el fet que les propietats espectrals i tèrmiques dels materials de construcció canvien amb l'addició de consolidants, per tant, en resulten variacions de temperatura de superfície en funció del tipus i la profunditat de penetració del tractament de consolidació. Aplicacions de

laboratori a escala pilot de consolidants i la seva avaluació amb TIR i altres tècniques analítiques no destructives, són valuosos en la interpretació de les imatges tèrmiques obtingudes in situ.

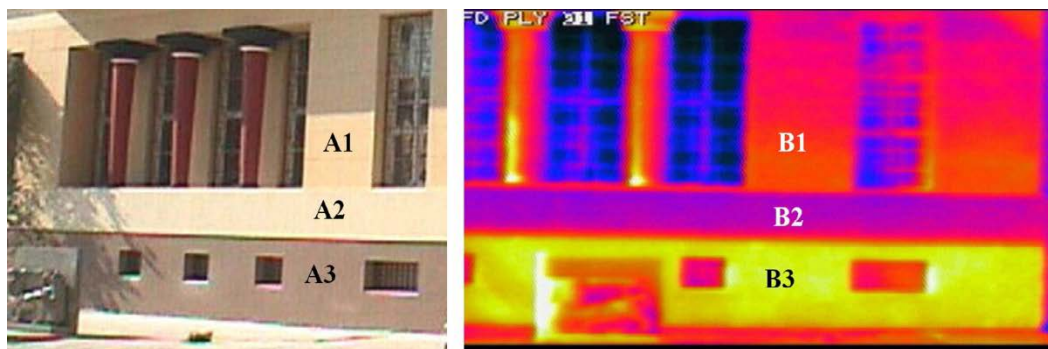
Una aplicació de la termografia per a l'avaluació d'intervencions de consolidació sobre superfícies arquitectòniques es va dur a terme a la porta de Sant Paul a la ciutat medieval de Rodes. Aquesta porta es troba a prop del mar i orientada al sud, de manera que la part del darrera d'aquesta paret de maçoneria està contínuament alimentada per solució salina. La intervenció es va dur a terme amb materials amb base silícia, ja que presenten bona compatibilitat amb la pedra, l'estabilitat química Si-O-Si, prevé la decoloració. El silicat d'etil i la resina de silicona acrílica, presenten temperatures relativament altes en comparació amb els tractaments de silicat d'etil amb sílice amorf i el de dispersió aquosa col·loïdal de partícules de sílice. Això es deu probablement al fet que els dos primers tractaments alteren les característiques fisicoquímiques de les pedres, mentre que els dos darrers, presenten millor compatibilitat amb la pedra no tractada original.

7.1.4. Estudi dels fenòmens de transferència d'humitat.

La termografia s'utilitza per a la detecció de la humitat i l'augment d'aquesta en edificis històrics i en estructures d'obra.

Aquesta aplicació es va dur a terme en la investigació en l'edifici històric del Banc Nacional de Grècia a Nafplio. L'estudi de TIR va proporcionar valors de temperatura i la seva distribució en les superfícies a través de les imatges tèrmiques depenent dels colors de la façana. La investigació va revelar que la pintura de color veig a base de morter de guix presentava valors de temperatura mitjos baixos (A1-B1), aquest fet s'atribueix a la retenció d'humitat, derivat de l'aplicació de la massilla acrílica (material a base de ciment ric amb components orgànics) que inhibeix la respiració del morter de guix a la superfície sense restringir el seu moviment d'aigua i permeabilitat al vapor.

El comportament de la respiració entre el ciment, els materials orgànics i la calç varia a causa de les diferències notables no només en la seva composició química i mineralògica, sinó que també en la seva microestructura (és a dir, porositat total, distribució i mida dels porus ràdio de porus, etc).



En les imatges termogràfiques es demostra que el nou arrebossat de color veig clar a base de ciment (A2-B2), mostra temperatures més baixes, ja que els materials amb base de ciment són hidròfils (retenen humitat). Apareixen les temperatures més altes en el guix amartellat (A3-B3) no només a causa del alleugeriment superficial del guix, sinó que també degut a que l'índex d'evaporació d'humitat del guix no va ser inhibida al no haver-hi aplicat massilla acrílica.

7.1.5. Examen de mosaics.

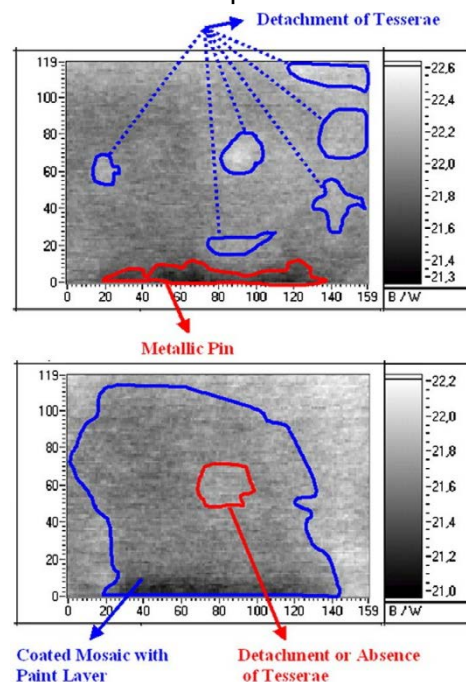
La termografia infraroja s'utilitza per l'avaluació de l'estat de conservació de mosaics i per revelar les característiques del substrat, com mosaics de guix o murals superficials.

Aquesta aplicació es va dur a terme a Santa Sofia, Istanbul, una església decorada amb mosaics que daten del S. VI. Al llarg de la seva història, l'edifici ha estat danyats pels terratrèmols, vandalisme, i ha estat subjecte a diverses intervencions. Moltes zones de mosaics que van sobreviure a través dels segles van ser enguixades durant l'ús de l'església com a mesquita. Des de la conversió de Santa Sofia en un museu al 1935, es va iniciar el procés de restauració dels mosaics incloent els que s'han revelat en les àrees on es va retirar el guix durant el procés de restauració del monument.

La capacitat de la TIR per revelar mosaics de guix s'ha demostrat en anteriors treballs de recerca, on es van investigar diversos tipus de mosaics al laboratori amb aquesta tècnica per tal de poder determinar si es podien detectar les tesselles de mosaics sota les superfícies estucades. Es va dur a terme termografia activa, on l'escalfor es va aplicar mitjançant llums òptiques, durant el procés de refredat es va obtenir la imatge tèrmica. El fet de revelar mosaics és factible, a causa de la difusió tèrmica diferent a cada capa, això permet a la TIR-activa pugui detectar les diferents sub-superfícies en els mosaics de guix, que correspon a les variacions de temperatura observada en la superfície.

La termografia va revelar l'existència d'un mosaic cobert, així com àrees separades entre les tesselles.

- Les àrees amb grisos més foscos, a menys temperatura, representen el mosaic (contorn vermell)
- Les àrees separades que es comporten de manera similar a un defecte de sub-superfície, presenten valors de temperatures més elevades degut a la diferent velocitat de difusió (diferència de grossor).



8. Conclusió.

Les proves i avaluacions tècniques no destructives com la termografia infraroja s'apliquen a l'arquitectura, en el patrimoni cultural construït pel control de qualitat dels materials, l'avaluació dels materials utilitzats en intervencions de conservació i restauració, planificació d'estratègies d'actuació, etc.

L'ús de les tècniques no destructives innovadores, validades al laboratori, quan s'integren a eines com el CAD o el GIS aporten una gran contribució a la conservació i gestió del patrimoni.

IDEES PRINCIPALS:

- Detecció de materials de restauració en grans superfícies: amb la TIR es pot detectar si en una superfície hi ha morters original o de restauració. Els morters originals arriben a temperatures similars a les pedres, mentre que, els morters de restauració de ciment arriben a temperatures molt més elevades
- Avaluació i detecció de les intervencions de neteja sobre superfícies arquitectòniques: es pot detectar si en un element hi ha restes dels materials de neteja. En el cas de la Sepiolita es detecta si n'hi ha restes si en les termografies hi apareixen zones fredes (humides). Si

s'ha executat la neteja amb aigua, les àrees afectades per l'aigua presenten temperatures més baixes

- Avaluació de les intervencions de consolidació sobre superfícies arquitectòniques: les propietats espectrals i tèrmiques dels materials de construcció canvien amb l'addició de consolidants, per tant, en resulten variacions de temperatura de superfície en funció del tipus i la profunditat de penetració del tractament de consolidació.
- Estudi dels fenòmens de transferència d'humitat depenent del material i del color: es poden detectar presència de diferents colors en un element gracies a la composició de la massilla. En imatges termogràfiques es demostra que l'arrebossat a base de ciment, mostra temperatures més baixes, ja que els materials amb base de ciment són hidròfils (retenen humitat). Apareixen les temperatures més altes en el guix amartellat, no només a causa del alleugeriment superficial del guix, sinó que també degut a que l'índex d'evaporació d'humitat del guix no es veu inhibit al no haver-hi aplicat massilla acrílica.
- Examen i detecció de mosaics (no superficials): el fet de revelar mosaics és factible, a causa de la difusió tèrmica diferent a cada capa, això permet a la TIR-activa detectar les diferents sub-superfícies en els mosaics de guix, que correspon a les variacions de temperatura observada en la superfície.

11.5 THE COMBINED USE OF IRT AND LDV FOR THE INVESTIGATION OF HISTORICAL THIN VAULTS.²⁵

Document: Journal of Cultural Heritage 14 (2013) 122-128

Autor/s: *Enrico Quagliarinia, Enrico Espositob, Antonio del Conteb,*

- *Department of Architecture, Building and Structures, Polytechnic University of Marche, Italy*
- *Polytechnic University of Marche, via Breccie Bianche, 60131 Ancona, Italy*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

Per dur a terme correctes intervencions en estructures històriques, el punt de partida és un diagnòstic precís dels diferents elements per tal de minimitzar la interferència de la intervenció amb el caràcter històric de l'obra arquitectònica.

Hi ha moltes metodologies analítiques i tècniques per investigar l'estat de conservació d'obres d'art i monuments: la termografia infraroja (TIR) sembla ser un mètode prometedor, sobretot a causa de la seva actuació no destructiva ni intrusiva.

En particular, aquest document informa dels resultat obtinguts en l'estudi de les voltes històriques situades a la sala auditori del Filarmonici, teatre a Ascoli Piceno (Itàlia). Són voltes primes construïdes amb arcs de fusta, canyes, i morter. Una tècnica de construcció antiga que es troba freqüentment en edificis històrics i monuments italians edificats entre el segle 16 i 19. Aquestes voltes sovint tenen frescos, estucs, marcs de fusta i arrebossats amb un gran valor cultural i artístic en la seva cara inferior. Actualment, aquests complements es troben en un molt mal estat de conservació degut a la manca de manteniment, molts d'ells han començat a presentar esquerdes i enfonsaments en la seva cara inferior, sovint causades per la separació de les capes de morter de guix o per la separació de les canyes en els arcs de fusta. Aquestes dues causes, sovint resulten difícils d'avaluar, sobretot quan estan en la fase inicial, en molts casos quan es comencen a detectar ja és massa tard.

Fins al moment, el procés de diagnòstic es basava en l'experiència del restaurador o el tècnic en les inspeccions visuals de l'estructura, aquest procés presentava dificultats degut a:

²⁵ L'ús combinat de irt i ldv per a la investigació de les voltes primes històrics.

- Les voltes es torben a grans altures i tenen superfícies molt extenses.
- Les voltes no són capaces de suportar el pes de persones a la part superior.
- En les voltes generalment hi ha molt poc espai entre la part superior de la volta i el sostre.

2. El mètode experimental

Per tal d'avaluar la viabilitat de la TIR per a la investigació de les voltes, es va aplicar aquest mètode en un cas d'estudi que havia estat investigat i supervisat prèviament per mètodes tradicionals.

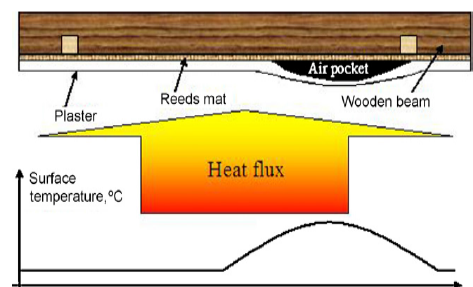
El lapse transversal de la volta és d'aproximadament 16 m, mentre que l'extensió longitudinal és de 15 m. Aquesta volta, està penjada per llaços metàl·lics des del sostre i amb arcs de fusta, canyes i morter. La superfície està gairebé tota pintada uniformement per una tempera de color marró pàl·lid, en alguns espais s'hi va col·locar decoracions d'estuc i marcs de fusta de color daurat.

A simple vista s'hi detecten esquerdes i deteriorament del guix en la superfície inferior, causats per la diferència d'assentaments dels arcs de fusta.

2.1. Metodologia de recerca amb Termografia Infraroja

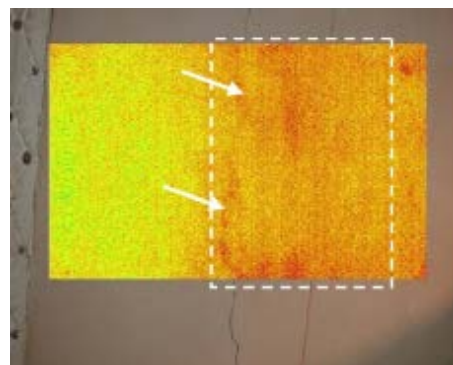
La TIR s'ha dut a terme per estudiar la volta de l'auditori, es pretenia comprovar la presència d'àrees de despreniment entre les diferents capes que constitueixen l'acabat de guix. Aquesta aplicació es basa en la idea d'aplicar escalfor de manera local en la superfície de guix mitjançant un llum de gran abast, amb la finalitat d'obtenir diferents gradients de temperatura a causa de la presència o absència de danys en el guix. L'excitació per làmpades és una pràctica comuna en el diagnòstic en TIR, encara que s'ha de realitzar amb precaució per evitar majors danys.

En la imatge que es mostra a continuació, es pot veure com en la bossa d'aire creada pel despreniment del guix es bloqueja la transmissió de calor a través de l'estructura i això causa un augment localitzat de la temperatura superficial en la imatge termogràfica.



La superfície de la volta s'ha dividit en àrees d'aproximadament $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$, a aquestes àrees se'ls hi ha aplicat escalfor mitjançant l'ús d'un llum de 2KW d'escalfor durant 2 minuts, a una distància de 2 metres. Un cop dut a terme el procés d'escalfament s'hi han realitzat termografies.

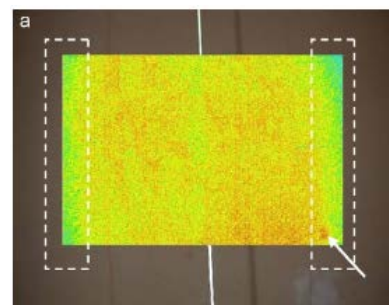
És important subratllar que en aquest tipus de procés de termografia activa, les imatges termogràfiques permeten veure les variacions de temperatura enlloc de mesurar la temperatura directament. En aquest tipus d'estudis aquest fet no és un inconvenient ja que el que interessa detectar no són els valors reals de temperatura sinó que és interessant veure les diferències i gradients de temperatura.



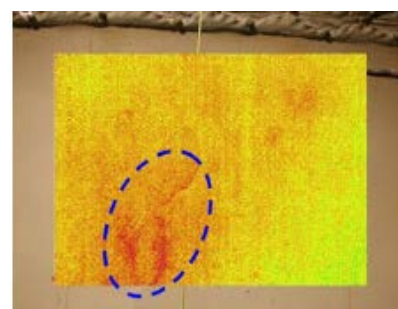
3. Resultats i discussió

3.1. Recerca termografia infraroja

En la termografia següent, es mostra una superfície de guix sense patologies. Encara que en la termografia hi apareixen zones amb temperatures més fredes (zones amb coloració verda) aquest fet només és degut a que es tracta d'un efecte causat per les vores.



En la imatge que es mostra a continuació si que es mostren desprendiments de guix. Les zones més càlides definides (àrees vermelles emmarcades per la línia blava, també s'hi aprecia una esquerda), determinen la zona danyada. Es tracta de delaminacions, el fet que hi hagi aire entre la capa de guix i la superfície permet que l'aire calent escalfi més aquestes zones. Aquestes àrees separades gairebé sempre es troben prop d'una esquerda o al voltant d'ella (com és el cas).



No tots els canvis de temperatura impliquen una patologia. En la següent termografia, es mostra com en una zona prop d'una esquerda la temperatura es detecta més elevada. En aquest cas només es deu al fet que en aquestes àrees més calentes el guix té un gruix més prim i per tant s'escalfa més ràpidament.

Com a regla general, les zones on es mostren temperatures superiors indiquen presència d'esquerdes o de patologies del guix com despreniments o delaminacions.

4. Conclusions

Aquesta tecnologia és important ja que permet analitzar la superfície inferior de la volta tot i situar-se a una gran distància del tècnic, a més no tenen cap tipus d'interacció mecànica amb l'estructura ni amb els elements històrics. De totes maneres és important subratllar que per identificar correctament les patologies és important que el tècnic tingui una bona experiència i coneixements.

IDEES PRINCIPALS:

- Efecte de les vores: quan apareixen temperatures més fredes a les vores de la imatge termogràfica no vol dir que hi hagi alguna patologia, depèn de l'angle en que s'han realitzat les termografies poden aparèixer efectes tèrmics visuals, mostrant-se com aquestes taques fredes.
- Les zones més càlides definides determinen les zones danyades. Es pot tractar d'una delaminació, i sovint apareixen a prop de les esquerdes.
- No tots els canvis de temperatura impliquen una patologia, també poden ser deguts a canvi de les característiques del material i diferents materials.

11.6 CHARACTERIZATION OF HISTORICAL LIME PLASTERS BY COMBINED NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE TESTS: THE CASE OF THE SGRAFFITO IN BO_ZNOW (SW POLAND) ²⁶

Document: Construction and Building Materials 30 (2012) 439–446

Autor/s: *Wojciech Bartz, Jaroslaw Rogó, Robert Rogal, Adam Cupa, Pawel Szroeder*

- *Institute of Geological Sciences, University of Wrocław, Poland*
- *Institute for the Study, Restoration and Conservation of Culture Heritage, Nicholas Copernicus University, Poland*
- *Institute of Physics, Nicholas Copernicus University, Poland*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

L'objecte d'aquest article és estudiar i caracteritzar els morters antics emprats en els esgrafiats decoratius que es troben a la paret Nord de la torra occidental de l'església de Boznów, un petit poble situat al Sud-Oest de Polònia. L'Esgrafiament era fet per Christopher Rutsch i els seus ajudants el 1609.

El document recull els diferents assajos aplicats als esgrafiats (microscòpia òptica i electrònica, anàlisi químic, etc), aquest resum es centrarà en la informació extreta de l'assaig termogràfic.

2. Antecedents

Es tracta d'analitzar l'arrebossat de calç blanc que es va cobrir amb una capa de calç de color gris amb carbó. Al segle 19 l'esgrafiament estava cobert per una capa de guix, fins que el 1931 es va redescobrir la presència dels esgrafiats. Al 1972 es va tronar a destapar per tal de poder procedir a la restauració, però es van deixar aquests elements al descobert durant més de 30 anys fet que va provocar la seva exposició a l'aigua de pluja i permetent

²⁶ Caracterització dels guixos de calç històrics per combinat d'assajos no destructius i assajos destructius: El cas de l'esgrafiament a Boznów (SW Polònia).

l'eliminació de la pintura de calç superficial. Aquesta exposició continuada a l'aigua i als seus canvis d'estat i temperatura va provocar la delaminació i grans pèrdues de guix.

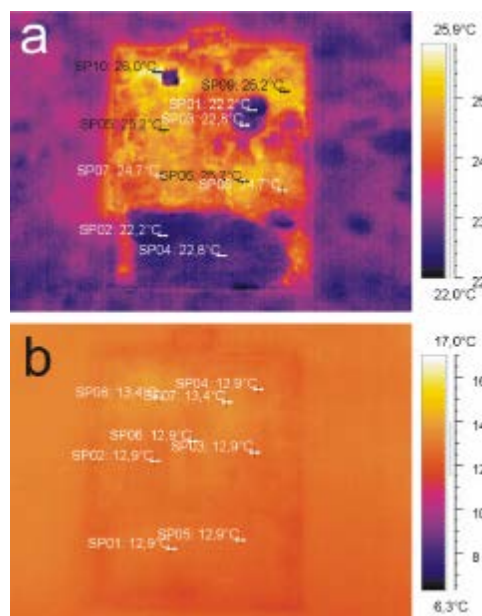
Al 2008 s'hi van aplicar productes per tal de conservar els elements, aquest recobrint proporcionava permeabilitat al gas i al vapor i protecció davant els canvis de temperatura i d'humitat.

3. Assaig termogràfic

L'assaig es va realitzar mitjançant la càmera termogràfica P65, es va considerar una emissivitat de 0.90, la humitat era del 40% i la temperatura ambiental de 25°C i del 20°C. Es van prendre imatges termogràfiques abans i després de la restauració.

A les imatges adjuntades al document s'observa una distribució de la temperatura diversificada en àrees amb anomalies properes a la superfície.

La zona fosca reflecteix la presència de soleres de ciment calcari, mentre que els guixos d'impermeabilització es distingeixen per una temperatura lleugerament superior. Hi apareix una zona ampla a temperatura superior, aquest es determina com a zona amb exfoliacions de guix, aquestes anomalies es detecten en un 80-90% de la superfície de guix.



Les termografies realitzades després de la restauració i per tant de l'aplicació del tractament de conservació presenten una distribució homogènia de temperatures, per tant queda provada l'eficàcia.

4. Conclusió

Els assajos no destructius revelen que abans del tractament de conservació, la decoració amb serigrafia s'exfoliava en un 90% dels guixos originals i que es trobaven en un estat molt fràgil i esquerdat.

IDEES PRINCIPALS:

- Les zones amb anomalies superficials presenten àrees amb diferents temperatures (aspecte de taques) en les imatges termogràfiques.
- Les zones a menys temperatura sobre el guix indica presència de ciment calcari.
- Les zones amb temperatura lleugerament superior indiquen que hi ha guixos d'impermeabilització.
- Les zones amb temperatura superior indiquen presència d'exfoliació del guix.

11.7 MULTITEMPORAL THERMAL ANALYSIS TO DETECT MOISTURE ON A BUILDING FAÇADE ²⁷

Document: Construction and Building Materials 25 (2011) 2190–2197

Autor/s: *Photogrammetry & Laser Scanning Research Group (GIFLE).*

- *Universitat Politècnica de Valencia*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

Es coneix que la presència d'aigua en determinats materials constructius pot causar danys savers a l'edificació. De fet, el contingut d'aigua en una estructura i els seus canvis d'estat (líquid-sòlid-vapor) són altament responsables dels danys dels materials i també per a la salut dels seus ocupants.

La termografia és una tècnica d'imatge no invasiva que permet la inspecció de diferents materials en funció de les seves temperatures de la superfície, dins d'un anàlisi tèrmic adequat, la humitat i altres danys estructurals poder ser detectats.

En aquest article s'introdueixen dos enfocaments de tractament d'imatges digitals basats en termogrames multitemporals per detectar la humitat en les façanes de l'edifici.

El document queda dividit en 3 apartats, el primer correspon als principis tèrmics de la termografia, els segon apartat explica el procediment adoptat per l'adquisició de les imatges tèrmiques i en el tercer s'exposa el tipus de processament i anàlisi d'imatges.

2. Principis tèrmics

En els edificis on la façana està composta per diferents materials caldrà tenir en especial consideració diferents propietats físiques. Per una banda les propietats tèrmiques com la conductivitat, el calor específic, la difusivitat i la efusivitat. Per altra banda, propietats

²⁷ Anàlisi tèrmic multi temporal per detectar la humitat en una façana de l'edifici.

espectrals com l'emissivitat, l'absorció, la reflexió i la transmissió, així com altres característiques com la porositat, la massa volumètrica, i el contingut d'aigua fisiològica.

L'article introdueix el principi que els canvis de temperatura són molt més lents en les àrees humides. Per exemple, una massa humida reté el calor absorbit en un període de temps més llarg que una massa seca, és a dir, tarda més temps per irradiar aquest calor. Una massa humida necessita més energia que una massa seca per elevar la seva temperatura. De fet, la densitat, el calor específic i la conductivitat tèrmica son característiques físiques que s'alteren en presència d'humitat.

3. Adquisició d'imatges

L'article indica que les imatges utilitzades per a l'estudi van ser adquirides totes al mateix dia en diferents hores, també detalla les condicions climatològiques específiques del dia, i que les imatges varen ser preses de manera que la càmera es trobes el màxim ortogonal possible a la façana per tal de reduir els efectes de les reflexions i les ombres i així optimitzar els resultats dels mesuraments.

A l'hora de prendre les imatges es pren atenció a les zones amb ombra.

4. Processament d'imatges i anàlisis

a. Processament

Es van prendre imatges termogràfiques i també imatges digitals. En aquest estudi per poder analitzar les imatges es va utilitzar el programari MatLab.

Per determinar la presència d'humitat s'han utilitzat dos sistemes, el mètode simple basat en el càlcul i un altre mètode basat en el anàlisis de components principals.

b. Mètode càlcul d'imatges

Aquest sistema consisteix en un senzill càlcul de les diferents temperatures entre dues imatges píxel per píxel. Per tant amb els valors obtinguts posats en imatge es pot obtenir un mapa de refredament de la zona estudiada. Considerant els diferents materials, es pot observar que dins de cada material les diferències de temperatura es poden registrar, és a dir, un sol material mostra diferents velocitats de refredament. Aquest fet pot ser degut a diferents fonts, com ara ombres, fonts de calor, humitat, etc. En termes generals, es pot dir que la humitat es troba en les àrees que representen increments de temperatura més baixos

dins de cada material. Per l'anàlisi d'humitat s'han de tenir en compte les zones amb ombra i eliminar la vegetació que hi pugui haver.

c. Anàlisi de components principals

Aquest mètode més sofisticat consisteix en transformació d'un conjunt de variables originals en un altre conjunt de variables ortogonals o components no relacionades entre si, obtingudes per combinació lineal de les anterior, de manera que el primer component explicat genera el màxim de variabilitat total, mentre que la resta de components ortogonals resultants s'ordenen d'acord amb la variació. Per tant aquest procés destaca les àrees amb menor variabilitat de temperatura, el que indica possibles àrees d'humitat.

En la comparació entre els dos mètodes es pot afirmar que:

- En el mètode basat en el càlcul de les imatges, les imatges han de mostrar diferencials significatius de temperatura sinó la interpretació i l'anàlisi són difícils.
- Les ombres dificulten el mètode de càlcul d'imatges mentre que en el mètode per components principals es poden filtrar.
- La humitat en el sostre només és detectable en el mètode de càlcul per components principals (en aquest estudi).

d. Anàlisi dels detalls en primer pla

Inspeccions que es realitzen en punts on s'hi ha observat irregularitats, aquest segon anàlisi es realitzarà en plans més curts i més detallats de les zones específiques on s'ha detectat humitat amb els mètodes anteriors.

5. Conclusió

Per tal d'obtenir resultats el màxim acurats és necessari prendre diverses fotògrafes distribuïdes preferentment en un període de 24h, això permet als tècnics produir mapes detallats d'humitat amb dades fiables sobre les façanes dels edificis. No obstant això, aquest procediment semi automàtic requereix el coneixement dels materials i la construcció d'estructures per evitar anàlisis amb dades falsejades. Aquesta tècnica de diagnòstic d'edificis no substitueix altres eines addicionals com mesuradors d'humitat, sinó que complementa i ajuda a estudiar grans àrees.

IDEES PRINCIPALS:

- A primera hora del matí, les masses humides presenten temperatures més baixes que les masses que es troben seques.
- Durant el dia, les masses humides incrementen la seva temperatura, però més lentament que les zones seques.
- A la nit, les àrees humides són més calentes o tenen valors de temperatura semblants a les zones seques.
- Per tant, es pot concloure que les fluctuacions de temperatura són més pronunciades en zones seques.

11.8 INFRARED THERMOGRAPHY AND GEORADAR TECHNIQUES APPLIED TO THE “SALA DELLAE NICCHIE” (NICHE HALL) OF PALAZZO PITTI, FLORENCE (ITALY) ²⁸

Document: Journal of Cultural Heritage 11 (2010) 259–264

Autor/s: Sebastiano Imposa.

- Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi di Catania, Corso Italia, 57, 95129 Catania, Italy.

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

El palau Pitti es troba al sud del riu Arno, és l'edifici més monumental entre els edificis renaixentistes de Florència. El palau va ser dissenyat per Filippo Brunelleschi al voltant del 1440 i es van iniciar les obres cap al 1458 per ordre de Luca Pitti.

L'objectiu d'aquest treball va ser reconstruir la distribució original de la sala dels nínxols, la sala més antiga del palau. (construïda entre el 1461 i 1462). Aquest document es centra en la localització de quatre nínxols que presumptament es trobaven situats a les parets i coberts amb panells de fusta decorats després de que al 1793 es fes una reconstrucció parcial del palau. Apunts històrics indicaven que al saló hi havia 10 nínxols però no referenciaven la seva posició exacta. La troballa d'un plànol datat a finals del 1700 confirmava la presència dels 10 nínxols tot i que s'ha comprovat que la posició actual no coincideix.

En aquesta part del palau s'hi poden trobar valuoses pintures, per tal de preservar-les era imprescindible utilitzar tècniques no destructives com la termografia i el georadar. Per altra banda, aquestes dues tècniques són les dues úniques que permeten la investigació de parets decorades on no sigui possible realitzar proves de mostreig o de contacte directa.

²⁸ Termografia infraroja i tècniques de georadar aplicades a la “sala dellae nicchie” (sala dels nínxols) *del palazzo pittii, florence (italia)*.

2. Assaig amb Termografia Infraroja

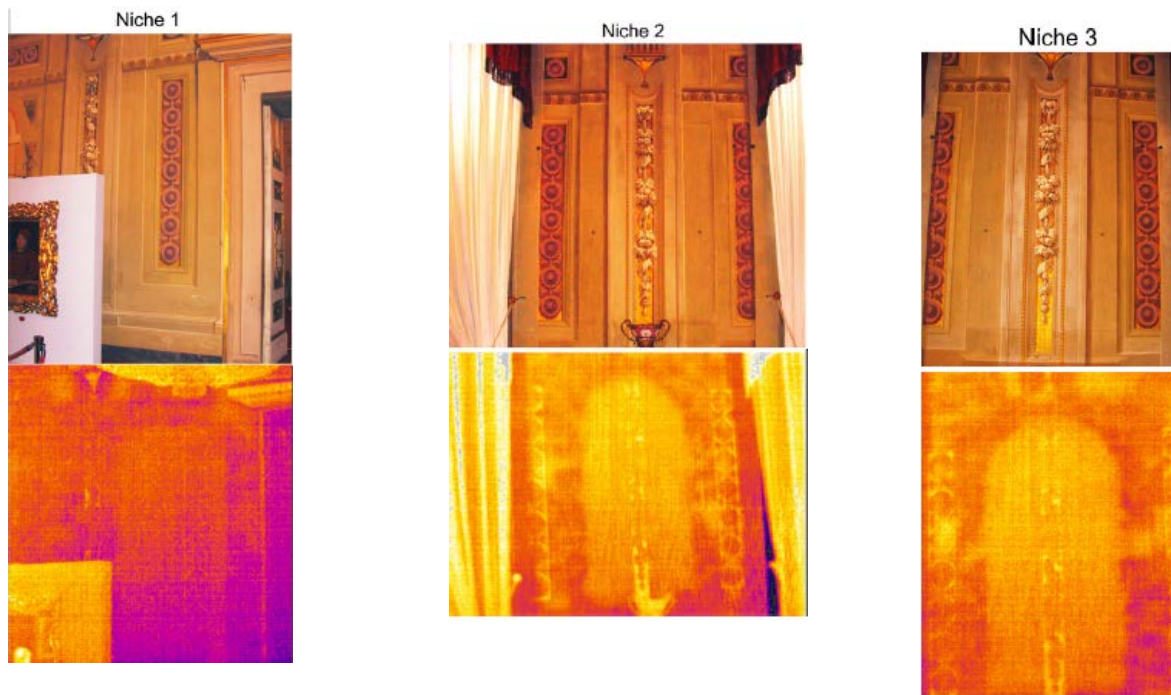
Entre les tècniques no destructives, la termografia infraroja (TIR) representa una eina valuosa per a la investigació de les estructures arquitectòniques i ha tingut una àmplia aplicació en el camp del patrimoni cultural també per la possibilitat d'investigar grans àrees en poc temps.

La tècnica TIR també pot utilitzar-se per investigar l'estructura i composició de les parets, mitjançant la detecció dels diferents comportaments tèrmics d'inèrcia dels materials en les primeres capes superficials. La temperatura de la superfície d'una paret és influïda per la propagació de la calor interna, que al seu torn és influïda per les condicions ambientals. Una variació d'aquestes condicions, ja sigui natural o artificialment induïda, provoca un desequilibri tèrmic que es pot visualitzar fàcilment a través de la termografia infraroja. En l'estudi es va utilitzar una càmera tèrmica per detectar i quantificar qualsevol variació de temperatura entre les diferents parts de la superfície d'estudi en les mateixes condicions (propietats de radiació i condicions ambientals), en termes de valors relatius i absoluts. La temperatura mitjana dins la sala dels nínxols era de 16.3°C i la humitat relativa mitjana del 58,9%, aquestes condicions es van controlar de manera permanent durant l'assaig usant un higròmetre i un termòmetre digital.

La càmera termogràfica es va col·locar en un trípode per tal de limitar al màxim possible les distorsions o efectes de superposició que podrien haver suposat dificultats en la lectura de les imatges i valors. Les dades termogràfiques van ser adquirides en línies paral·leles utilitzant fotogrames amb una dimensió fixa.

Per la detecció dels nínxols es va utilitzar la termografia activa. L'escalfament dels murs es va realitzar mitjançant dues làmpades halògenes situades aproximadament a 1,5 metres de l'element. La quantitat de calor aplicada es va limitar per evitar danys en les pintures.

La imatge termogràfica va mostrar clarament una marcada variació en la composició de la paret a causa de les diferents propietat d'emissió dels materials. Aquestes observacions van fer possible detectar de forma inequívoca la localització dels tres nínxols situats dins la paret i amb els panells de fusta superposats.



3. Conclusió

L'aplicació de dues tècniques no destructives, termografia infraroja i georadar, dins de la sala dels nínxols ha permès verificar la presència de nínxols que es remunten a la segona meitat del 1500.

Els resultats obtinguts assenyalen la important contribució de l'ús combinat d'aquestes tècniques no destructives en aquest tipus d'estudi, on el mètode TIR més ràpid en la interpretació de dades, ha proporcionat la informació exacta de la localització dels nínxols i per tant complint amb l'objectiu proposat en el treball.

IDEES PRINCIPALS:

- Determinar diferents components utilitzats en la construcció de mur a partir de la variació de temperatures i la determinació dels valors d'emissivitat.
- Detecció sota panells de fusta: utilització de termografia activa mitjançant làmpades (distància de 1,5 metres per no malmetre les pintures).
- La termografia permet obtenir dades i valorar-les amb major rapidesa que altres assajos.

11.9 SUITABILITY OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR THE EXAMINATION OF RURAL BUILDINGS: THE PARTICULAR CASE OF A SPANISH REGION ²⁹

Document: Informes de la construcció. Vol. 55. Nº488. Noviembre - Diciembre 2003

Autor/s: *Ignacio Cañas Guerrero, Silvia Martín Ocaña, Ignacio González Requena*

- *Departamento de Construcción y Vías Rurales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.*
- *Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid.*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

En l'actualitat, la termografia està sent utilitzada per la inspecció d'edificis urbans, habitatges i oficines. A més d'edificis d'habitatges la termografia està començant a utilitzar-se per l'estudi d'edificis amb interès cultural, degut al seu caràcter de tècnica no destructiva i al valor afegit d'aquest tipus d'edifici, així com per l'estudi de l'estructura d'obres civils.

Aquest article presenta els resultats de les inspeccions termogràfiques realitzades sobre els edificis rurals de la comarca de Soria, Espanya.

2. Base física

Tots els materials tenen la capacitat d'absorbir radiació infraroja augmentant la seva temperatura, de la mateixa manera, tots els materials amb una temperatura superior al zero absolut emeten energia infraroja. La termografia és una tècnica que aprofita la radiació emesa per la superfície d'un cos com a variable termomètrica.

A la pràctica es pot considerar que l'emissivitat com a una constant pròpia de cada material, tot i que en realitat és funció de la longitud d'ona, de la temperatura, i de l'angle d'incidència. Per tant, si es coneix la emissivitat de l'objecte que es pretén estudiar, la mesura de la radiació ens donarà un valor de temperatura.

3. Descripció de l'estudi

²⁹ Aplicabilitat de la termografia per la inspecció dels edificis rurals: cas d'una comarca espanyola.

L'objecte d'aquest estudi és avaluar les possibilitats de l'aplicació de la termografia als edificis rurals com a un primer pas que ens ajudi al seu diagnòstic.

Les inspeccions termogràfiques s'han realitzat des de l'exterior dels edificis, per tant s'han obtingut mapes de temperatura de les façanes. Amb aquest sistema es pot diagnosticar els defectes dels edificis que van en relació a les variacions de temperatura en la seva superfície, com són: danys estructurals, problemes d'humitat, falta d'aïllament tèrmic, i elements ocults entre altres. L'objectiu és localitzar zones problemàtiques per un posterior anàlisi, els resultats obtinguts es basen en comparació de temperatures d'una superfície i no en valors absoluts, és a dir, es tracta d'un anàlisi qualitatiu.

4. Realització de les inspeccions

Per la realització de les inspeccions s'han seguit les indicacions proposades per la norma Europea EN 13187:1998.

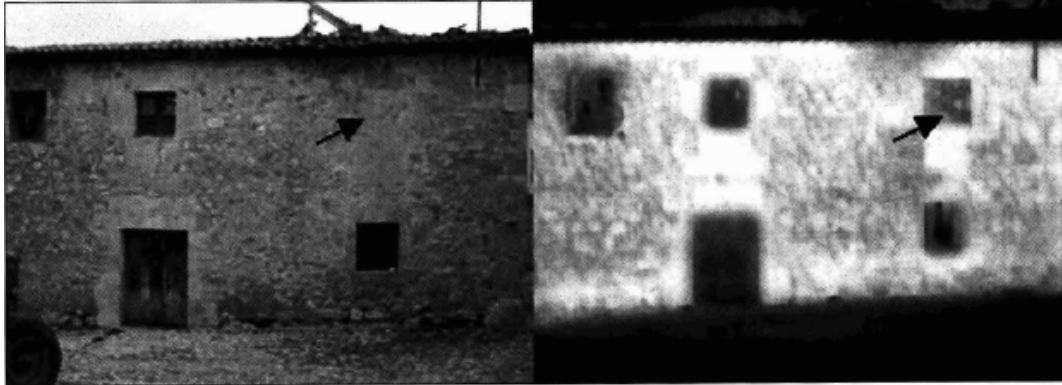
5. Resultats: aplicacions

5.1. Determina materials i elements ocults

Gran part dels edificis rurals antics han sofert una sèrie de remodelacions al llarg del temps. El que actualment es veu en l'entorn rural és rarament un edifici en el seu estat original. Abans de decidir les necessitats de rehabilitació per una futura reutilització, es precisa conèixer tant els materials utilitzats en la seva construcció com l'existència de elements ocults. La termografia és una eina que pot facilitar aquest procés.

Un dels detalls que es poden observar mitjançant la termografia és l'existència en la façana d'antics forats ocults.

En la següent imatge apareix la imatge visual i la termogràfica de la façana d'un habitatge rural. En la termografia s'aprecia clarament un forat a la façana que no apareix en la imatge visual. Es tracta d'un forat antic que ha estat tapiat, l'espessor utilitzat per tapar el forat és menor que l'espessor del mur de tancament, per tant, la seva capacitat d'acumular calor també és inferior. La termografia ha estat realitzada al capvespre, quan la temperatura exterior està baixant. El forat apareix a una temperatura similar a la de la resta de forats de façana i a menor temperatura que la resta del mur de tancament.



Un altre resultat que es va obtenir en les inspeccions va ser la determinació del material de construcció ocult darrera d'un arrebossar de ciment. A simple vista no es podia determinar el material de tancament de l'edifici. En la imatge termogràfica es va poder veure amb claredat que el mur estava constituït per peces de petit format, per la disposició i irregularitat es pot afirmar que es tractava d'un mur de tova. A més a més la presència d'una zona inferior a major temperatura, indicava l'existència de un sòcol de pedra que degut al seu major gruix, acumulava més calor durant el dia, i per tant, apareixia a la imatge més calent.

5.2. Distingir materials utilitzats en la construcció

Aquesta aplicació es deu a les diferents capacitats d'emmagatzematge de calor que tenen els materials. Els materials amb major densitat (pedra, fang) tenen una capacitat d'emmagatzemar calor més elevada que els materials lleugers (fusta i aïllants). Això vol dir que els primers acumulen calor durant el dia i el mantenen durant més temps que els lleugers. Quan es fa de nit, els materials lleugers ja han perdut tot el calor i apareixen a les imatges termogràfiques a menor temperatura que els pesats, en fer-se de dia el fenomen s'inverteix.

En la imatge que es mostra, hi ha un exemple d'un habitatge rural construït amb maçoneria de pedra i tova. En la imatge termogràfica s'observa perfectament la diferència de comportament tèrmic d'aquests. La part inferior de l'edifici realitzat amb maçoneria té un gruix major que l'última planta executada amb tova degut a les necessitats de capacitat portant, al augmentar el gruix, augmenta el volum que és capaç d'emmagatzemar calor, és per això que quan es fa de nit i les temperatures han disminuït, la part del mur de pedra està a major temperatura que la part de tova.

5.3. Identificació d'esquerdes

Una aplicació molt interessant de la termografia és la de determinar danys en l'estructura i en els tancaments.

En la següent imatge d'una nau agrícola, la termografia revela la localització d'una junta que no es podia apreciar a simple vista. La detecció d'aquest tipus de danys obeeix a una diferència de l'emissivitat més que a una diferència de temperatura. La zona on s'ha localitzat la junta no té les mateixes característiques superficials que la façana intacta, la qual cosa fa que varïi la seva capacitat de radiar calor.



5.4. Identificació d'estructures

La termografia és una eina eficaç a l'hora d'identificar les estructures dels edificis. Tot i que la termografia es basa en mesurar la radiació i, per tant, la temperatura superficial d'un cos, es poden detectar elements interiors sempre que aquests transmetin per conducció la seva temperatura cap a l'exterior. L'estructura interna dels edificis respon a les variacions de la temperatura interior. Les inspeccions realitzades indiquen que només són visibles les estructures portants dels edificis en les termografies preses a la sortida del sol. La raó és que l'interior de l'edifici, a vegades, està a major temperatura que l'exterior, a més el mur de façana encara està a baixa temperatura la qual cosa representa un major contrast de temperatura. Aquesta diferència permet conèixer l'estat en el que es troben les estructures.

En la imatge apareix un celler de construcció actual, la termografia realitzada mostra perfectament l'ubicació de l'estructura portant.



5.5. Identificació de zones humides

La termografia permet conèixer aquest tipus de defectes en les construccions. L'aigua és un element amb un elevat calor específic, és a dir, requereix una gran quantitat d'energia per modificar la seva temperatura. És per això que els materials de construcció carregats d'humitat es comporten diferent que els materials secs. A més d'aquest afecta, existeix la possibilitat de que l'aigua s'evapori produint una disminució de la temperatura de la superfície. Un material humit reté el calor absorbit durant més temps que sec, i per tant, radiarà energia durant més temps.

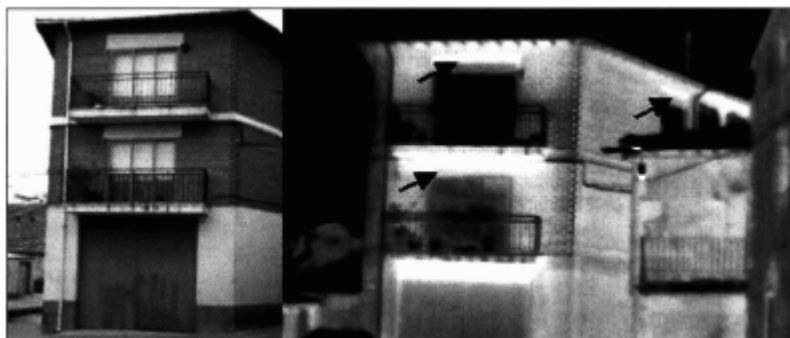
En aquesta imatge apareix un habitatge rural. La ruptura de canaló de desaigua ha provocat que les aigües de pluja caiguin directament pel mur. Aquest fet fa que aparegui una zona humida en la part del mur en contacte amb el terra. En la imatge termogràfica presa a la sortida del sol aquesta zona apareix més freda degut a que la seva inèrcia és major que la resta del mur, per tant tarda més a escalfar-se que la resta.



5.6. Pèrdua de calor

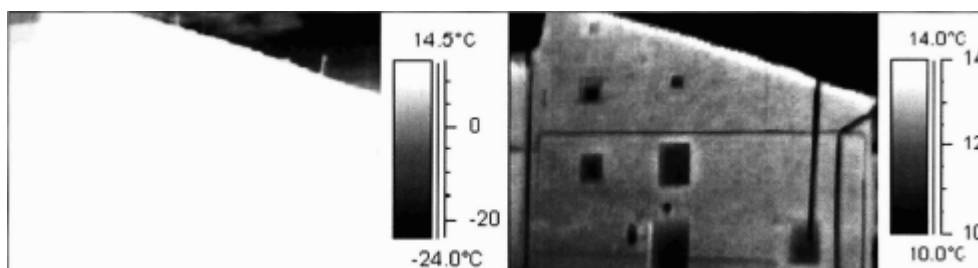
Donat que la termografia permet reconèixer diferències de temperatura, és possible determinar zones de pèrdua de calor. Reconèixer aquests punts crítics es fonamental a l'hora de decidir les intervencions necessàries per solucionar el problema.

La imatge mostra un habitatge rural en el que apareixen punts de pèrdua de calor (zones més calentes) en els tambors de les persianes.



5.7. Reconèixer zones d'acumulació de calor

En totes les termografies realitzades quan marxa el sol han aparegut punts calents sota els cossos sortints de les façanes (sota balcons, sota voladís de coberta), així com en tancaments (marcs de finestres i portes). Aquests són punts en els que l'aire no pot circular lliurement. Durant el dia l'envolvent s'escalfa i en aquests punts s'hi acumula aire calent.



6. Avantatges de la termografia per detectar l'estat de conservació dels edificis rurals.

La termografia és una tècnica no destructiva que proporciona informació completa sobre diverses característiques dels edificis.

El software del programa de la càmera termogràfica permet:

- Regulació de l'escala de temperatura

- Realitzar perfils de temperatura
- Realitzar histogrames de temperatura
- Realitzar mosaics de diferents termografies

7. Conclusions

De l'estudi realitzat se'n poden extreure les següents conclusions:

- La termografia és una tècnica que serveix per una localització inicial de possibles punts problemàtics
 - Emmagatzemar imatges per poder-les tractar amb posterioritat
 - Permet realitzar un gran nombre d'inspeccions en un temps limitat
 - Proporciona informació a distància, no cal tenir contacte amb l'edifici
 - S'han pogut determinar:
 - Materials i elements ocults
 - Diferents materials de construcció
 - Localització d'esquerdes
 - Localització d'estructures
 - Localització de zones humides
 - Pèrdues de calor
 - Zones d'acumulació de calor
 - Amb els mitjans actuals les termografies no permeten mesurar temperatures absolutes, per tant es tracta d'una tècnica qualitativa. *(L'article és del 2003, actualment si que es poden obtenir valors absoluts amb els aparells de termografia més nous.)*
 - Les temperatures que es produeixen en l'ambient exterior són de petita magnitud (20°C d'amplitud màxima diària exterior), en aquestes condicions es pot admetre que l'emissivitat dels cossos és constant i no es necessari realitzar mesures addicionals.
-

IDEES PRICIPALS:

- Determina materials i elements ocults
 - Tapiat en diferents materials: cada material té unes característiques i per tant radiarà una temperatura específica, en la termografia es podrà detectar el canvi de temperatura i per tant el canvi de material.

- Tapiat amb diferent gruix: Depenent del gruix del material tindrà més o menys capacitat d'acumular calor i per tant la termografia detectarà diferents temperatures. Els espais ocults presentaran una temperatura més similar a la dels forats.
- Distingir materials utilitzats en la construcció. Quan es fa de nit, els materials lleugers ja han perdut tot el calor i apareixen a les imatges termogràfiques a menor temperatura que els pesats, en fer-se de dia el fenomen s'inverteix.
- Identificació d'esquerdes. La detecció d'aquest tipus de danys obeeix a una diferència de l'emissivitat més que a una diferència de temperatura. A les termografies les esquerdes apareixeran una temperatura diferent que a la resta del cos.
- Identificació d'estructures. Només són visibles les estructures portants dels edificis en les termografies preses a la sortida del sol. Es mostren a major temperatura ja que l'interior normalment està a temperatures més altes i es transmet al mur de façana on s'ha aplicat la termografia.
- Identificació de zones humides. En la imatges termogràfiques preses a la sortida del sol aquestes zones apareixen més fredes degut a que la seva inèrcia és major que la resta del mur, per tant tarda més a escalfar-se que la resta
- Pèrdua de calor. El punts on hi ha pèrdues de calor apareixen més calents en les imatges termogràfiques (es dissipa l'aire calent de l'interior).

11.10 THERMOGRAPHY AND SPECTRORADIOMETRY APPLICATIONS IN THE STUDY OF THE DETERIORATION OF OUR NATIONAL ARCHITECTURAL HERITAGE.³⁰

Document: Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons 3.0 España 22-V-96 (115-4)

Autor/s: *J. A Cusido, M. Devant y J. Riba*

- *Institut de Tecnologia i Modelització Ambiental (UPC)*

Resum (extreta informació referent a l'aplicació de la termografia):

1. Introducció

Lamentablement, el patrimoni històric i especialment aquell que es troba situat en els ambients urbans, pateix sovint, el denominat "mal de la pedra". Aquesta és l'alteració de les característiques primitives de la roca, degut a la seva adaptació a les noves condicions ambientals en que es troba. Alteració que, en ambients urbans és més greu pels alts nivells de contaminació atmosfèrica.

Al emprendre les tasques de restauració d'un monument és de vital importància conèixer les causes de la seva degradació, així com el procés que ha seguit al llarg del anys.

En el següent treball es presenten els resultats inicials de l'aplicació de la termografia infraroja per estudiar l'estat i el grau d'alteració de les pedres monumentals de la Catedral d'Oviedo.

2. Tècniques d'anàlisi no destructiu: Termografia Infraroja.

2.1. Termografia Infraroja

La termografia infraroja es caracteritza per:

- a) Ser una tècnica de mesura de temperatura i emissivitat superficial sense entrar en contacte directa amb el sistema estudiat.

³⁰ Aplicacions de la termografia infraroja i l'espectroradiometria en l'estudi del deteriorament del patrimoni arquitectònic nacional.

- b) Ser un tècnica totalment passiva, és a dir, que no requereix cap font d'il·luminació externa, fet que permet el seu funcionament tant de dia com de nit. Així com aplicar la TIR sense alterar les condicionals ambientals durant l'experimentació.
- c) Aquesta tècnica permet realitzar un diagnòstic o manteniment preventiu. La seva capacitat d'anàlisi in situ permet efectuar controls de processos tèrmics, on la temperatura i l'emissivitat de la superfície aportin informació vàlida per el diagnòstic.
- d) Proporciona informació a temps real
- e) Establiment cronològic de diferents fases constructives, pot permetre diferenciar portes i finestres tapiades o obertes posteriorment, l'estructura dels murs, diferents materials utilitzats, etc.
- f) Localitzar passos de canalitzacions diverses i vies de serveis.
- g) Posar de relleu la presència d'humitats i fenòmens de capil·laritat.
- h) Anàlisi de irregularitat sota estucats i frescos. Heterogeneïtats constructives.

3. Metodologia i pla de treball

3.1. Termografia infraroja

La metodologia seguida en aquesta inspecció consta de tres fases: fase de recopilació de dades inicials, la fase de la inspecció termogràfica i la fase d'anàlisi de les dades obtingudes.

La primera fase, en base a les dades obtingudes es fa una selecció de les zones on cal realitzar la inspecció termogràfica. La selecció es realitza en base als següents criteris:

- Grau d'alteració
- Diferents característiques pètries
- Variabilitat en la ubicació (orientació, exposició, agents meteorològics, etc.)

En la segona fase, un cop identificades totes les dades meteorològiques es realitza l'escombrat amb la càmera termogràfica.

Finalment, en l'avaluació dels resultats, es realitza un tractament informàtic de les imatges obtingudes.

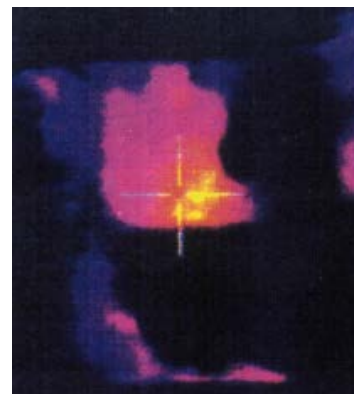
4. Resultats

Com ja s'ha expressat, la termografia permet identificar zones a diferent temperatura i amb diferent índex d'emissivitat. En la figura que es mostra a continuació, corresponent a la terrassa del rosetó central en la façana principal, s'observa com es destaquen petites àrees ben definides a una temperatura clarament superior (al voltant d'1° C) de la resta del mur. Les diferències observades són causades per la intervenció de restauració, realitzades en la segona mitat del segle passat, i amb un material diferent a l'original. Aquest fet constitueix un clar exemple de la capacitat tècnica de la termografia infraroja per la determinació, estudi i seguiment de les actuacions de restauració.



En altres casos, la TIR, permet distingir carreus d'un mateix material amb un diferent grau d'alteració.

La imatge següent mostra les diferents termografies de carreus localitzats en les parets sud i nord, respectivament, del pati dels Reis, amb una diferència de temperatura d'entre 1 i 3 °C respecte als carreus adjacents. En el primer cas, les zones més fredes pertanyen a un nivell de degradació més elevat. El tall de cantera i la col·locació en l'obra poden causar variacions de l'emissivitat. Aquest pot ser el cas de carreus aïllats.



Encara que, quan l'àrea que presenta heterogeneïtat, o la diferència de temperatura es considerable, les possibles diferències d'emissivitat no poden ser les úniques causants. En aquest sentit, la imatge presenta una cornisa d'un pilar situat en el canto sud del Claustre, la termografia revela una zona fortament alterada, encara que a simple vista apareixia només com lleugerament danyada.



Resulta particularment interessant l'observació de les zones de rentat, és a dir, aquelles zones en que l'acció de la pluja ha impedit la formació de pàtines i/o crostes. Les zones rentades, que presenten un major estat de conservació, en la imatge termogràfica presenten una temperatura menor. S'observa com la diferència de temperatura entre les zones rentades i no pot arribar a ser de fins a 3°C. Es considera que la diferència és deguda a que les zones rentades transpiren millor, és a dir que tenen un índex d'evaporació convectiva major. La presència de crostes impedeix l'absorció de l'aigua de pluja i suposa un obstacle a l'evaporació. De totes maneres, en contradicció amb el que s'ha observat al claustre, a la terrassa del rosetó central, les zones rentades presenten temperatures lleugerament més elevades. Aquest comportament diferent pot ser atribuït a diferents motius, per una part, l'exposició a la radiació solar o a les brises i vents, per tant, a un microambient diferent. Per altra banda, cal recordar que el claustre està construït amb pedra de Laspra, i la terrassa del rosetó central amb pedra Piedramuelle. La primera pedra és més porosa i té menor porositat atrapada que la segona. Les diferències en la porositat permetrien a la pedra de Laspra una evaporació de l'aigua absorbida més efectiva. També pot influir el fet de la formació de pàtines, i no crostes, com en el Claustre.

5. Conclusions

- a) Els materials introduïts en motiu de restauracions son fàcilment observables, donat que la imatge infraroja augmenta el contrast entre el material original i l'introduït en la restauració, degut a les seves diferents propietats tèrmiques o d'emissivitat. Per evitar l'aparició de patologies, com ara condensacions intersticials que contribueixin a la degradació dels material, les actuacions de restauració s'haurien de realitzar amb material de característiques tèrmiques similars.
 - b) Amb la TIR es manifesta, clarament, els materials alterats dels que no ho estan, deduint-se també que els material en bon estat de conservació es troben a una temperatura superior sensiblement més baixa que la resta (es pot dir que "transpiren millor").
 - c) Alguns carreus del mateix material presenten temperatures o emissivitats superficials diferents, es considera que pot ser degut al tall a la cantera.
-

IDEES PRINCIPALS:

- Quan mitjançant la termografia es destaquen petites àrees ben definides a una temperatura clarament superior (al voltant d'1° C) de la resta del mur, es pot tractar de l'observació de diferents materials d'intervenció en restauracions.
- Si a través de la termografia es detecten carreus ben perfilats a diferent temperatura pot ser degut a que el tall de cantera i la col·locació en l'obra poden causar variacions de l'emissivitat
- Quan es detecten zones a diferent temperatura cal analitzar i determinar si es tracta de zones on s'ha edificat amb un material diferent o es tracta d'una patologia.
- Les zones rentades, que presenten un major estat de conservació, en la imatge termogràfica presenten una temperatura diferent. Serà major o menor depenen de diferents factors (tipus de pedra, diferents porositats, diferent microclima, etc)

12. ELS EDIFICIS ESTUDIATS

12.1 ESSLÉSIA DE SANT PERE DE RIPOLL

12.1.1 EMPLAÇAMENT

L'església de Sant Pere de Ripoll es troba situada al poble de Ripoll, el municipi està ubicat a la comarca del Ripollès, i té una alçada topogràfica d'aproximadament 690 metres. L'edifici es troba emplaçat a la mateixa plaça que el monestir de Santa Maria de Ripoll, al centre del municipi, entre la plaça Abat Oliba i la plaça del Monestir (Ripollès).



22. Imatge de l'Església de Sant Pere de Ripoll presa des de la plaça del monestir.

Font: diari de Girona

12.1.2 SITUACIÓ ACTUAL

L'Església es va declarar com a bé cultural d'interès local. Consta d'una protecció integral tal i com es descriu al catàleg de Béns Protegits al POUM de la població. La descripció indica que es protegeix tot el seu conjunt edificat, format pels volums, façanes i organització estructural i d'espais interiors. Actualment aquesta edificació està qualificada com un equipament cultural i és propietat de la Parròquia de Santa Maria.

L'edifici es troba situat en sol urbà consolidat, consta de planta baixa i planta pis amb una geometria força regular ocupant una superfície construïda total de 890,12 m², dels quals es poden considerar com a utilitzables uns 633,19 m² amb una nau central d'aproximadament 8 m d'alçada, una llum de 6,50 m i una llargada total de 32,50 m. Les dues naus lateral tenen una alçada de 7 m, una llum de 4,50 m i una longitud similar a la nau central. Els accessos de l'església són, un mitjançant l'escala de la plaça del monestir, plaça Abad Oliba, o per la façana de ponent, carrer Raval de Sant Pere, on s'hi situa la porta. El darrer accés és a partir de la capella de la Congregació.

La construcció, de forma rectangular en testera, té la façana principal ubicada a la Plaça Abad Oliba amb un front Sud de 38,00 m, la lateral encarada a ponent al carrer Raval de Sant Pere de 24,00 m, i la façana posterior al Passeig de l'Elies Rogent encarada a Nord amb gairebé 38,00 m.



23. Imatge de l'interior de l'església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent

La topografia del perímetre exterior presenta un perfil irregular. El terreny edificat presenta desnivell, l'estudi indica que des de la rasant de la Plaça Abad Oliba, a la rasant del Passeig de l'Elies Rogent, hi ha un desnivell de fins a 8 metres.

12.1.3 HISTORIA DE L'EDIFICI

L'Església de Sant Pere que actualment es troba en fase de restauració, era l'església parroquial de Ripoll. Les primeres referències que se'n troben són de l'any 880, any en que se'n va ordenar la seva construcció. D'aquest edifici primerenc no se'n disposen testimonis clars en alçat.

Va ser cap al 890 que el bisbe de Vic, Gotmar, va ordenar la consagració de l'església on s'hi va realitzar una reedificació o ampliació notable. En aquella època era habitual que al cantó dels monestirs s'hi ubiqués una altra església dedicada al servei religiós dels servents del monestir, o per la població que habitava al seu voltant.

Es té notícia que als inicis del segle XI, el temple va ser reedificat amb la construcció d'un edifici més ampli, format per tres naus i tres absis. Es disposa d'importants testimonis romànics en alçat: tres naus, absis central, i part de la façana romànica amb arcuacions llombardes (dues encara són visibles), i una porta de vianants. També se'n conserven alguns pilars i l'arrencament d'un dels arcs formers de la nau central.

En el segle XIII es va executar la fortificació del clos del monestir (es troben referències que podria haver existit una muralla al segle X). Aquesta muralla incloïa l'església romànica de Sant Pere, ordenat per de l'abat del monestir Pere Mola. Es considera que és en aquest moment en que es crea el portal de Sant Pere i l'església perd les àbsides romàniques originals ja que van ser adaptades a la forma de muralla amb els merlets i espitlleres que encara es poden apreciar a la torre de l'actual campanar. No es té coneixement de que va succeir amb l'absidiola del costat de l'epístola.

La continuació de la fortificació de la vila medieval de Ripoll es va dur a terme al segle XIV, en aquests anys es van construir torres i els murs de migjorn i de tramuntana, per tal de defensar el monestir i el temple. És probable que també es dugessin a terme algun tipus de modificació a l'església, no se'n té constància però es determina que fou aquest el motiu pel qual l'accés a l'interior de l'església es desplaçés, el nou accés quedaria per la plaça del monestir. A l'hora també es degué redefinir el nou portal de Sant Pere que donava accés a l'interior de la Vila. No es pot descartar que en aquests anys es realitzés algun tipus de modificació gòtica a l'interior de l'església.

L'església va patir una transformació total a mitjans del segle XVI (data final de les obres 1561). Es van remodelar les tres naus romàniques, se'ls hi va modificar l'eix d'edificació construint nous pilars per tal de sostenir les noves voltes de creueria (voltes de quatre veles). S'interpreta que va ser en aquest fase que les voltes van ser decorades amb dracs en els nervis i tondos a les veles. Es determina que el culte religiós es va seguir realitzant encara amb les àbsides romàniques. Aquestes obres també van suposar la construcció d'un nou campanar a l'angle del temple aprofitant que en aquest punt la muralla també formava un angle. A principis del segle XVII es van finalitzar les obres endegades amb la construcció d'una significativa capçalera barroca definida a partir de sengles voltes oblongues de creueria, adaptació curiosa del projecte arquitectònic del segle XVI. Les obres comporten per altra banda la construcció d'una nova sagristia, no es coneix la ubicació de l'antiga; una nova porta d'accés per la banda del monestir encara visible des de l'interior de l'església, i l'acondicionament total del frontis de l'edifici a la plaça del monestir amb la transformació de la porta monumental, ara d'estil barroc, i la construcció d'unes escales (es van eliminar a mitjans del segle XX, 1955-1958).

A finals del segle XVII es va executar la capella de la Congregació entre l'església de Sant Pere i la Capella de Sant Vicenç del monestir. Aquestes obres van comportar l'obertura d'una porta monumental des de la capçalera de la parròquia (al cantó de la sagristia).

Durant els primers anys del segle XVIII (1808-1814), els francesos van saquejar el temple, i en van destruir també una part. Se'n desconeix l'abast de les destrosses, però aquestes van afectar el campanar, la part del presbiteri i el pòrtic d'entrada. Va ser al 1860 aproximadament quan es van dur a terme les obres per tal d'arreglar el campanar i l'interior de l'església. Es determina que en aquest moment és quan es va dur a terme la decoració pictòrica del mur de la capçalera.

A l'any 1893, es va consagrar la nova basílica del monestir i aquesta va passar a ser l'església de la vila en detriment de Sant Pere. Va ser a partir d'aquests anys que l'edifici va començar a perdre importància en el municipi i en l'entorn eclesiàstic.

Entre el 1920 i el 1929 es va construir el nou Museu Etnològic de Ripoll sobre les voltes de l'església de Sant Pere, projecte de l'arquitecte Josep Pericas, qui va projectar i realitzar també la nova escala helicoïdal d'accés al museu. Aquestes obres van comportar l'eliminació de la porta de l'església que comunicava amb la plaça del monestir. També es va enderrocar una part del mur de capçalera barroca i part de l'absidiola romànica del costat de l'epístola, es va substituir per un mur de còdols. Durant aquestes obres també es van construir els envans que taparien les capelles del costat barroc de l'edifici, algunes amb antics altars del segle XIX. A més a més també es va realitzar una porta central a la capçalera de l'edifici.

Amb l'inici de la guerra civil al 1936, el temple va ser profanat, se'n van destruir els altars i es van cremar les imatges. A partir d'aleshores l'església va quedar sense culte, restant com espai sense ús concret.



24. Retaule major de l'Església de Sant Pere de Ripoll, d'estil Barroc.

Font: Institut Amatller d'Art Hispànic. Arxiu Mas.

Entre els anys 1952 i 1955 es van dur a terme obres per tal d'arranjar tots els desperfectes, es creu que les obres primerament es van dur a terme sota la direcció de l'arquitecte del bisbat, Jaume Pericas. En aquesta reforma es va enderrocar la torre lateral que configurava l'antic portal de Sant

Pere i les seves construccions annexes, fet que va obligar a la realització d'una façana en el lateral de l'edifici. Aquest mur es va dotar d'una rosassa, avui en dia tapiada.

Les obres posteriors realitzades entre el 1955 i el 1958, comporten l'enderroc i la reconstrucció de l'escala lateral d'accés a l'església que s'inicia a la cota de la plaça del monestir. També s'obren finestres a la façana de la plaça. Atenent la cronologia d'aquesta fase i als tipus de materials emprats, s'atribueix a aquest període la volta que actualment cobreix l'àbside romànica i que oculta darrera seu el que probablement seria la volta del segle XIII, volta que va substituir la romànica quan es fa fortificar la vila. No se'n coneix el responsable de la direcció facultativa d'aquestes obres.

12.2 ESSLÉSIA DE SANT JULIA DE VALLFOGONA DEL RIPOLLÈS

12.2.1 EMPLAÇAMENT

L'Església de Sant Julià de Vallfogona de Ripollès es troba situada en terme municipal de Vallfogona de Ripollès. Aquest municipi es troba emplaçat dins la comarca del Ripollès a una alçada d'aproximadament 950 metres sobre el nivell del mar. El temple s'emplaça a 200 metres (extrem llevant) del nucli urbà en un indret anomenat els Ferrissos, al cantó de l'església s'hi troba la carretera que va de Ripoll a Olot pel coll de Coubet.



25. Imatge de la façana principal de l'església de Sant Julia de Vallfogona.

Font: Idòia Torrent

12.2.2 SITUACIÓ ACTUAL

Actualment l'església de Sant Julià es troba tancada degut al seu mal estat de conservació, el bisbat ha cedit els drets d'ús a l'ajuntament de Vallfogona del Ripollès.

La porta d'accés al temple es troba encarada a l'Oest, s'hi arriba des del carrer de Puig de Sant Miquel. En aquest punt on està situada l'església també s'hi ubica el comunidor (just davant la porta principal de l'església) i al Sud el cementiri, tot emplaçat dins la sagrera.

L'església consta d'una sola nau, la seva planta es troba dividida en dues parts de diferent amplada, corresponent a la part romànica (part davantera) i a la barroca al presbiteri (part posterior). Aquesta edificació té adossades entre els contraforts capelles laterals. El presbiteri es troba realçat amb escales respecte la resta de la nau, també incorpora un tabernacle. Aquesta part de l'església és amb volta decorada amb colors vius seguint l'estil barroc popular. Les pilastres sobre les que descansen els arcs torals o formers de la part davantera (romànica), són més amples en la base que en l'arrencada dels arcs.



26. Imatge interior església de Sant Julià de Vallfogona. Font: Idòia Torrent

La porta d'accés del segle XII consta d'arquivoltes, on s'hi poden apreciar pinyes esculpides, els arcs descansen sobre capitells i columnes també molt deteriorades (actualment aquest conjunt es troba en un estat de degradació). La façana principal conserva esgrafiats de principis del segle XIX. A la part central d'aquesta mateixa façana s'hi recolza el campanar. A la dreta de l'església s'hi situa una torre (no està clar si es tracta d'una torre de defensa, aquesta consta només de dues espitlleres).

Actualment, el temple es troba en un estat de degradació molt important, tot i que curiosament, la part romànica és la més ben conservada. A la part barroca és on hi va caure el llamp (fets explicats en l'apartat d'història de l'edifici) i per tant es troba en un estat ruïnós.

12.2.3 HISTÒRIA DE L'EDIFICI

L'església de Sant Julià de Vallfogona actualment es troba en desús degut que gran part de la seva estructura es troba malmesa. Encara que en alguns segles aquest va ser el temple més important de la vall, en l'actualitat l'església on es realitza el culte és a l'església de la Salut.

Les primeres dades que es troben d'aquesta església són del 896, en aquests anys existia una capella preromànica. Posteriorment, al 922 hi va haver la donació del temple a l'alu de Sant Joan de les Abadesses, no es té constància de les característiques arquitectòniques d'aquesta església. Al 960 aquesta capella es va convertir en l'Església més important de la vall quan l'Abadessa Ranlo

del Monestir de Sant Joan de les Abadesses en va encarregar la seva ampliació, no va ser fins al 23 d'Abril del 961 que es va consagrar per part del Bisbe Ato de Vic, aquesta església va ser dedicada a Sant Julià i a Sant Filibert, tot i que avui en dia només es coneix com l'església de Sant Julià. D'aquesta ampliació es coneix que l'edificació constava d'una nau amb una espadanya.

Durant el segle XII el temple es va sotmetre a una reedificació, aquestes obres van consistir en crear una nau dividida per arcs torals amb contraforts. Aquestes reformes es van a dur a terme per part de l'Abadia de Sant Joan de les Abadesses

L'any 1428 hi va haver un terratrèmol a la zona que va causar grans desperfectes a l'església de Sant Julià i a la resta del municipi. A causa d'aquest fenomen la volta romànica va caure i només en va quedar dempeus la façana principal. Posteriorment, durant el segle XV, els Senyors de Pinós es van encarregar de les obres de reconstrucció. La volta va ser reconstruïda amb arcs en ogiva i es va doblar la façana principal, també es va dur a terme la incorporació de la portalada amb arquivoltes esculpides sostingudes per dues columnes a cada banda, amb capitells també esculpits (avui en dia aquests elements arquitectònics es troben en un estat de deterioració greu).

Va ser al 1621 que es va declarar l'estat de ruïna del temple. L'edifici es va sotmetre novament a una reconstrucció, en aquest cas qui va encomanar les obres va ser Joana Francisca de Pinós. Entre els segles XVII i XVIII l'església va patir diferents canvis, es té constància que entre l'any 1573 i 1680 es va executar la capella de Sant Miquel, al 1680 l'execució del campanar anterior i el fossar, al 1691 es va enrajolar la nau, el cor entre el 1705 i el 1747, entre l'any 1708 i el 1746 la porta principal, els confessionaris al 1717 i el púlpit al 1775³¹.

En aquest mateix segle, entre els anys 1738 i 1755, es va anar recopilant material per tal de realitzar obres de reforma a l'església. No va ser fins al 1756 que es van dur a terme les obres d'ampliació del temple seguint l'estil de l'època, el barroc. Aquestes reformes es van allargar fins al 1770, durant aquests anys, per tal d'ampliar l'església es van eliminar els contraforts de la part romànica. Per raons que es desconeixen, aquesta remodelació va quedar inacabada, com a conseqüència, el temple actual està format per una part posterior barroca de grans dimensions i d'una part davantera romànica de dimensions més reduïdes. Per últim, el 1785 es va enderrocar el que havia sigut la casa del monjo, aquesta es trobava adossada a la façana principal (habitatge senzill de dues plantes amb accés des de l'exterior del temple).

³¹ Documentació cronològica recopilada per Jordi Salvat i Comas.

Entre els anys 1808 i 1814 a Catalunya es va tenir lloc la guerra del francès, en aquest període l'església va estar sotmesa a diferents saquejos com a la resta d'esglésies del país.

Anys després, entre el 1936 i el 1939 a Espanya hi va haver lloc la Guerra Civil Espanyola, en aquesta etapa de la història, l'església va ser incendiada. A causa d'aquests fets es va perdre l'altar major, a principis dels anys 40 on hi havia hagut l'altar s'hi va aixecar un tabernacle.



27. Imatge de l'altar major de l'Església de Vallfogona del Ripollès, estil Barroc.

Font: Ajuntament de Vallfogona del Ripollès.

Més tard, a finals dels anys 70 un llamp va provocar l'ensorrament parcial de la part barroca, a partir d'aquell incident l'església va quedar inoperativa, l'església de la Salut va passar a ser l'església principal del municipi. El fet de que l'església de Sant Julià es deixés d'utilitzar i es tanques ha provocat que aquesta s'anés malmetent encara més al llarg d'aquests darrers anys.

Al 1991 es van dur a terme obres de restauració al temple per part de la Diputació a la coberta romànica-gòtica.

Durant aquest darrer segle XXI s'hi han dut a terme diferents obres de consolidació per part de l'Ajuntament, s'ha reconstruït la coberta de la part barroca.

13. LA TERMOGRAFIA APLICADA EN EL PATRIMONI

A continuació s'exposen els resultats obtinguts dels diferents assajos que s'han realitzat als edificis on s'ha aplicat la termografia, tan l'activa com la passiva. En cada un dels edificis, tan a l'església de Sant Julià de Vallfogona com a l'església de Sant Pere de Ripoll, s'hi han realitzat assajos termogràfics passius en tot el seu conjunt per tal de detectar si hi havia presència d'algun tipus d'anomalia o patologia. Un cop detectades les termografies que donaven resultats més singulars, s'ha procedit a realitzar un estudi complet en cada una d'aquestes ubicacions. En cada cas s'ha determinat prèviament segons la bibliografia examinada, si era millor aplicar el mètode passiu o actiu per obtenir els resultats més òptims.

En els diferents assajos termogràfics que s'han realitzat l'objectiu és localitzar zones problemàtiques per un posterior anàlisi, els resultats obtinguts es basen en la comparació de temperatures d'una superfície i no en valors absoluts, és a dir, es tracta d'un anàlisi qualitatiu. Cal deixar clar que el fet de donar temperatures serveix per comparar amb altres valors obtinguts però en cap cas aquestes temperatures determinaran si una element pateix una patologia o no, en cas que existeixi una anomalia es determinarà a partir de la comparació de valors.

En aquest apartat, les imatges digitals que es mostren al canto de les imatges tèrmiques són les que s'han pres amb la càmera termogràfica, d'aquesta manera es pot visualitzar exactament el que està analitzant la termografia. Per aquest motiu, algunes de les imatges adjuntades apareixen fosques ja que per realitzar les termografies no és necessària la presència de llum.

13.1 ELEMENTS DECORATIUS DEGRADATS

13.1.1 TERMOGRAFIA ACTIVA APLICADA EN L'ESTUI D'ELEMENTS DEGRADATS

Durant el procés d'estudi termogràfic de la façana de l'església de Sant Julià de Vallfogona del Ripollès, es va dur a terme la termografia activa. Aquest sistema d'assaig es va considerar oportú en l'estudi dels capitells esculpits que es troben en la portalada principal ja que, com s'ha pogut llegir en els diferents articles de l'apartat 9, d'aquest mateix treball, quan es pretén analitzar un element molt concret o de dimensions reduïdes la termografia activa pot ser un sistema molt útil per tal d'obtenir resultats amb més contrast tèrmic i més precisió.

Aquests capitells es van construir durant el segle XV, avui en dia no es pot determinar que s'hi va esculpir degut al mal estat de conservació en que es troben. L'objectiu de l'aplicació de la termografia en aquests elements ha estat intentar determinar quins possibles elements s'hi van esculpir. Aquest sistema d'assaig s'ha aplicat a tres de les quatre columnes de la portalada ja que una d'elles ja es troba totalment llisa sense cap tipus de dibuix. Els capitells es troben esculpits en tot el seu perímetre, i encara que aquests són circulars la termografia s'ha aplicat en dos angles diferents per tal d'aconseguir dos plans de cada capitell.



28. Imatge portalada Església de Sant Julià de Vallfogona

Font: Idòia Torrent

Per tal de dur a terme la termografia activa, la normativa indica que cal utilitzar sistemes que permetin augmentar la temperatura dels objectes de manera que aquesta escalfor no malmeti el material. En molts casos aquests processos d'escalfaments controlats es realitzen mitjançant focus (la normativa indica que aquest és el millor sistema), però per dificultats tècniques del lloc aquesta calor s'ha aplicat mitjançant un decapador. Abans d'iniciar el procés no s'han estipulat els períodes d'escalfament de la pedra ja que no disposàvem de valors provats anteriorment. Encara que no es disposava d'aquesta dada, si que s'han controlat les temperatures a partir de les imatges tèrmiques observades a temps real a través del visor de la càmera termogràfica, per tal de no sotmetre la pedra a un estrès tèrmic tal que suposes algun perjudici al material.



29 i 30. En les imatges es pot veure el procediment d'escalfament del capitell i la presa d'imatges termogràfiques.

Font: Idòia Torrent.

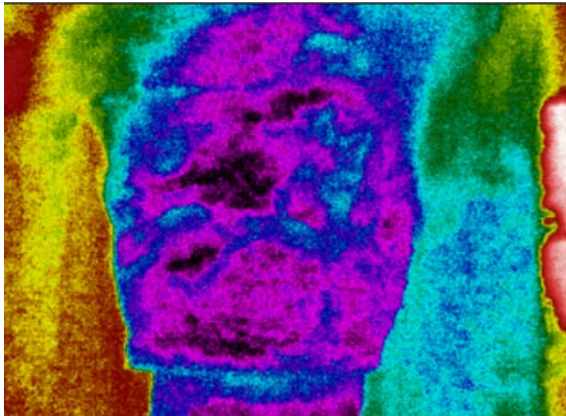
El procediment d'assaig per termografia activa s'ha realitzat seguint la mateixa metodologia pels tres capitells i en cada una de les seves cares establertes. Primer es va prendre una primera imatge termogràfica dels capitells abans d'esser sotmesos a l'escalfament, ja en aquest moment es va fixar la càmera amb un trípod per tal d'obtenir sempre el mateix enquadrament. Seguidament es varen anar prenent imatges sistemàticament durant el procés d'escalfament i també en el de refredament fins que el capitell va tornar a adquirir una temperatura estable pròxima a la temperatura inicial.

Un cop realitzades les termografies s'ha procedit a l'anàlisi de les dades. En aquest cas, el procediment de la termografia activa s'ha comparat amb la informació que s'ha extret de dos dels articles estudiats.

El primer article que s'ha pogut contrastar ha estat l'article *"Inspecció termogràfica infraroja de murs i la caracterització de la degradació dels monuments històrics"* on indica que si en l'aplicació de termografia activa apareixen zones a diferent temperatura (més calentes), dins d'un mateix element de material uniforme, es pot concloure que aquest pateix defectes interns de diferent intensitat.

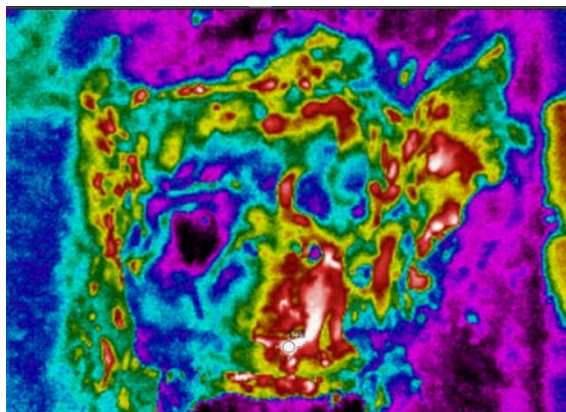
El segon article que s'ha confrontat amb l'assaig realitzat als capitells és l'article *"Les tècniques no destructives com una eina per a la protecció del patrimoni cultural construït"* on a partir de l'estudi que realitzen els autors diuen que, en l'aplicació de la termografia activa, per identificar els elements i analitzar les termografies utilitzen les imatges del procés de refredat.

A continuació s'adjunten les imatges obtingudes en l'assaig de termografia activa en els capitells de la portalada. S'han triat les vuit imatges més significatives de l'assaig, la primera d'elles és la imatge tèrmica inicial quan encara no s'ha aplicat escalfor, la temperatura del capitell és de 10,9°C. Les quatre següents imatges corresponen al procés d'escalfament fins a arribar a una temperatura màxima de 53,8°C, i les tres darreres imatges pertanyen al procés de refredament, arribant a la temperatura estable i pròxima a la original de 28,0°C (cal tenir en compte que durant el procés hi ha hagut incidència solar i per tant no es pot tornar completament a la temperatura inicial).



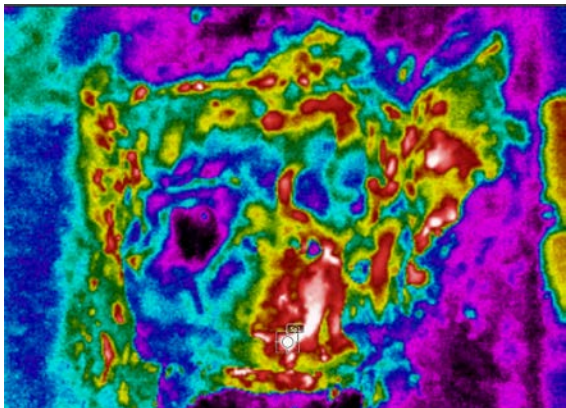
PARÀMETRES	
Tº màx	10,90
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica passiva (sense aplicació de calor) en l'inici de l'assaig.



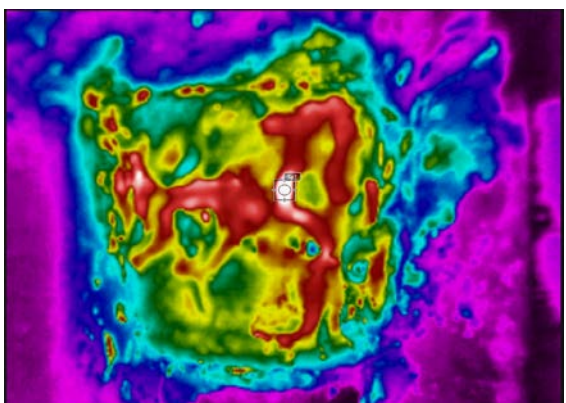
PARÀMETRES	
Tº màx	16,80
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.



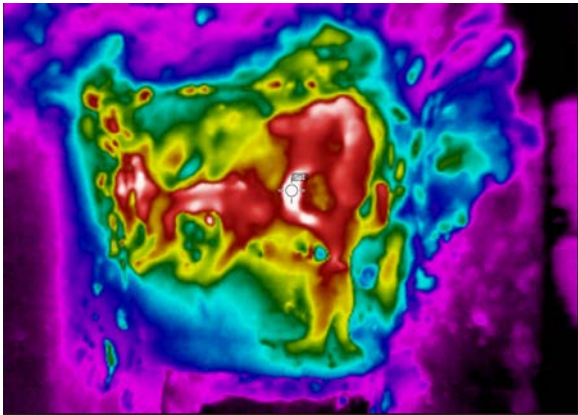
PARÀMETRES	
Tº màx	24,40
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.



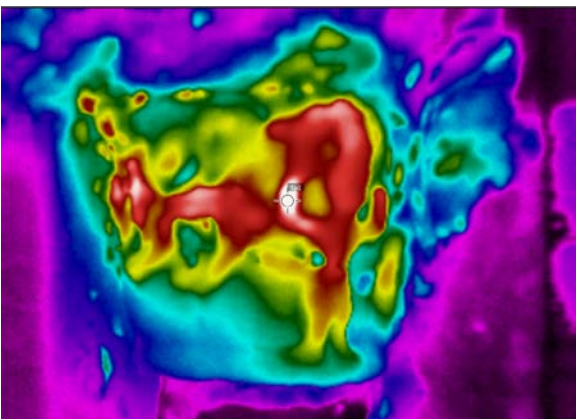
PARÀMETRES	
Tº màx	42,70
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.



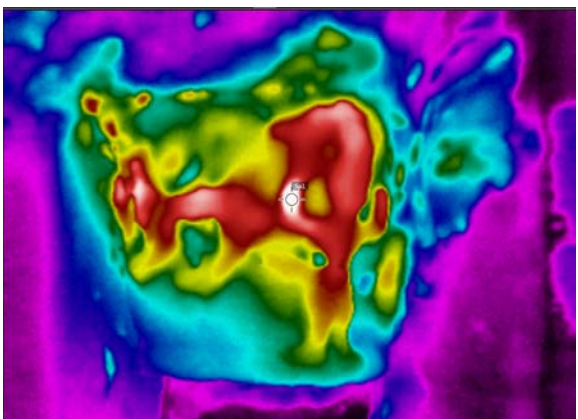
PARÀMETRES	
Tº màx	53,80
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.



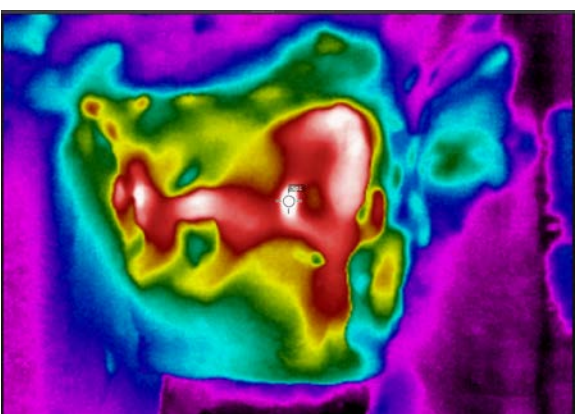
PARÀMETRES	
Tº màx	43,10
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés de refredament.



PARÀMETRES	
Tº màx	39,70
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés de refredament.



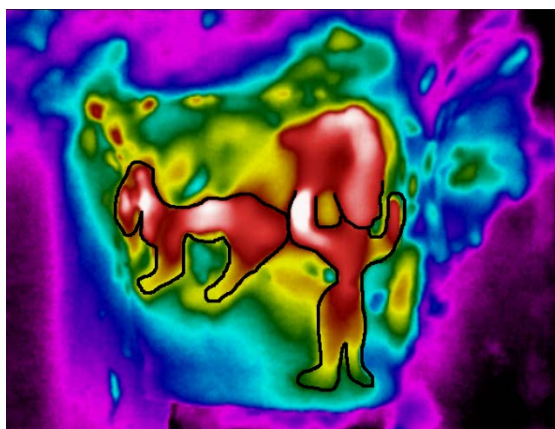
PARÀMETRES	
Tº màx	28,00
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés de refredament.

Un cop tractades les imatges obtingudes, es pot observar que en les imatges dels capitells en estat de repòs (sense aplicació d'escalfor) ja apareixen diferents temperatures dins del mateix element i d'igual material. Segons l'article definit anteriorment, aquestes variacions de temperatura podrien estar representant defectes interns de l'element. En aquest cas però, no es creu que siguin defectes interns, sinó que s'estima que el diferencial de temperatura és degut a que la pedra havia estat esculpida i que ara mostra diferents relleus, aquestes alteracions de profunditat provoquen diferents temperatures superficials visibles a través de les imatges tèrmiques. En les zones on la pedra té un relleu sortint, les temperatures en estat de repòs són més altes en les primeres hores del dia ja que la circulació d'aire escalfa abans aquestes zones, en canvi a última hora del dia mostraran temperatures més baixes ja que la circulació d'aire més fred haurà afectat primer aquestes relleus.

Per altra banda, la termografia activa ha permès determinar alguns dels elements que havien estat esculpits en els capitells, cal dir que només s'ha pogut definir el relleu d'un dels capitells, els altres es trobaven massa degradats (les imatges anteriors corresponen a aquest capitell). S'observa que tot i que les temperatures del procés d'escalfament i de refredament són molt similars les millors imatges s'obtenen en el procés de refredament

Aquest assaig ha ajudat a identificar dues figures esculpides, una d'elles es tracte d'una figura antropomorfa, s'ha identificat el que podria ser una persona amb els braços aixecats i algun tipus d'element a sobre del cap (la part superior del cap, queda unida amb el collarí del capitell i costa definir amb exactitud del que es tracta). El segon element es considera que es algun tipus de figura equina.



31. Imatge termografia activa amb elements esculpits perfilats (figura equina esquerra, figura persona dreta).

Font: Idòia Torrent

A partir d'aquest estudi es pot veure una de les possibles aplicacions de la termografia activa, la identificació d'elements que al llarg dels anys s'han anat desmereixent.

L'assaig a aquest capitell a permès arribar a dues conclusions molt significatives, serà important que en posteriors assajos es tinguin en compte per tal d'obtenir informes amb més rigor i exactitud. Primerament cal redefinir la conclusió que havia establert l'article, on deia que "Amb termografia activa si apareixen zones més calentes dins d'un mateix element pot ser que es tracti de defectes interns". Tal i com s'ha observat en l'assaig, aquestes variacions de temperatura superficial també poden ser degudes a petits relleus de la cara exterior del material. Per tant a partir d'aquest procés de termografia activa realitzat en els capitells es pot dir que:

Quan apareixen variacions de temperatures en les imatges termogràfiques en inspeccionar un element format per un sol material, caldrà primerament observar si aquest pateix alguna alteració en la seva superfície. En cas que sigui totalment uniforme i pla, els canvis de temperatura poden estar indicant patologies a l'interior de l'element.

L'altre conclusió que s'ha definit ha estat a partir de la informació aportada per l'article, on diu que "Es va dur a terme termografia activa, on l'escalfor es va aplicar mitjançant llums òptiques, durant el procés de refredament es va obtenir la imatge tèrmica". A partir d'aquest coneixement, s'ha pretès corroborar si les millors imatges s'obtenen durant el procés de refredament. En el cas dels capitells, aplicant termografia en l'estat de repòs no es pot detectar cap tipus d'element esculpit a la pedra. A mesura que es sotmet aquest a major temperatura, es comença a apreciar algun tipus d'esculpit. No és fins al procés de refredament que es pot detectar amb relativa claredat quins elements havien estat esculpits en el capitell. Per tant doncs la conclusió a que s'arriba després d'aquest assaig és:

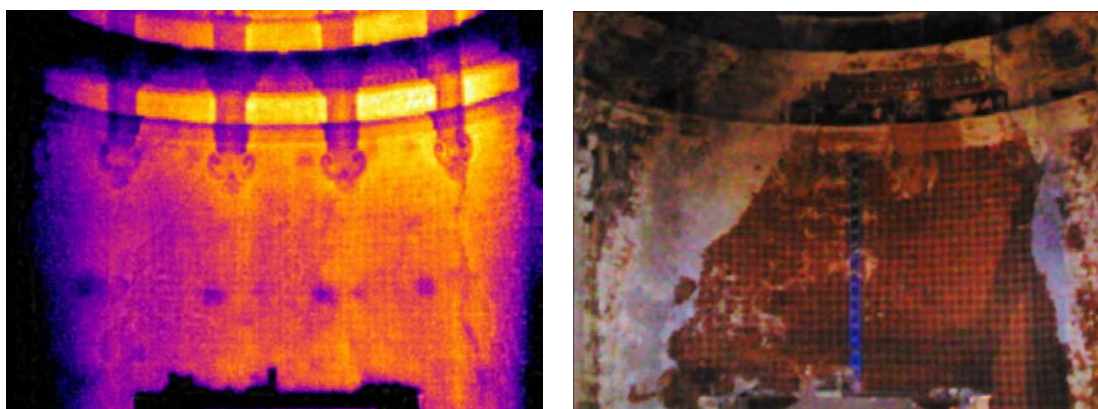
Quan s'aplica termografia activa, les imatges que aporten una informació més clara i amb menys errors són les termografies preses en el procés de refredament.

La justificació d'aquest fet recau en que durant el procés d'escalfat s'està sotmetent el material a una escalfor durant un període de temps concret i de manera no natural, això fa que l'element no s'escalfi seguint la seva pròpia inèrcia. En canvi durant el procés de refredament, donat que es deixa que l'objecte es refredi de manera que cap agent exterior hi influeixi, l'element es refreda de forma natural i seguint la seva pròpia inèrcia, això fa que els relleus quedin definits amb més precisió seguint els relleus originals.

13.1.2 TERMORGAFIA PASSIVA APLICADA EN L'ESTUI D'ELEMETS DEGRADATS

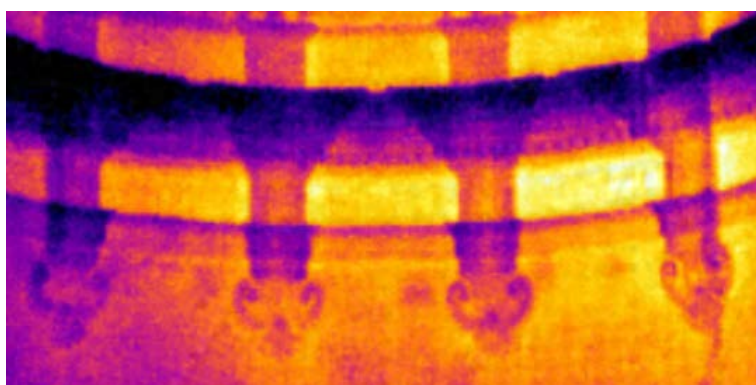
Durant el procés de detecció d'anomalies i patologies de la mateixa església, la de Sant Julià de Vallfogona, es va detectar que la termografia passiva també podia proporcionar resultats en la detecció d'element degradats. Aquests elements decoratius que no es poden apreciar en una inspecció visual simple, però si a través de la termografia, s'han localitzat en el mur de l'absida.

A continuació es poden veure les imatges obtingudes a partir de l'estudi termogràfic.



32 i 33. Imatges tèrmica i digital de l'interior de la façana Est de l'església de Sant Julià de Vallfogona.

Font: Idòia Torrent.



34. Imatges tèrmica ampliada dels elements decoratius de la termografia anterior.

Font: Idòia Torrent.

En aquest cas no s'ha aplicat termografia activa degut a les condicions en que es troba aquest espai, la trobada d'aquest mur amb la façana sud és just el punt on va caure el llamp, i es troba en estat ruïnós.

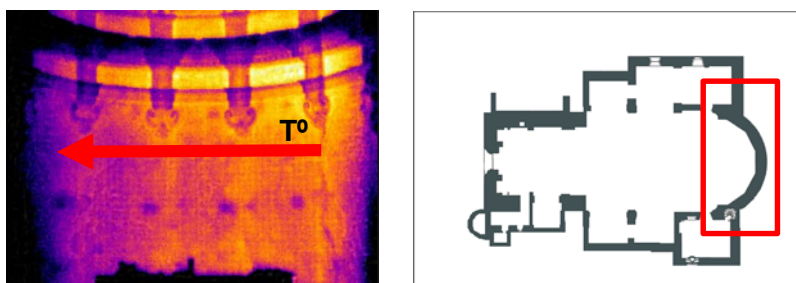
En la recerca d'imatges històriques del temple per a la documentació històrica s'han trobat fotografies d'aquesta mateixa zona de l'església. Gràcies a aquestes imatges, es pot corroborar que el dibuix que revela la termografia es correspon al que hi havia hagut. A continuació, s'adjunta una imatge on es pot apreciar i comparar els elements.



35. Imatges digital dels elements decoratius, presa l'any 2004.

Font: Jordi Salvat.

La termografia del mur de l'àbsida també mostra una altra característica que cal analitzar. En el mur s'hi observa una variació de temperatura progressiva de dreta a esquerra. Aquesta característica tèrmica s'explica mitjançant l'observació de la geometria del mur, aquesta façana presenta una forma corba en la part central, el sol comença a incidir amb més força a la part dreta d'aquesta façana fent que s'escalfi abans. És per aquest motiu que el mur presenta la gradació de temperatura, no es tracta de cap patologia.



36 i 37. Imatge tèrmica i plànol del mur de l'àpside de Sant Julià de Vallfogona.

Font: Idòia Torrent.

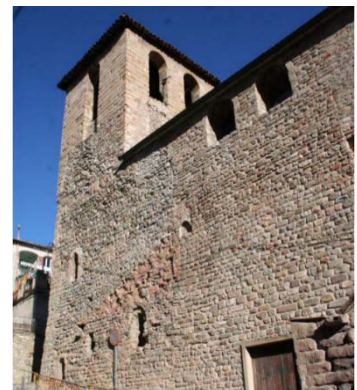
Per altra banda, quan s'estan analitzant murs amb geometria corba cal tenir en compte que la variació de l'angle pot donar una lectura errònia de temperatures en la termografia, caldrà realitzar diferents termografies buscant sempre la perpendicularitat de presa d'imatges.

13.2 DETECCIÓ D'ELEMENTS OCULTS. TERMOGRAFIA PASSIVA

La termografia passiva s'ha aplicat a totes les façanes de les esglésies de Sant Pere i de Sant Julià, tant per l'exterior com a l'interior de l'edifici.

Per realitzar aquestes imatges tèrmiques, es va fixar la càmera termogràfica amb el trípod en un punt centrat de cada façana, des d'on es va executar un escombrat de la totalitat del mur. Aquest procés metòdic es va aplicar ja que, la bibliografia estudiada indicava que amb aquests tipus d'assaig es podien detectar esquerdes, humitats, canvis de material, intervencions, i forats ocults.

Durant l'anàlisi de les imatges s'ha detectat la possible existència de forats ocults, el primer d'aquests situat a la façana Oest de l'Església de Sant Pere de Ripoll. Els altres possibles forats que es van detectar es situen a la façana Est de l'Església de Sant Julià de Vallfogona.



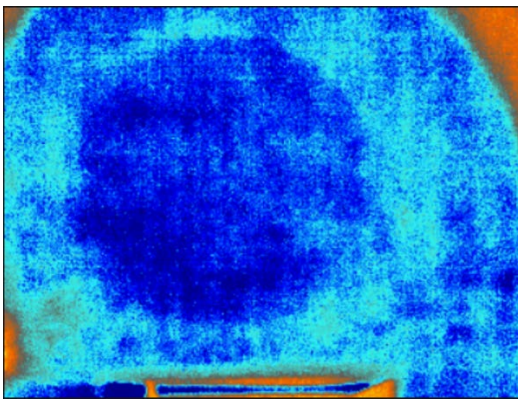
38. Imatge façana Oest de l'església de Sant Pere de Ripoll.

Font: imatge pròpia.

Tal i com s'havia pogut llegir en l'article "*Aplicabilitat de la termografia per la inspecció dels edificis rurals: cas d'una comarca espanyola*", en la determinació de materials i elements ocults, cal observar els canvis de temperatura que en les imatges tèrmiques formen espais molt ben delimitats. Tant si el forat que es troba ocult ha estat tapat amb diferent material o amb un gruix diferent es pot detectar. En el primer cas, quan ha estat tapiat amb un material diferent, és pot identificar l'espai ja que, cada material té unes característiques diferents i per tant radiarà una temperatura específica, en la termografia es podrà detectar el canvi de temperatura i per tant el canvi de material. En el cas de que el forat hagi estat tapat amb un gruix de material diferent, també es podrà identificar, donat

que depenent del gruix, el material tindrà més o menys capacitat d'acumular calor i per tant la termografia detectarà diferents temperatures. Els espais ocults presentaran una temperatura que s'assimilarà més a la dels forats que a la del mur original.

La primera imatge termogràfica analitzada que pot indicar la presència d'un forat tapiat és la que es va realitzar a la façana Oest de l'Església de Sant Pere de Ripoll. En la termografia presa des de l'interior és veu com en la imatge hi apareix una forma circular amb una temperatura molt definida en tota la seva àrea (temperatura mitjana de 17,2°C). Aquesta figura no es pot detectar a simple vista, es veu un mur totalment continu. Aquesta variació de temperatura fa pensar que el mur no està format per un sol tipus de material. Donat que aquesta anomalia es troba situada al damunt de la porta d'accés principal a l'església i que les seves dimensions són considerables, es va determinar que es podria tractar d'un antic rosetó actualment tapiat.



39 i 40. Imatge termogràfica i digital de l'anomalia circular a la façana Oest de l'Església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

Posteriorment, durant la recerca d'informació històrica sobre l'edifici, es va trobar una fotografia on hi surt una part del mur de la façana Oest del temple i també s'hi veu el rosetó. Aquest fet corroborava que en aquell punt hi havia existit una rosassa però que actualment es trobava tapiada.



41. Imatge de l'interior de l'Església de Sant Pere de Ripoll, al fons el rosetó.

Font: Autor desconegut, extreta de l'arxiu municipal de Sant Pere.

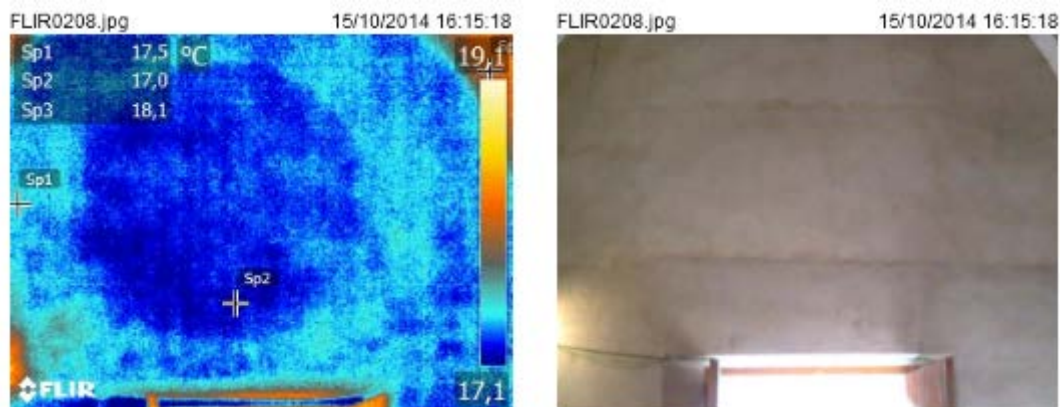
Un cop demostrat a partir de la imatge obtinguda, que es tracta d'un forat ocult en el mur, s'ha procedit a analitzar la resta d'informació que aporta l'article "*Aplicabilitat de la termografia per la inspecció dels edificis rurals: cas d'una comarca espanyola*" sobre aquests elements. L'article indica:

"Determinació de materials i elements ocults:

- *Tapiat amb diferents materials: cada material té unes característiques i per tant radiarà una temperatura específica, en la termografia es podrà detectar el canvi de temperatura i per tant el canvi de material.*
- *Tapiat amb el mateix material però amb diferent gruix: Depenent del gruix del material tindrà més o menys capacitat d'acumular calor i per tant la termografia detectarà diferents temperatures. Els espais ocults presentaran una temperatura més similar a la dels forats. "*

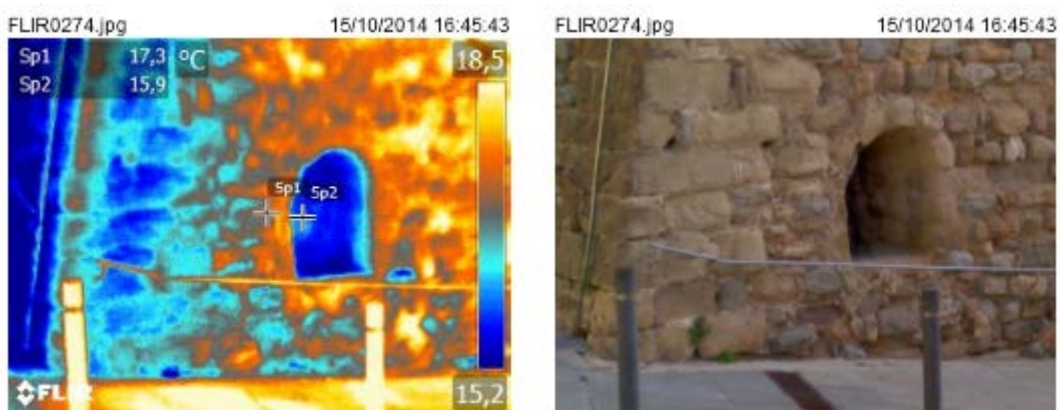
A continuació s'adjunta la imatge de la termografia de la rosassa amb els valors de temperatura per tal de corroborar la informació anterior. En la imatge 33 es pot apreciar que el mur es troba a una temperatura de 17,5°C (SP1), mentre que l'espai on hi hauria el rosetó tapiat es troba a 17,0°C. Aquests valors es comparen amb les temperatures que es mostren a la imatge 35, aquesta es tracta d'una obertura situada a la mateixa façana que el mur estudiat, en aquesta termografia s'aprecia que el mur es troba a 17,3°C mentre que l'obertura es troba a una temperatura de 15,9°C (termografies preses al mateix dia i a la mateixa hora). Donat que la temperatura de l'espai de la rosassa no és similar al de l'obertura, es determina que el rosetó ha estat tapiat amb el mateix gruix

que la resta de mur original, però a amb un material diferent. S'ha pogut comprovar visualment que el gruix és el mateix, per tant es considera correcta la teoria mostrada a l'article estudiat.



42 i 43. Imatges termogràfica i digital de rosetó.

Font: Idòia Torrent.

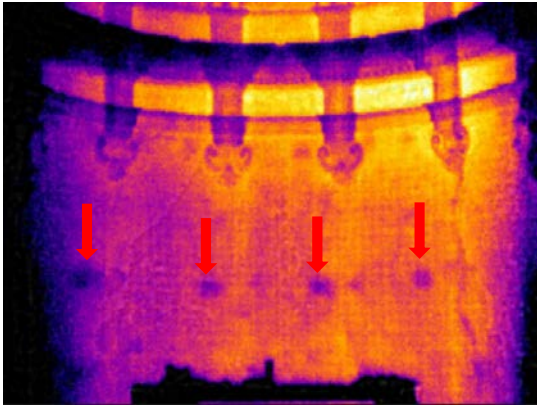


44 i 45. Imatges termogràfica i digital de l'obertura a la façana Oest de l'Església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

Les termografies del rosetó es van realitzar durant la tarda del més d'octubre, en aquest moment del dia a Ripoll la temperatura ambiental ja comença a decaure i el sol deixa d'incidir-hi. Segons les imatges tèrmiques la rosassa mostra un temperatura inferior a la resta del mur. Aquest fet permet pensar que el material que s'ha utilitzar per reomplir el forat és més lleuger que la resta del mur, al tenir menys pes, té menys inèrcia tèrmica i per tant es refreda més ràpidament.

L'altre termografia on s'ha detectat la possible presència de forats ocults està presa a la façana Est de l'Església de Sant Julià de Vallfogona. En aquest cas a la imatge termogràfica hi apareixen quatre taques a amb una temperatura més baixa, aquestes mostren un perfil gairebé quadrat i disposades de manera simètrica en el mur.



46 i 47. Imatges tèrmica i digital de l'interior de la façana Est de l'església de Sant Julià de Vallfogona.

Font: Idòia Torrent.

En aquest cas el mur mostra una temperatura mitjana de $12,2^{\circ}\text{C}$, mentre que les taques es detecten a una temperatura mitjana de $11,3^{\circ}\text{C}$, $11,5^{\circ}\text{C}$, $11,7^{\circ}\text{C}$, $11,8^{\circ}\text{C}$ d'esquerra a dreta respectivament. Aquesta increment de temperatura de les taques a mesura que es desplacen cap a la dreta es degut a que aquest mur té forma circular i per tant al cantó dret hi ha incidència solar més aviat. Es pot dir que les marques es mostren a una temperatura mitjana total de $11,5^{\circ}\text{C}$, això representa una diferència de temperatura de $0,6^{\circ}\text{C}$ respecte el mur.

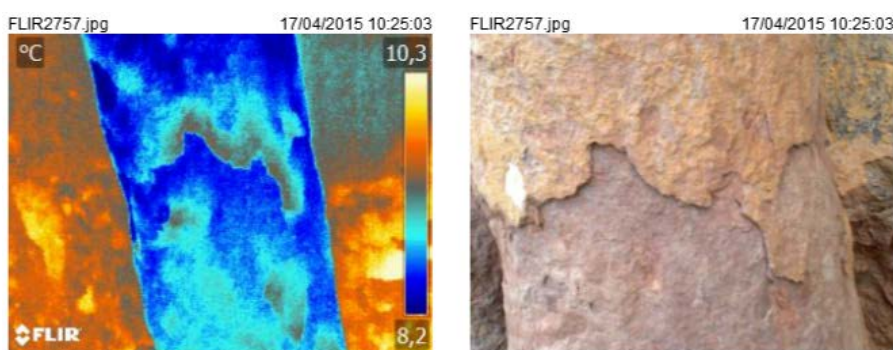
En aquest cas també s'ha comprovat visualment que en els punts on es mostren les diferències de temperatura no hi ha diferència de gruix respecte de la resta del mur. Per tant, seguint el supòsit anterior, es tractaria d'un canvi de material dins del mur. A partir dels coneixements que es disposen dels mètodes de construcció de l'època en que es va formar aquest mur, es determina que possiblement es tractin de forats que s'havien utilitzat per lligar la bastida amb el mur per tal d'anar edificat a la part superior. Així doncs, aquest també es consideren forats reomplerts posteriorment.

13.3 ESTUDI DE LA DEGRADACIÓ DE LA PEDRA. TERMOGRAFIA ACTIVA

A la portalada de l'església de Sant Julià de Vallfogona, es va detectar que en els pilars de les arquivoltes del segle XII situats a l'entrada principal del temple, patien l'anomenat *mal de la pedra* (es denomina així la descamació superficial de la pedra en forma de exfoliacions, sorra i despreniment de les capes externes. L'erosió es deu principalment a la pol·lució, a les substàncies que graviten en l'atmosfera, producte de la combustió, amb la qual cosa es produeix diòxid de sofre que provoca un procés degeneratiu en la pedra).

Per tal de comprovar l'abast d'aquesta patologia greu, s'ha considerat oportú aplicar-hi termografia passiva i activa per tal de contrastar els resultats termogràfics. En l'article "*Patologia de materials de construcció en edificis històrics. Relació entre les proves de laboratori i la termografia infraroja*" s'empra la termografia passiva per l'observació de les descamacions de la pedra. Aquest article indica que les zones amb escates apareixen amb valors més freds en les imatges tèrmiques, degut a que aquestes làmines de pocs mil·límetres separades paral·lelament de la superfície tenen menys inèrcia tèrmica i a més a més hi ha més circulació d'aire a través d'elles.

Un cop realitzades les termografies passives a la pedra escamada s'observa que, contràriament a la informació de l'article anterior, la zona on hi ha material després la temperatura es mostra més elevada.



48 i 49. Imatges tèrmica i digital del pilar de l'arquivolta de l'església de Sant Julià de Vallfogona.

Font: Idòia Torrent.

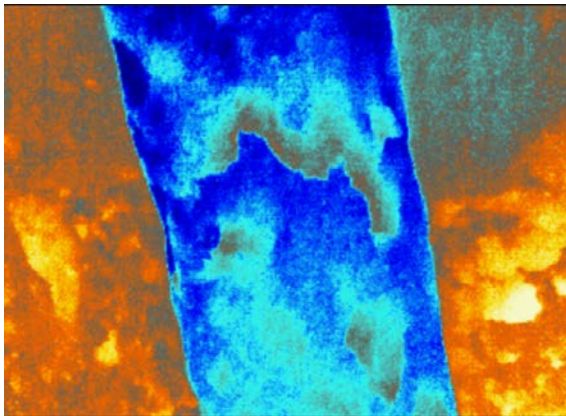
El fet que els resultats obtinguts a la termografia siguin contraris a l'article analitzat, s'atribueix al fet que les imatges s'han pres al mes d'abril. En les zones afectades, el material superficial té pocs

mil·límetres de gruix i queda lleugerament separat la superfície del material, aquest fet fa que tinguin menys inèrcia tèrmica i per tant es veuen més afectades per les variacions de temperatura. Donat que les imatges s'han pres a l'abril, les descamacions apareixen a un temperatura superior en la imatge termogràfica.

Després d'aquesta observació i anàlisi de resultats, cal modificar la conclusió indicada a l'article, on s'afirma que " *On hi ha escates la temperatura a través de la imatge es mostra més freda ja que hi ha circulació d'aire i es refreda*". Quan s'estigui analitzant aquest tipus de patologia caldrà tenir en compte si la temperatura ambient és inferior o superior a la temperatura superficial del material. En cas que la temperatura del mur sigui superior a la temperatura ambiental, les descamacions es mostraran amb valors més baixos que la resta del material, al contrari, quan la temperatura del mur sigui inferior a la temperatura ambiental, la patologia mostrarà valors de temperatura més alts.

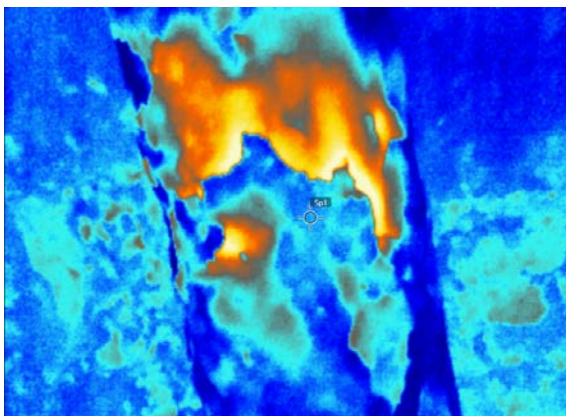
Per altra banda, l'Article "*Inspecció termogràfica infraroja de murs i la caracterització de la degradació dels monuments històrics*" aplica la termografia activa per tal de detectar les patologies provocades pel mal de la pedra. En el seu contingut especifica que les zones on hi ha exfoliació o delaminació la temperatura a través de les imatges termogràfiques apareixerà més calenta. Aquesta afirmació s'entén pel fet de que les descamacions es troben lleugerament separades del material i s'escalfen més ràpidament quan s'hi aplica temperatura (hi ha més circulació d'aire i menys inèrcia tèrmica).

En els pilars de les arquivoltes s'ha aplicat termografia activa per tal de poder contrastar la hipòtesis de l'article. S'ha estabilitzat la càmera termogràfica a una distància de 0.5 metres del pilar enquadrant una de les descamacions observades. A aquesta descamació s'hi ha aplicat temperatura mitjançant un decapador fins a arribar a una temperatura tal que les termografies ja no mostraven variacions significatives. S'han pres termografies durant el procés de refredat successivament fins que el material ha tornat als valors inicials, a continuació s'adjunten vuit imatges tèrmiques d'aquest assaig. La primera mostra la pedra en el seu estat original, la segona termografia mostra la temperatura màxima a la que s'ha arribat durant el procés d'escalfament, i les següents termografies mostren el procés de refredat.



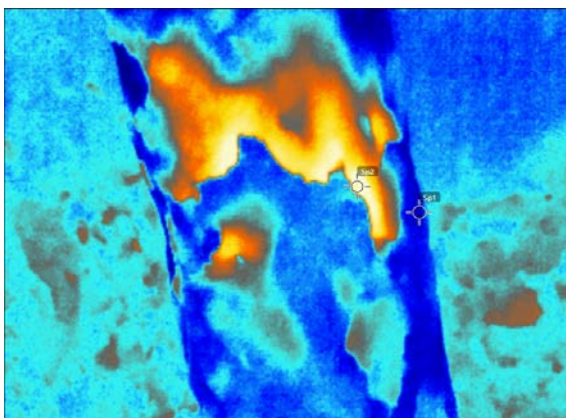
PARÀMETRES	
Tº màx	9,4
Tº mín	8,1
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica passiva (sense aplicació de calor) en l'inici de l'assaig.



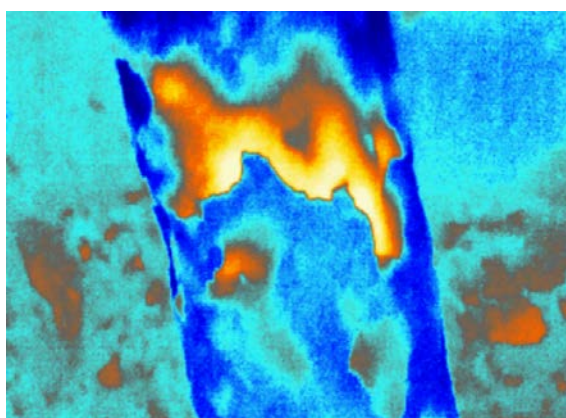
PARÀMETRES	
Tº màx	15,2
Tº mín	8,6
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.



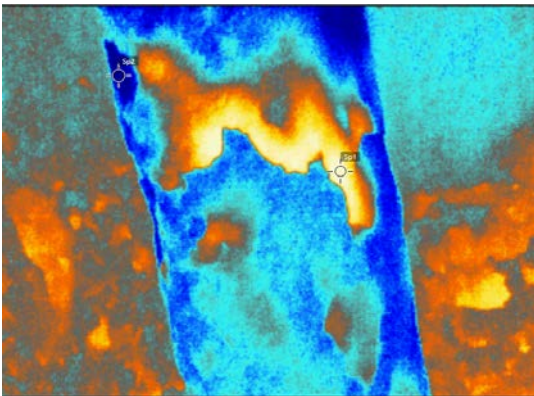
PARÀMETRES	
Tº màx	13,50
Tº mín	8,3
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés de refredament.



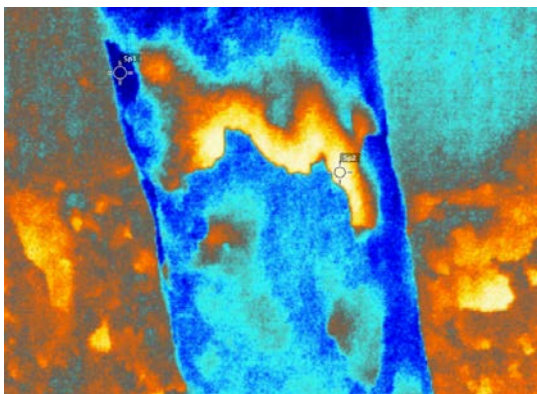
PARÀMETRES	
Tº màx	11,90
Tº mín	8,0
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés de refredament.



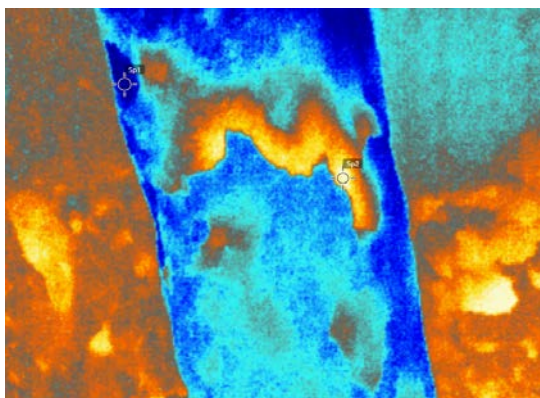
PARÀMETRES	
Tº màx	10,7
Tº mín	7,7
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés de refredament.



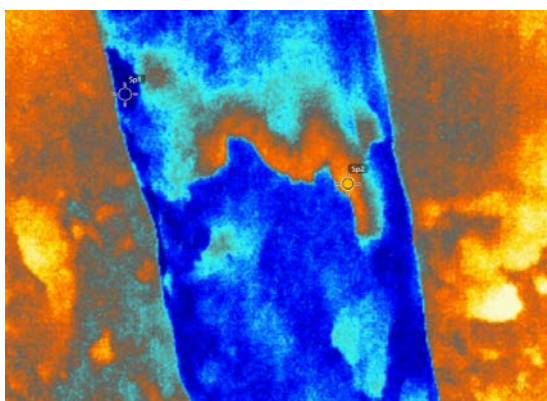
PARÀMETRES	
Tº màx	10,30
Tº mín	7,7
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

Imatge termogràfica durant el procés de refredament.



PARÀMETRES	
Tº màx	9,80
Tº mín	7,7
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

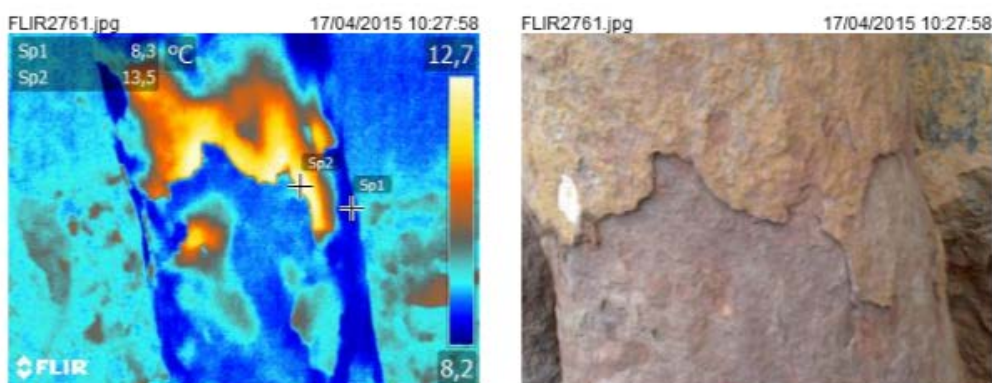
Imatge termogràfica durant el procés de refredament.



PARÀMETRES	
Tº màx	9,40
Tº mín	7,6
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	8,00
Humitat relativa	58,00%

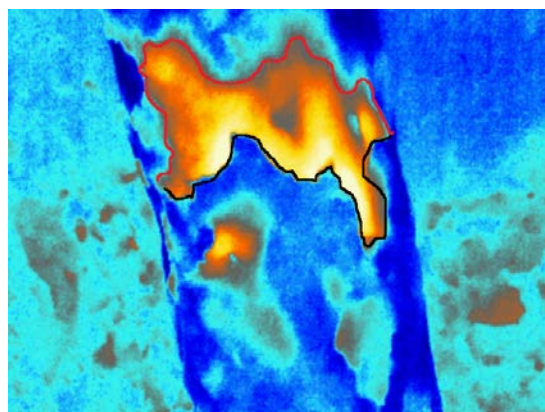
Imatge termogràfica durant el procés de refredament.

En aquestes termografies actives, s'observa com el decapador ha escalfat tota la zona afectada, on es pot observar l'abast de la patologia. En una imatge visual a simple vista, es pot veure el perímetre de la descamació però no es pot determinar l'abast de la patologia, mentre que amb les imatges tèrmiques si que es pot assenyalar fins a quin punt arriba la separació del material (perfil vermell imatge 50). Amb aquest mitjà és més fàcil identificar el grau d'importància del dany ocult.



50 i 51. Imatges tèrmica i digital del pilar de l'arquivolta de l'església de Sant Julià de Vallfogona.

Font: Idòia Torrent.



52. Imatges tèrmica del pilar de l'arquivolta de l'església de Sant Julià de Vallfogona. S'hi observa amb perfil negre el perímetre de la descamació i amb perfil vermell la profunditat de la patologia.

Font: Idòia Torrent.

Després de realitzar aquest anàlisi s'observa que les dades obtingudes en l'assaig de termografia activa realitzat, corroboren la informació obtinguda en l'article.

13.4 DETECCIÓ D'HUMITATS. TERMOGRAFIA PASSIVA

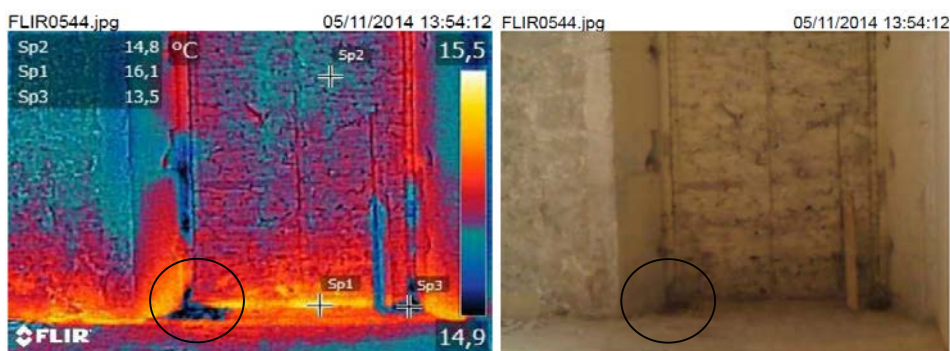
La humitat és una de les patologies més estudiades en els assajos termogràfics, aquest fet es fa evident en els articles estudiats en la bibliografia d'aquest treball. Molts d'ells inclouen valoracions d'aquesta problemàtica dels elements constructius.

En els articles inclosos en aquest document es fa referència a la manera en com es pot detectar humitat a través de les imatges tèrmiques. Segon la bibliografia, la característica més evident per detectar aquest tipus de patologia és que, generalment les humitats presenten valors de temperatura més baixos a primera hora del matí en comparació a la resta dels elements que apareixen a la imatge. Aquest fet és degut a que l'aigua té una inèrcia tèrmica molt elevada i per tant necessita més incidència de temperatura o més contrast tèrmic per canviar la seva temperatura. En l'article "Patologies dels materials de construcció en edificis històrics. Relació entre les proves de laboratori i la termografia infraroja", s'avaluen les característiques tèrmiques dels material que estan humits (per agents externs en moments determinats) i es troben en el procés d'assecat. El document conclou que *en el moment en que s'inicia el procés d'assecat dels materials humits, la temperatura cau significativament a causa de la transformació de líquid a gas. Amb el temps, el material perd la humitat i la temperatura tendeix a igualar-se amb la temperatura de l'aire que l'envolta.*

A continuació es mostren dos casos en que s'han detectat humitats durant l'estudi termogràfic realitzat a Sant Pere de Ripoll. El primer cas d'humitat s'ha detectat quan s'estudiava mitjançant termografia la façana est del temple, concretament en l'encontre de la porta que es situa a la dreta de l'altar, amb el mur vertical i el forjat inferior. En l'anàlisi de les imatges tèrmiques s'ha pogut analitzar els diferencials de temperatura entre els elements constructius i la taca d'humitat, el mur i la porta presenten valors de temperatura molt similars (14,3°C i 14,8°C respectivament), mentre que la taca més fosca mostra una temperatura de 13,5°C (més d'un grau de diferència).

Donat que aquest taca humida és visible en les imatges digitals s'ha pogut corroborar la informació aportada pels diferents articles estudiats. Per tant doncs, es pot arribar a la conclusió que *quan es detecten taques definides o amb gradients tèrmics en imatges termogràfiques a menor temperatura es pot tractar de la presència d'humitat en el material.*

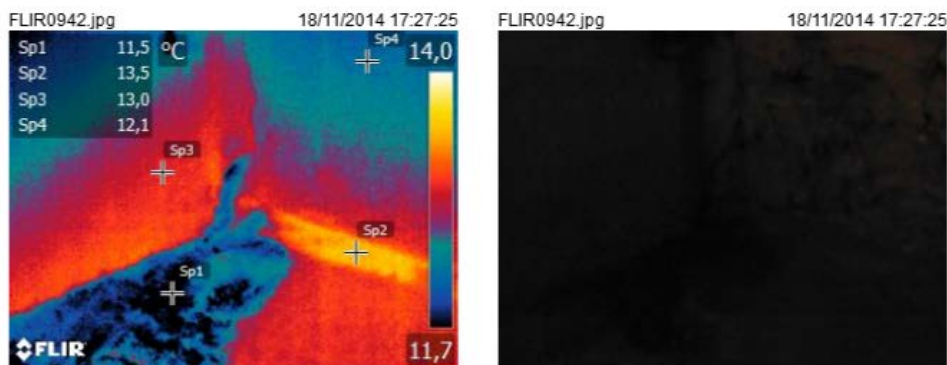
Seguidament, s'adjunten les imatges tèrmiques i digitals de la taca d'humitat descrita.



53 i 54. Imatges tèrmica i digital del mur i la porta de la façana est de l'església de Sant Pere de Ripoll (es mostra dins del cercle la taca d'humitat).

Font: Idòia Torrent.

Dins de l'església de Sant Pere de Ripoll també es s'ha detectat una altra zona on apareix una taca (negre). En aquest cas, hi ha més diferencial de temperatura entre les zones seques i la zona suposadament humida (les zones seques presenten valors de temperatura d'entre 12,1 i 13,5°C mentre que la zona humida es troba a 11,5°C). A partir de la conclusió arribada en l'exemple anterior, s'ha pogut determinar que es tracta d'una taca d'humitat.



55 i 56. Imatges tèrmica i digital del forjat situat a la zona est de l'església de Sant Pere de Ripoll (la imatge digital es mostra negra degut a que s'ha realitzar sense llum).

Font: Idòia Torrent.

13.5 DETECCIÓ DE MATERIALS DE RESTAURACIÓ. TERMOGRAFIA PASSIVA

Sovint, en els processos de restauració s'han utilitzat materials diferents als emprats originàriament en les construccions. Aquesta pràctica en alguns casos ha ocasionat més patologies en els edificis històrics, degut a la incompatibilitat fisicoquímica entre els materials de calç o morters de guix primitius amb els morters de ciment utilitzats més recentment.

L'article "*Les tècniques no destructives com una eina per a la protecció del patrimoni cultural construït*", indica que es pot dur a terme una avaluació del rendiment dels materials de restauració en grans superfícies mitjançant la termografia. També subratlla que els materials tenen diferents comportament tèrmics, els morters originals arriben a temperatures similars a les de les pedres, mentre que els morters de restauració de ciment arriben a temperatures molt més elevades.

El procediment de detecció dels materials de restauració també queda definit en l'article "*Aplicacions de la termografia infraroja i l'espectroradiometria en l'estudi del deteriorament del patrimoni arquitectònic nacional*". En aquest document però s'aplica aquesta tècnica per zones de murs més petites i assenyala que, quan es detecten petites àrees ben definides a una temperatura clarament superior (fins a 1°C de diferència) respecte la resta del mur, es tracta de l'aportació de nous materials de restauració.

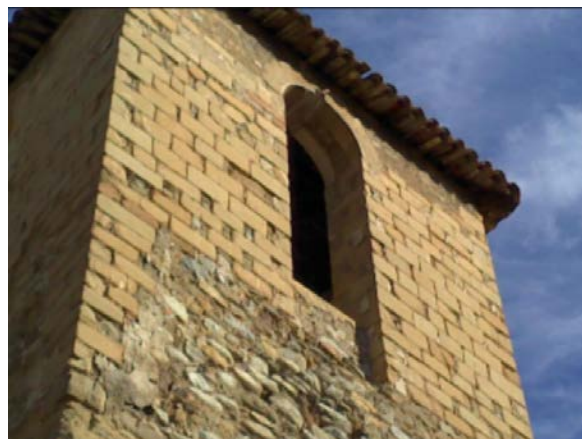
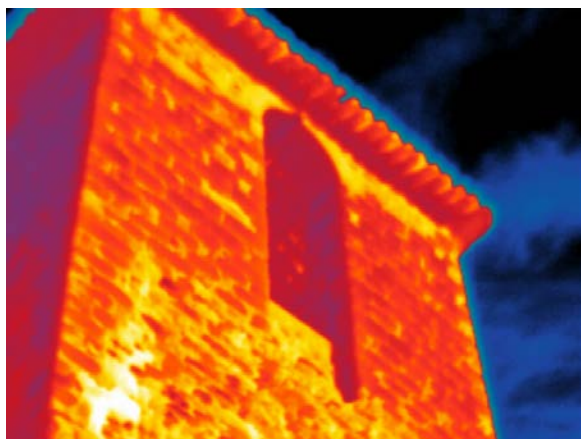
En l'estudi termogràfic (termografia passiva) de les façanes de Sant Pere de Ripoll s'han detectat dos punts on hi ha presència de materials de restauració. Tots dos punts es troben a la part superior de la torre situada a entre les façanes sud i est.

En un d'aquests punts, els materials de restauració són totalment visibles. La torre originàriament estava formada per blocs de pedra, mentre que la restauració d'aquesta a la part superior de la torre s'ha realitzat amb materials de fabrica (bloc ceràmic perforat). Tot i que aquests materials de restauració ja són visibles a simple vista, s'ha cregut convenient estudiar-ne les variacions tèrmiques i el comportament per tal de corroborar la informació aportada per la bibliografia i també per tenir dades per a posteriors anàlisis termogràfics.

En la imatge es poden veure els dos materials a diferent temperatura. Els articles només assenyalen que quan s'utilitzen morters de restauració de ciment, aquestes es mostren en les imatges termogràfiques a major temperatura degut a la seva impermeabilitat. En aquest cas, s'observa que el material ceràmic es mostra a menor temperatura respecte a la pedra original. Les peces

ceràmiques es troben a una temperatura mitjana de 20,4°C i la resta de mur de pedra a una temperatura mitjana de 22,9°C (fins a 2,5°C de diferència).

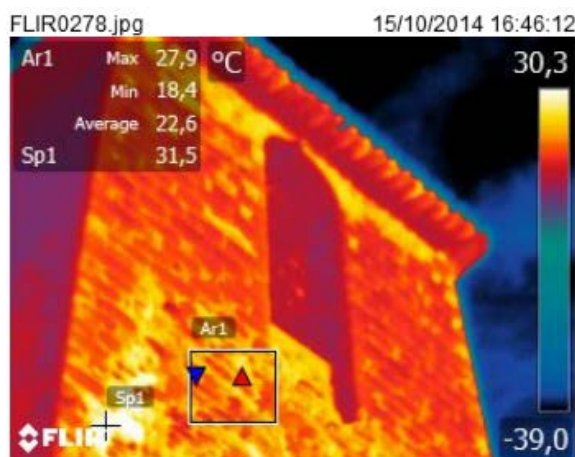
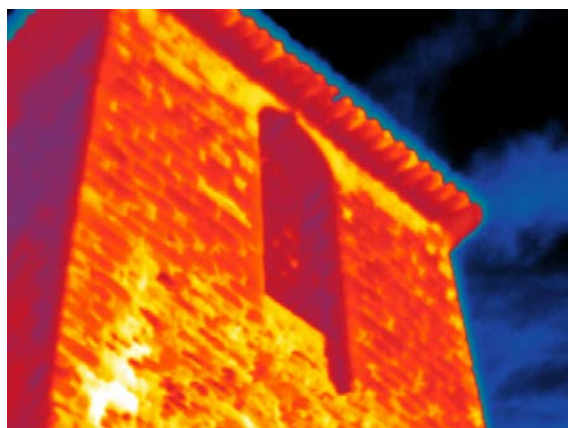
Es considera que aquest fet succeeix degut a que la termografia s'ha pres una tarda al mes d'octubre, a aquest hora a la població de Ripoll les temperatures ja disminueixen, el bloc ceràmic té menys pes i menys inèrcia tèrmica i per tant es refreda més ràpidament.



57 i 58. Imatge termogràfica i digital de la torre (façana sud) de l'Església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

En la mateixa torre s'ha detectat un altre punt on hi apareixen materials de restauració, en aquest cas en les imatges tèrmiques es visualitzen diferents taques molt localitzades a major temperatura.



58 i 60. Imatge termogràfica de la torre (façana sud) de l'Església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

El mur es mostra a una temperatura mitjana de 22,9 °C mentre que aquestes zones diferenciades es presenten a una temperatura de fins a fins a 31,5 °C. En aquest cas, la informació aportada per la termografia i la bibliografia pràcticament coincideixen, tot i que els diferencials de temperatura en el cas de Ripoll són superiors als que s'indicava en l'article. Tot i així, es determina que es tracta d'espais on s'hi ha aplicat morter de ciment per a la fixació de les pedres originals.

Un cop observades les termografies i analitzats els resultats obtinguts amb els dos tipus de materials de restauració que s'han trobat, caldrà incloure diferents matisos a les conclusions arribades en els articles. *Els materials de restauració apareixeran a menor temperatura en les termografies quan aquests siguin més lleugers (materials ceràmics) i a major temperatura quan es tracti de morters de restauració tipus ciment*

13.6 DETECCIÓ DE PINTURES DETERIORADES O OCULTES. TERMOGRAFIA PASSIVA I TERMOGRAFIA ACTIVA.

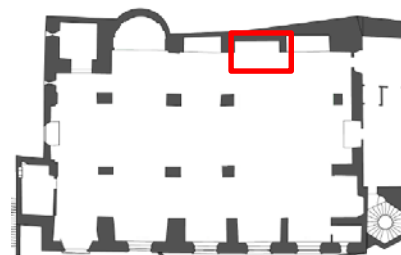
Tot i que no es disposa de documentació bibliogràfica sobre la detecció de pintures a través de la termografia, s'han dut a terme diferents assajos per tal d'analitzar si aquesta tecnologia és apte per detectar les pintures que han estat cobertes per algun material.

S'han analitzat diferents pintures, tan de l'església de Sant Pere de Ripoll com la de Sant Julià de Vallfogona. Algunes d'aquestes pintures estudiades han estat cobertes per materials com guix, altres pintures plàstiques, pintures amb base de calç o guix, sutge (les dues esglésies han patit cremades), o brutícia.

Per tal de verificar si a partir de les imatges termogràfiques es pot detectar pintures ocultes, s'han identificat els espais d'ambdues esglésies on es coneix que hi ha presència d'aquestes. Primerament s'ha realitzat la identificació visual per tal d'establir que es pot veure a simple vista, seguidament, donat que no es té coneixement de quin és el millor sistema d'assaig termogràfic s'ha realitzat termografia passiva i activa a cada zona.

Els dos sistemes d'assaig, tant la termografia passiva com l'activa s'han realitzat amb una lent de proximitat, per tal de poder-se acostar més a la zona a analitzar i tenir una millor visualització i enquadrament de la imatge. La càmera s'ha fixat amb el tríode ja que, com que s'està analitzat una superfície amb molt de detall i proximitat és important que mentre s'estan disparant les termografies, l'aparell es trobi totalment immòbil.

La primera pintura que s'ha analitzat és la que es troba situada a una de les voltes de la nau lateral de l'església de Sant Pere de Ripoll. Aquesta pintura es troba degradada però se'n conserven alguna detalls. S'inicia l'estudi amb aquesta termografia ja que les seves condicions permeten visualitzar a simple vista els dibuixos que havien format les pintures, d'aquesta manera es podran identificar el mapa tèrmic creat per la càmera termogràfica i valorar les temperatures obtingudes.



61. Planta de l'església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent



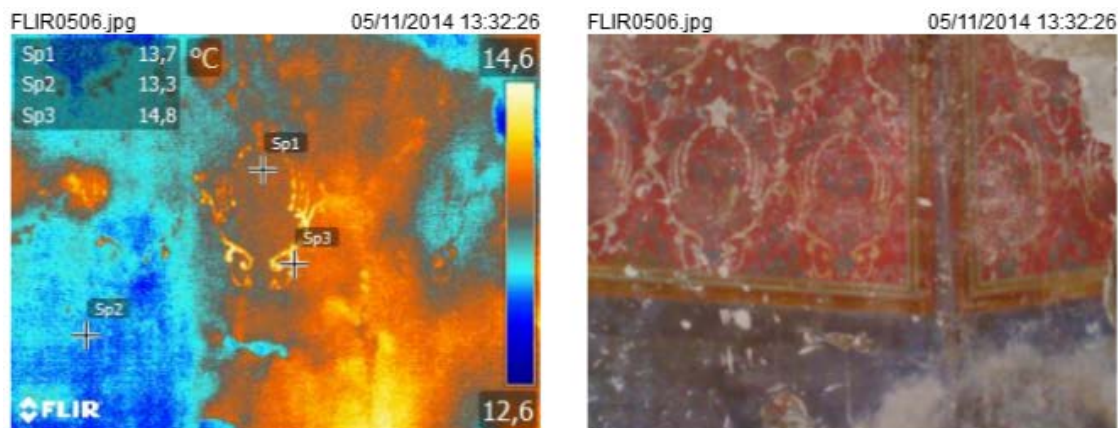
62. Imatge de les pintures situades a la volta de la nau de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

Un cop observades les pintures s'ha fixat el trípod i s'ha procedit a realitzar l'estudi de termografia passiva en aquest punt. S'ha realitzat una sola imatge, on es pot visualitzar mur amb diferents pintures i mur on no hi ha pintures per tal de poder comparar les temperatures.

L'assaig revela que a través de la termografia no es poden visualitzar les diferents pintures que hi ha al mur. En el mapa tèrmic hi apareix una taca a una temperatura més elevada (temperatura mur 13,3°C, temperatura taca 13,7°C), donat que es troba situada a l'encreuament dels dos murs, es considera que aquest diferencial de temperatura és degut al fenomen dels murs adjacents.

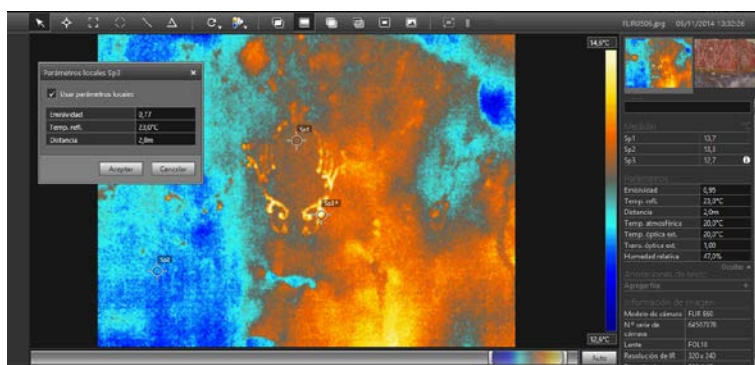
Quan dos murs es troben en contacte, en la seva junta tendeixen a mostrar una temperatura més elevada, degut a la concentració de temperatura i que són punt sotmesos a més esforços.



63 i 64. Imatge termogràfica i digital de les pintures situades a la volta de la nau de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

En la termografia, una de les pintures un cop ajustats el valors en el software si que es visualitzen a través de les imatges tèrmiques. Tal i com s'ha indicat abans el mur es troba a una temperatura d'entre 13,3 °C i 13,7 °C depenent de si es tracta de la zona més pròxima a la junta o no, mentre que el perfil de pintura que s'observa en la termografia es mostra a una temperatura de 14,8 °C. Es detecta una diferència de temperatura de fins a 1,5 °C, aquest fet és degut a que aquests perfils de pintura es varen realitzar amb pintures amb components metàl·lics. Els metalls tenen un valor d'emissivitat molt inferior als materials de construcció, per aquests motius en el mapa tèrmic apareixen a temperatures molt més elevades. Si es corregeix la emissivitat pel punt on es troba aquest tipus de pintura (es considera que l'emissivitat de la pintura amb poc component metàl·lic és de 0,77 - segons la bibliografia estudiada-), els valors de la temperatura baixen fins a 12,7 °C.



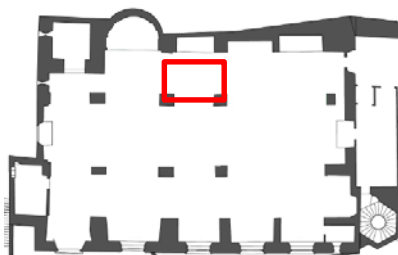
65. Imatge del software de tractament d'imatges termogràfiques.

Font: Idòia Torrent.

S'ha executat termografia activa en aquesta mateixa zona per observar si presenta algun tipus de diferència o millora de la visualització. En aquests cas la termografia passiva i l'activa no presenten diferències significatives.

Es pot concloure doncs, que amb *termografia passiva es pot millorar la visualització de pintures quan aquestes estan composades per elements metàl·lics*. En aquest cas no es pot determinar si aquest tipus de pintures es podrien detectar en el cas que es trobessin cobertes per algun tipus de material ja que aquestes es troben totalment al descobert.

Aquest mateix procés s'ha dut a terme en un altre punt de l'església, concretament a la vela i al nervi d'una de les voltes de mocador de la nau.



66. Planta de l'església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

El mètode ha estat el mateix, primerament s'ha observat aquesta punt a simple vista per tal de poder identificar què es pot detectar sense el suport de la termografia.



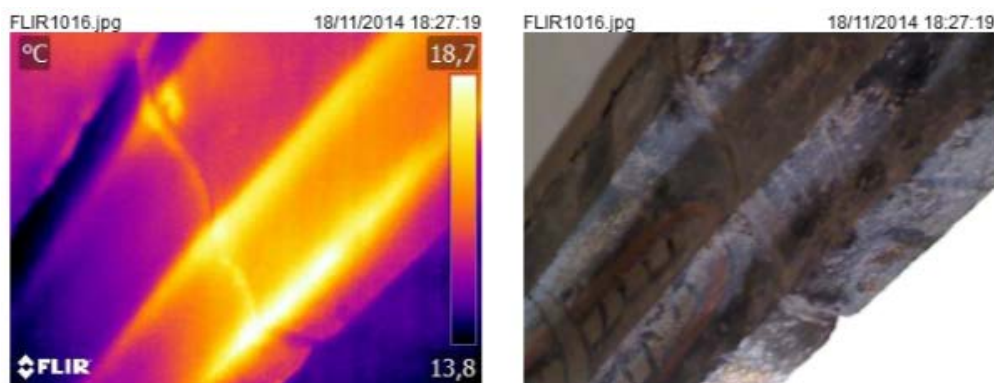
67. Imatge digital, pintures situades al nervi de la volta de l'església de Sant Pere de Ripoll.

Font: Idòia Torrent.

Al llarg dels anys, les voltes han estat cobertes per diferents capes de pintures i residus, tant en les veles com en els nervis que la formen. Donat que en el mateix període en que s'han realitzat els estudis termogràfics de l'església també s'han dut a terme les tasques de restauració de l'església s'han pogut visualitzar les pintures ocultes en els nervis.

En la imatge anterior es pot observar una de les pintures que s'estan restaurant, s'hi pot identificar clarament una boca amb ullals esmolats d'un drac, aquestes pintures s'han pogut datar gracies a que en un dels nervis s'hi ha trobat la data 1561 (Gòtic tardà).

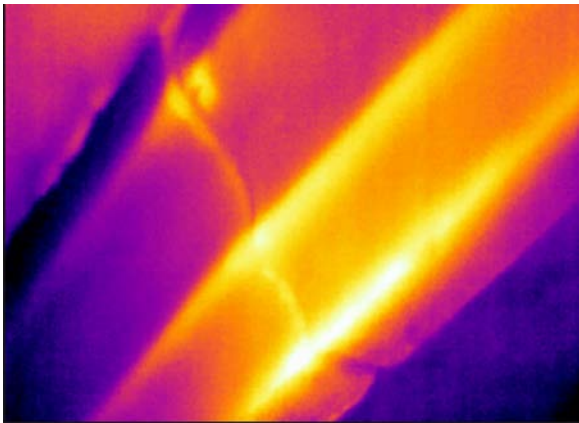
Donat que es disposa de pintures que ja estan al descobert i pintures que encara estan ocultes per les diferents capes (pintures, morters, sutge, etc.) s'ha procedit a realitzar assajos termogràfics en els dos espais per tal de detectar què es pot apreciar a través de les imatges tèrmiques en pintures ocultes. Primerament s'assagen les pintures descobertes per tal de valorar els valors de temperatura i els mapes tèrmics generats per la càmera. Aquest assaig s'inicia amb la realització d'una imatge termogràfica passiva del nervi i les seves pintures, aquesta imatge indica que la temperatura màxima del conjunt és de 19 °C, i pel que fa al mapa tèrmic no s'hi pot visualitzar les pintures del drac, en canvi, si que es visualitzen en la imatge digital.



68. Imatge tèrmic i digital del drac en el nervi de la volta l'església de Sant Pere de Ripoll.
Font: Idòia Torrent.

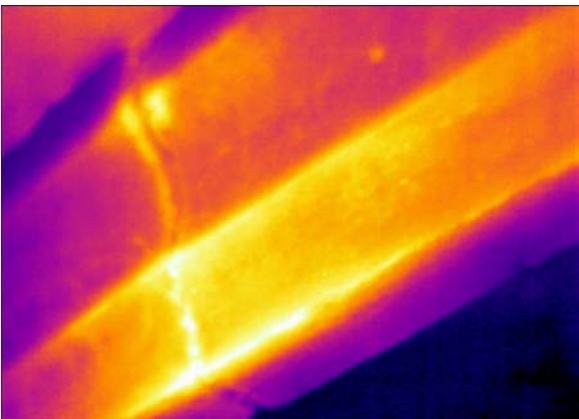
En aquest assaig queda demostrat doncs, que les pintures del drac no es poden visualitzar a través d'una termografia passiva. És per això que s'ha procedit a continuació a realitzar un assaig termogràfic actiu. En aquest cas el procediment d'escalfat s'ha realitzar amb focus a una distància de 0.5 metres per tal de no malmetre les pintures gòtiques. En les imatges següents si pot apreciar les variacions dels mapes tèrmics en funció de la temperatura a la que arriba la pedra un cop escalfada.

Les termografies actives que es mostren en les imatges no tenen totes el mateix enquadrament degut a problemes tècnics, durant l'assaig també s'hi estaven realitzant tasques de restauració i ha calgut moure lleugerament la càmera. Les termografies s'han pres des del mateix costat i donat que en aquest cas per a la valoració no era important els valors de temperatura, sinó el mapes tèrmics, s'ha considerat l'estudi correcte.



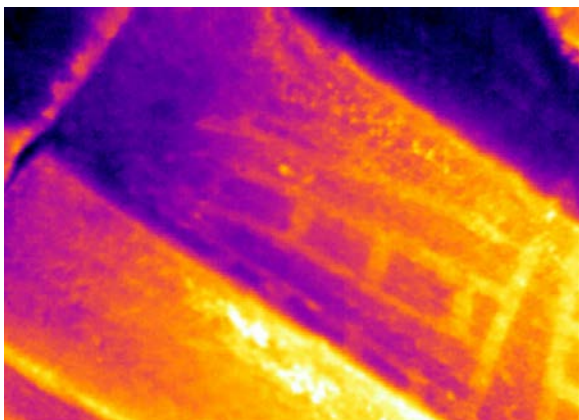
PARÀMETRES	
Tº màx	19,00
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%

Imatge termogràfica passiva (sense aplicació de calor) en l'inici de l'assaig.



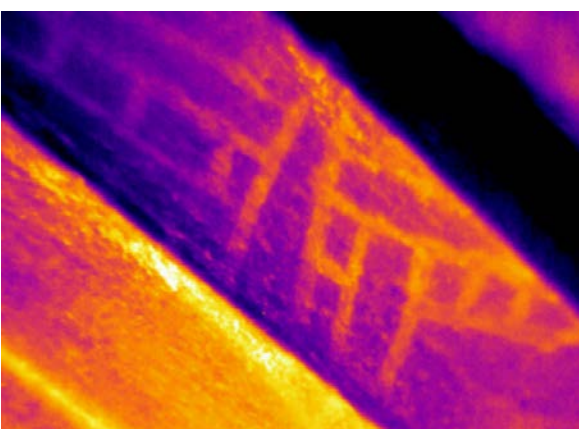
PARÀMETRES	
Tº màx	21,00
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.



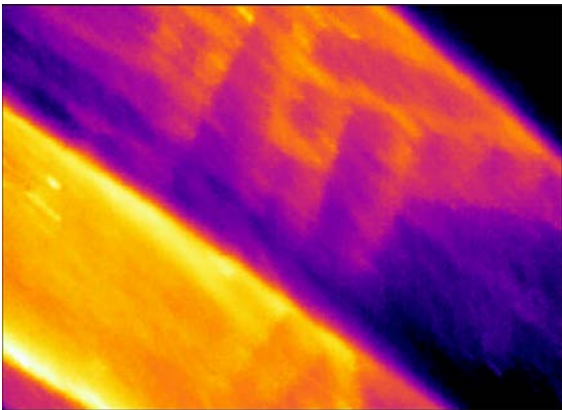
PARÀMETRES	
Tº màx	22,20
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.



PARÀMETRES	
Tº màx	28,80
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.

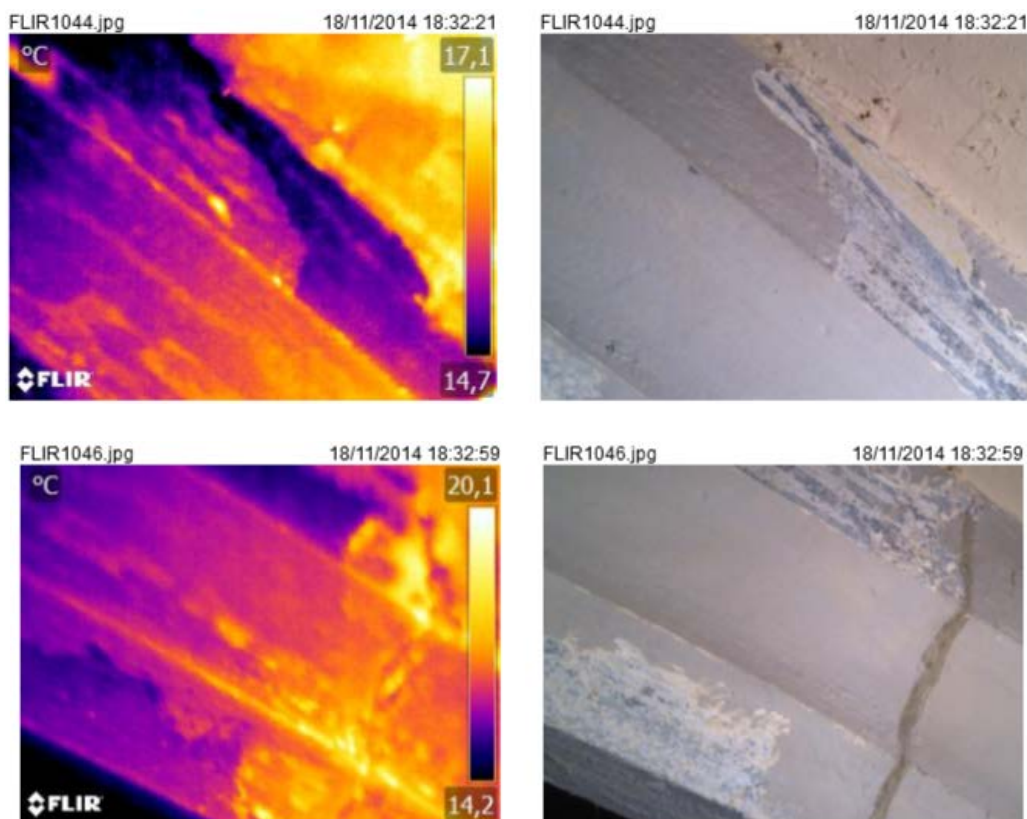


PARÀMETRES	
Tº màx	21,70
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%

Imatge termogràfica durant el procés De refredat.

A partir de les imatges de la termografia activa, es pot observar que aquests tipus de pintures només són detectables a través de la termografia quan s'aplica un assaig actiu. En la imatge termogràfica d'inici de l'assaig (estat de repòs) no es poden apreciar les pintures, en canvi a mesura que es va escalfant el nervi de la volta les pintures es van perfilant cada vegada més i s'acaba observant clarament la boca del drac. A diferència dels altres assajos actius que s'han realitzat fins al moment, en aquests, les imatges més clares i precises s'obtenen en el punt d'escalfor màxim (28,8 °C).

Caldrà observar doncs, si en els assajos de termografia activa que es realitzaran a les pintures cobertes per altres materials, en el moment de màxima temperatura es poden apreciar els dibuixos.



69. Imatge tèrmic i digital de dos punt diferents del nervi de les voltes de l'església de Sant Pere de Ripoll.

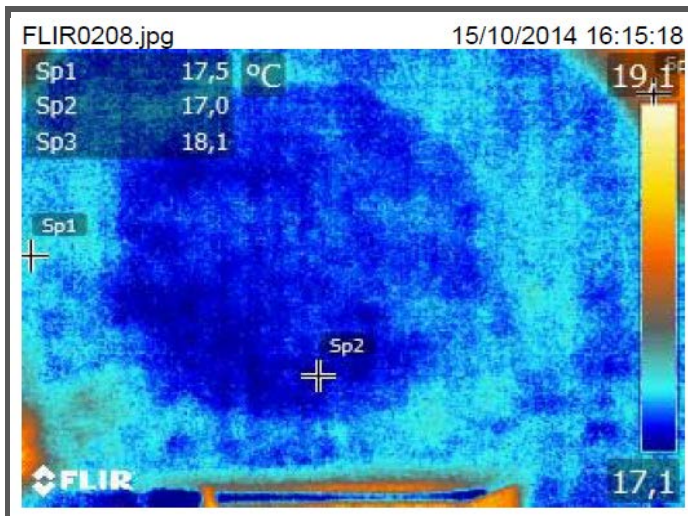
Font: Idòia Torrent.

Aquestes termografies mostren dos punt del nervi de la mateixa volta on s'ha identificat un dels dracs. Es coneix que en aquests punts, tot i trobar-se recoberts de pintura i sutge, també hi ha d'haver-hi dracs dibuixats a la pedra (se sap ja que s'ha començat a treure el recobriment i apareixen

els mateixos colors i figures que en el nervi anterior). A partir dels resultats de l'assaig anterior, s'han pres les termografies actives en el moment de màxima temperatura per tal de veure si els mapes tèrmics poden indicar la presència de les pintures ocultes. En aquest cas, la termografia no ha mostrat els resultats esperats, a través de les imatges tèrmiques no es poden identificar els dibuixos del dracs situats als nervis de les voltes.

14. FITXES INFORMES ESTUDI TERMOGRÀFIC

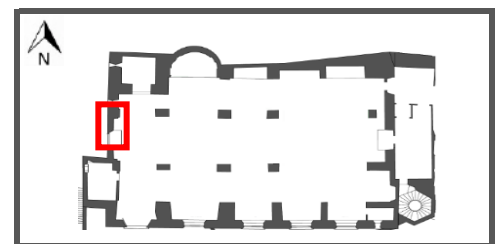
INFORME 01: ESSLÉSIA SANT PERE DE RIPOLL, FAÇANA OEST



PARÀMETRES	
SP1	17,50
SP2	17,00
SP3	18,10
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	10,00
T. Atmosfèrica	20,00
Humitat relati	47,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera:	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	15/10/2014

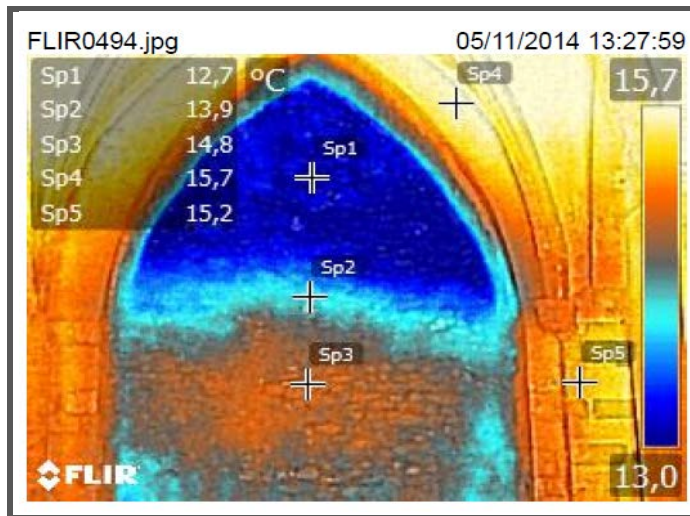


TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77

VALORACIÓ: En aquesta termografia s'analitza la façana Oest de l'església de Sant Pere de Ripoll. Aparentment es tracta d'una façana sense cap obertura, la imatge digital així ho indica. En la termografia es pot detectar clarament un salt de temperatura de 0,5°C formant un cercle. Aquest canvis de temperatura sense gradient indiquen forats que han estat reomplerts amb materials diferents dels originals. Les dimensions d'aquest cercla indiquen que es pot tractar d'un rosetó que ha estat tapiat.

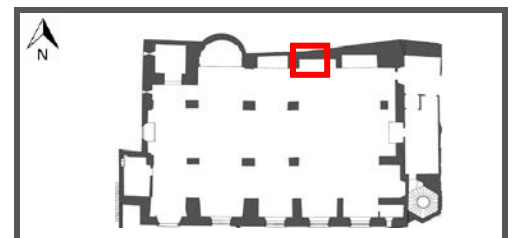
INFORME 02: ESGLÉSIA SANT PERE DE RIPOLL, FAÇANA NORD



PARÀMETRES	
SP1	12,70
SP2	13,90
SP3	14,80
SP4	15,70
SP5	15,20
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	18,00
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	05/11/2014

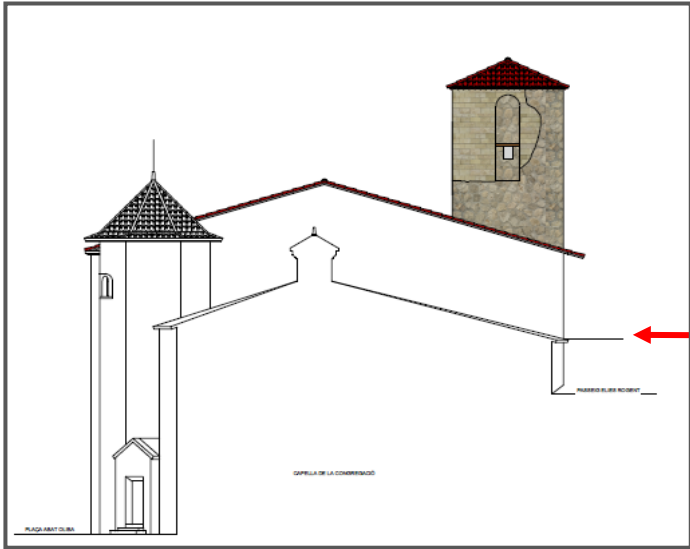


TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50, mesurador d'humitat FLIR MR77

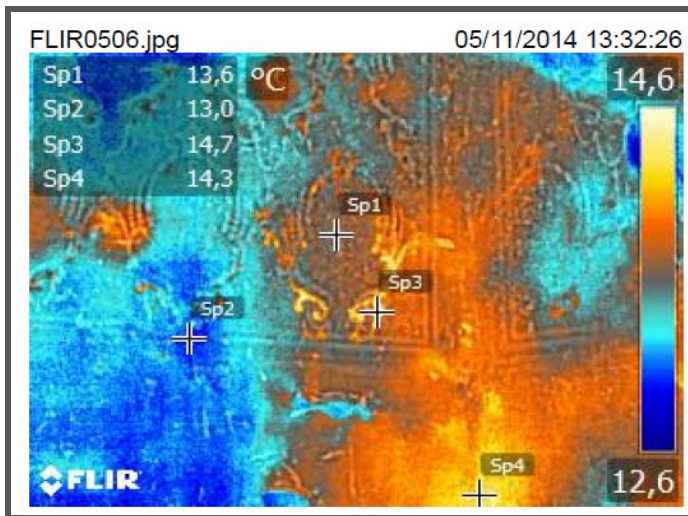
VALORACIÓ: El mur que s'ha analitzat termogràficament mostra una variació de temperatura significativa, la zona inferior del mur es troba a 14,8°C mentre que la zona superior del mur està a 12,7°C, això implica un diferencial de temperatura de 2,2°C. Es coneix que hi ha una variació de cotes entre el paviment interior del temple i el carrer adjacent, a través d'aquesta imatge es pot determinar des de l'interior de l'església a quina cota es troba la pavimentació exterior (passeig Elies Rogent).

NOTA: S'adjunta esquema de l'església on es mostra la cota interior i exterior del mur estudiat termogràficament.

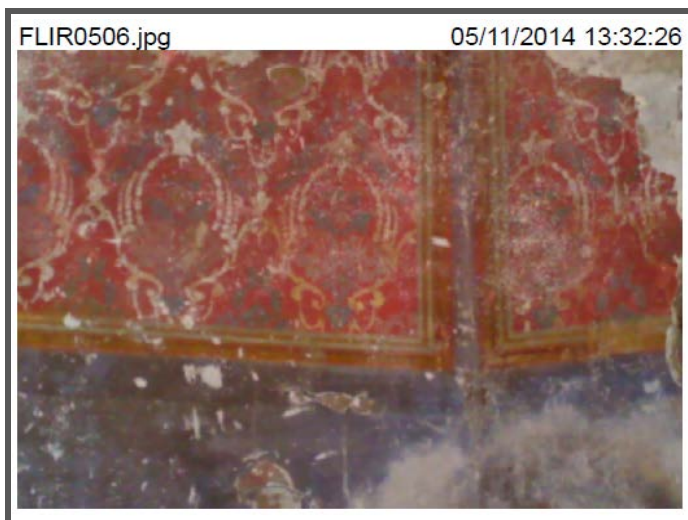


Cota paviment exterior

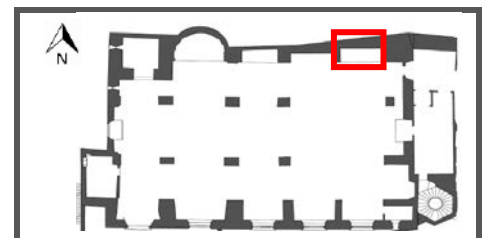
INFORME 03: ESGLÉSIA SANT PERE DE RIPOLL, FAÇANA NORD



PARÀMETRES	
SP1	13,60
SP2	13,00
SP3	14,70
SP4	14,30
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	3,00
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	05/11/2014

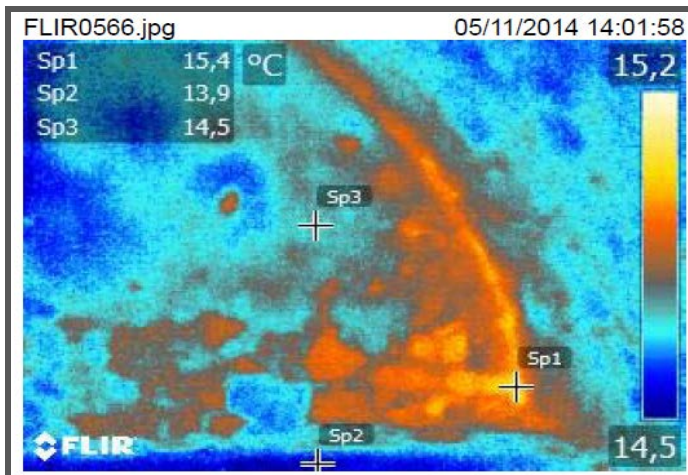


TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

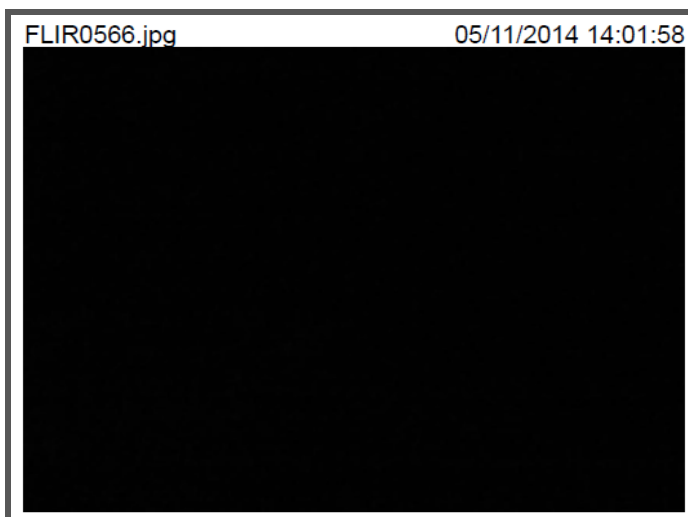
MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77

VALORACIÓ: En la imatge termogràfica es pot apreciar on hi ha restes de pigment metàl·lic (in situ, a ull nu no es podien apreciar les restes de color metàl·lic). Mitjançant aquest sistema es pot apreciar amb més claredat el dibuix.

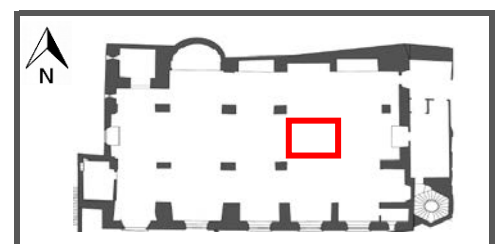
INFORME 04: ESGLÉSIA SANT PERE DE RIPOLL, OSSARI



PARÀMETRES	
SP1	15,40
SP2	13,90
SP3	14,50
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	23,00
Distància	3,00
T. Atmosfèrica	20,00
Humitat relativa	47,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	05/11/2014



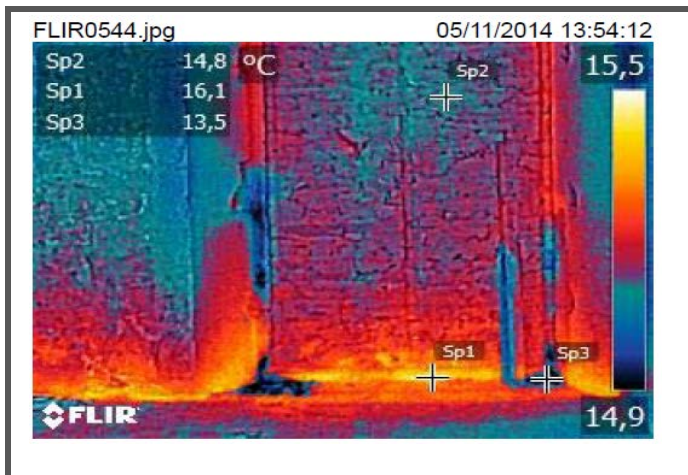
TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77

VALORACIÓ: La termografia revela que a la junta entre murs de l'ossari hi ha filtració d'aire calent (diferència de temperatura de 0,9°C). Es planteja una hipòtesis per determinar el motiu d'aquest aire a major temperatura a l'altre banda de l'habitable. Donat que les termografies es prenen en ple dia i hi ha circulació d'aire dins de l'ossari (es troba obert al temple), i que es considera que la temperatura de la terra s'hauria de trobar a menor temperatura que l'espai obert, es planteja la idea de que a l'altre banda del mur de l'ossari hi hagi un altre compartiment. Caldria realitzar més estudis per avaluar aquesta hipòtesis.

NOTA: En la imatge digital no es veu res donat que la termografia es va realitzar a l'interior de l'ossari i no hi havia llum.

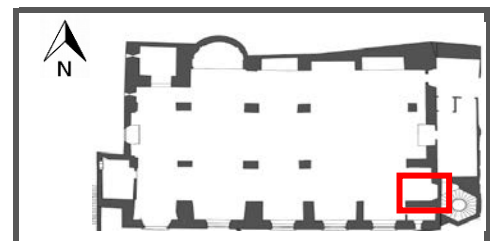
INFORME 05: ESGLÉSIA SANT PERE DE RIPOLL, FAÇANA EST



PARÀMETRES	
SP1	14,80
SP2	16,10
SP3	13,50
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	5,00
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	05/11/2014



TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77

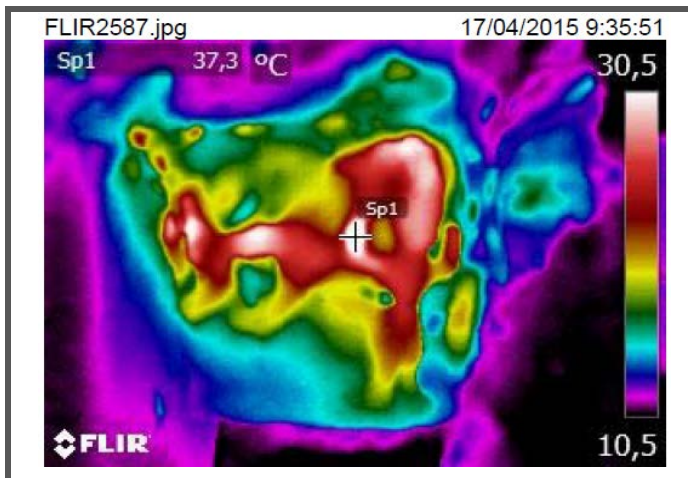
VALORACIÓ: En la termografia es mostren dues incidències tèrmiques.

Primerament en aquesta imatge es pot detectar que al voltant del marc de la porta, la temperatura és més elevada (temperatura mitjana de la porta 15°C, temperatura perímetre 16,1°C). Es coneix que a l'altra banda del mur hi ha una zona calefactada, per tant, aquesta variació de 1,1°C s'atribueix al fet que a través de la fusta envellida hi ha filtracions d'aire calent.

Aquest diferencial de temperatura també es mostra a la junta dels murs verticals amb la solera del temple, en aquest cas però, la diferència de temperatures detectades no recau en filtracions d'aire calent. En aquest ocasió la diferència de temperatura s'atribueix al fet que en aquesta zona dels murs és on hi ha més càrregues i més moment, per tant els murs tendeixen a augmentar de temperatura en els punt on han de realitzar més resistència.

Per últim també es pot observar a través de la termografia que hi ha problemes d'humitat en aquest espai. En diferents punts es troben taques a una temperatura de 13,5°C (taques negres en la imatge tèrmica).

INFORME 06: ESGLÉSIA SANT JULIÀ DE VALLFOGONA



PARÀMETRES	
SP1	37,30
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	20,00
Distància	0,30
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	17/04/2015

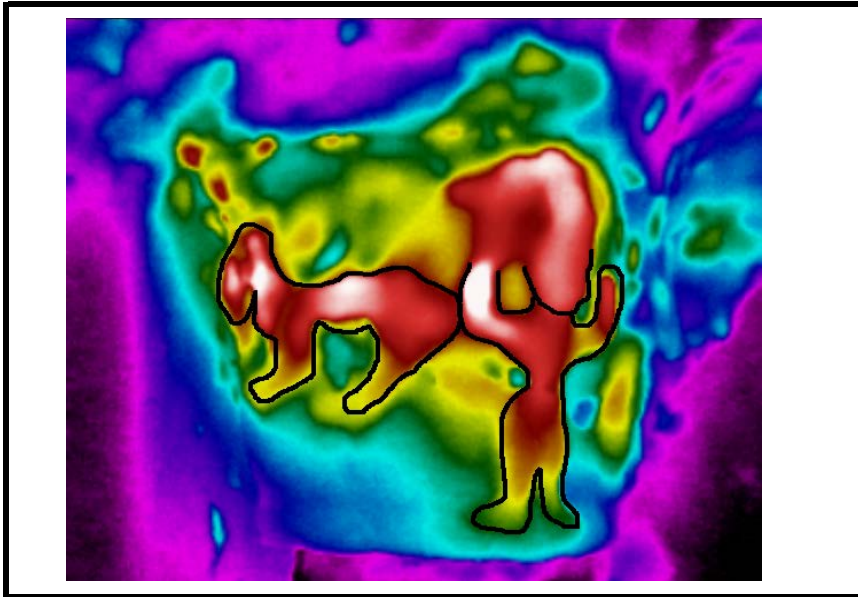


TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Activa

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77, Decapador BOSCH HG 600-3

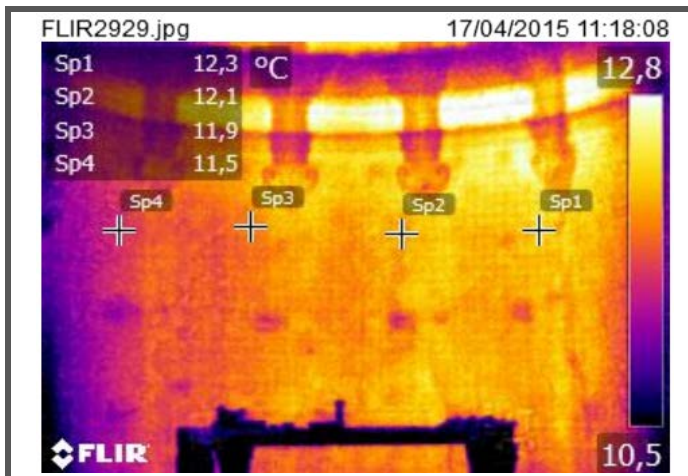
VALORACIÓ: En la termografia s'analitza el capitell de la portalada de l'església de Sant Julià de Vallfogona. En els capitells hi havia hagut figures esculpides però a causa de la degradació de la pedra no se'n poden reconèixer els elements. La termografia Activa ha permès identificar dues de les figures, la primera es tracta d'una figura antropomorfa (persona amb els braços aixecats) i una figura equina.

NOTA: S'adjunta pàgina amb l'imatge de les figures antropomorfa i equina perfilades.

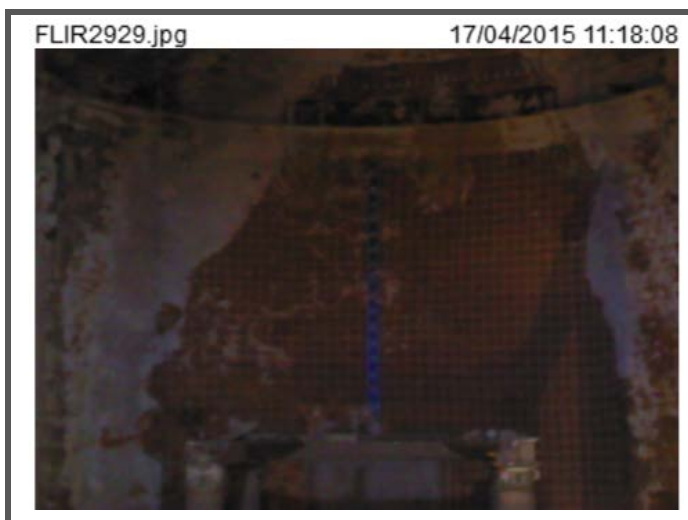


Imatge termografia activa amb elements esculpits perfilats (figura equina esquerra, figura persona dreta).

INFORME 07: ESSLÉSIA SANT JULIÀ DE VALLFOGONA, FAÇANA EST



PARÀMETRES	
SP1	12,30
SP2	12,10
SP3	11,90
SP4	11,50
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	20,00
Distància	10,00
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	17/04/2015



TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

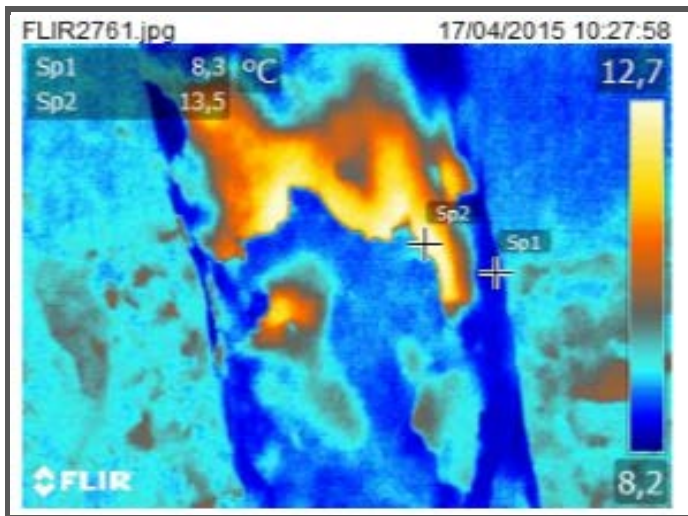
MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77

VALORACIÓ: La imatge termogràfica correspon al mur situat a l'Est de l'Església de Sant Julià de Vallfogona. En aquest imatge es pot apreciar que el mur mostra temperatures més elevades a la banda dreta, els marcadors SP mostren temperatures de 11.5, 11.9, 12.1, 12.3°C (d'esquerra a dreta, respectivament), aquest fet és degut a que el mur té forma circular i per tant al canto Sud-Est hi ha més incidència de sol a primera hora del matí, aquesta variació progressiva de temperatura no es correspon a cap patologia.

Una altra característica que s'ha apreciat a partir de la termografia en aquest mur, és que a mitja alçada hi apareixen quatre marques amb una forma quadrada a diferent temperatura (més freda es troben a 11.5°C de mitjana mentre que la resta de la paret a 12°C). Donat que sembla que s'insinuen les mateixes marques uns metres més amunt (desplaçades a l'esquerra però seguint a mateixa simetria)

Es considera que aquest possiblement haguessin sigut orificis que es varen fer durant el procés de construcció per tal de fixar les vestides. Aquestes marques no es poden apreciar sense la termografia.

INFORME 08: ESGLÉSIA SANT PERE DE RIPOLL, PORTA ENTRADA PRINCIPAL (OEST)



PARÀMETRES	
SP1	8,30
SP2	13,50
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	18,00
Distància	0,50
T. Atmosfèrica	8,00
Humitat relativa	58,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	17/04/2015

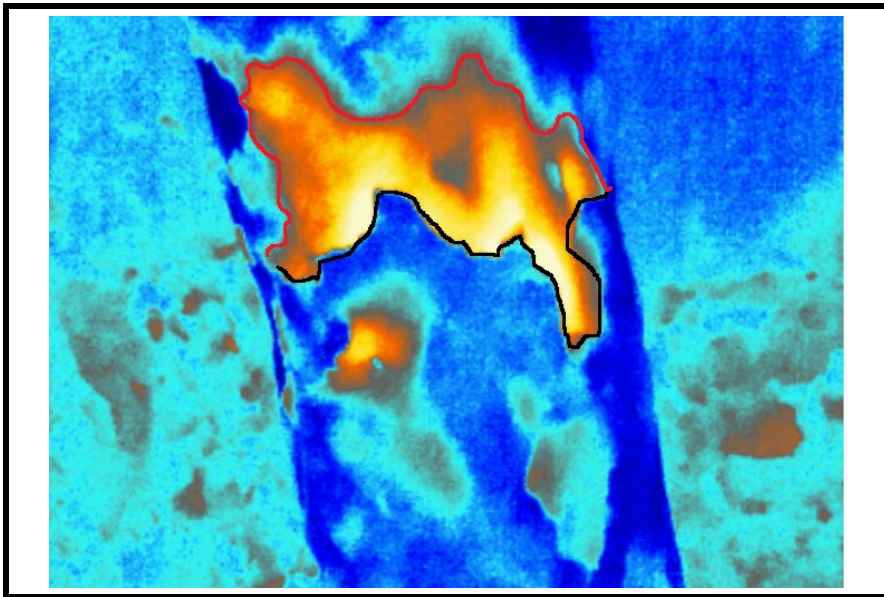


TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Activa

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77, Decapador BOSCH HG 600-3

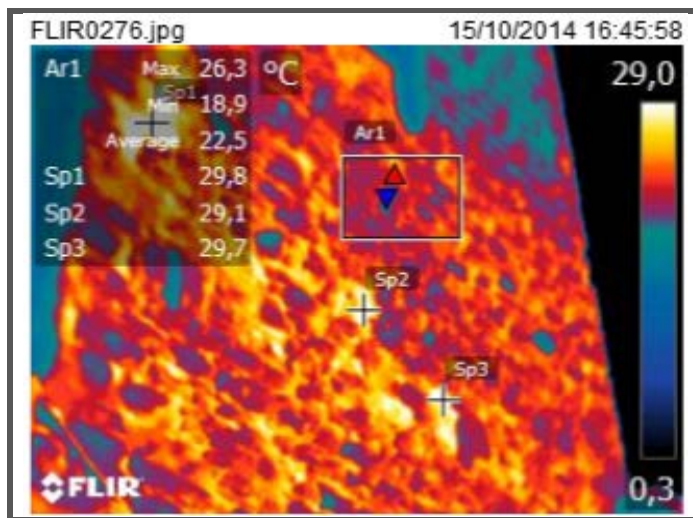
VALORACIÓ: En la imatge termogràfica activa es pot apreciar la zona on la pedra està afectada per la patologia (mal de la pedra). A ull nu, no es pot detectar l'abast de la descamació però si a través de la imatge tèrmica. La zona malmesa es troba a una temperatura d'entre 10,1°C i 13,5°C mentre que la zona que no està afectada per aquesta patologia es troba a una temperatura mitjana de 8.3°C.

NOTA: S'adjunta imatge on es pot veure perfilat l'abast de la patologia



Imatge termografia activa. Amb negre es perfila el perímetre de la descamació i amb vermell l'abast d'aquesta patologia.

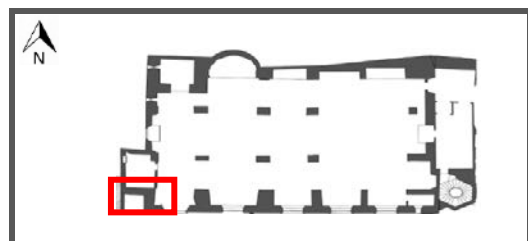
INFORME 09: ESGLÉSIA SANT PERE DE RIPOLL, FAÇANA SUD



PARÀMETRES	
SP1	29,80
SP2	29,10
SP3	29,70
Mitjana mur	22,50
Emissivitat	0,95
T. Reflectida	23,00
Distància	10,00
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	



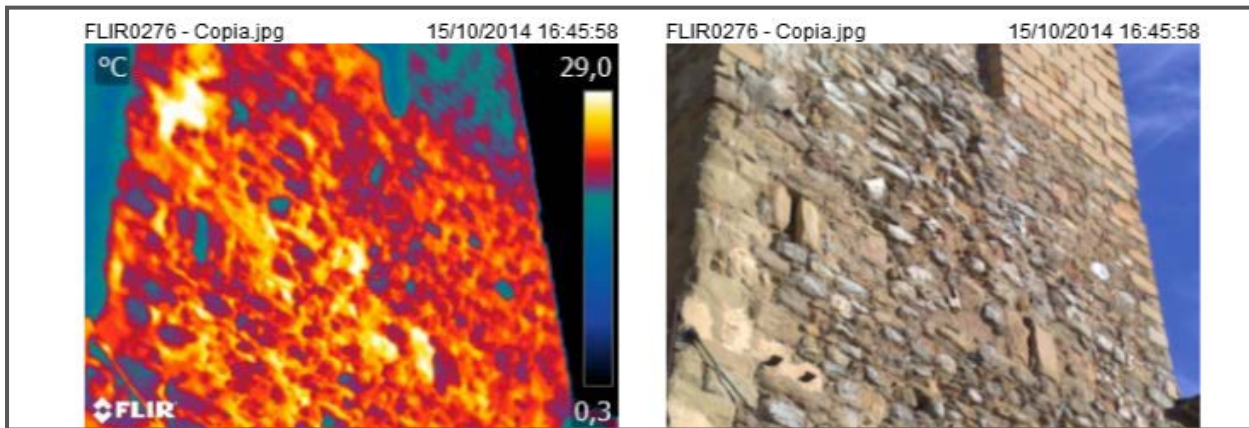
TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77

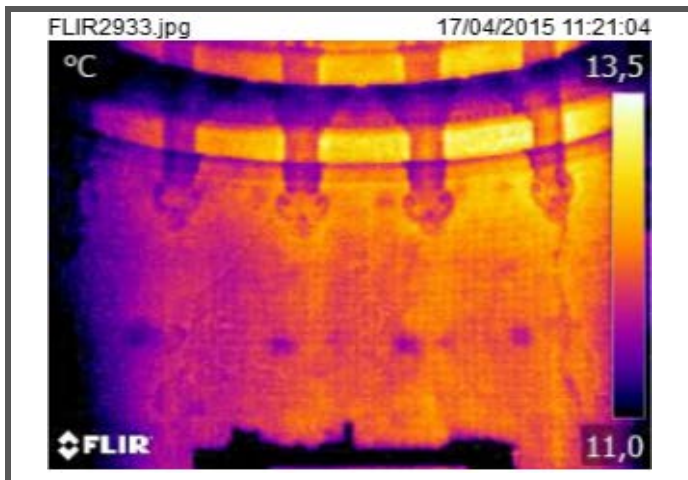
VALORACIÓ: En la termografia realitzada es detecten dos incident en el mur de la torra. Primerament, es pot veure com el material que s'ha utilitzat per realitzar la part superior del mur té unes característiques tècniques diferents a les de la pedra original. Aquest material nou presenta un temperatura inferior (5°C de diferencial de temperatura), en aquest cas caldrà avaluar el comportament dels material entre ells.

Per altre banda es detecta que hi ha material aportat en el mur original. Entre les pedres primitives es pot localitzar morter de restauració, aquest presenta una temperatura diferent respecte la resta del mur (fins a 7°C de diferència). La termografia en permet la seva localització.

NOTA: S'adjunta imatge tèrmica i visual sense quadre de valors per tal de visualitzar millor els canvis de temperatura a través dels colors.

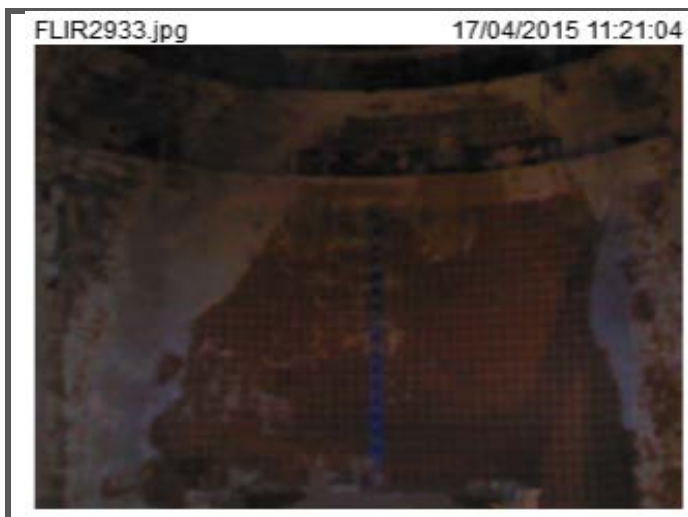


INFORME 10: ESGLÉSIA SANT JULIÀ DE VALLFOGONA, FAÇANA EST



PARÀMETRES	
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	18,00
Distància	10,00
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	58,00%

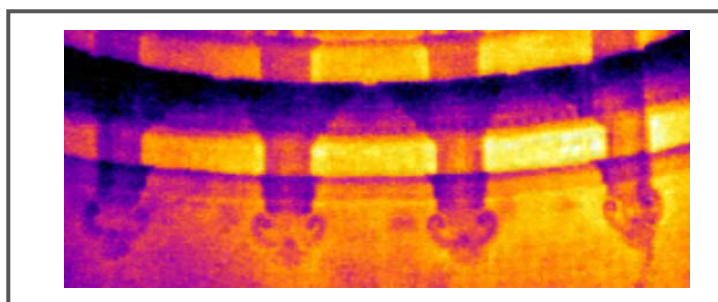
INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	17/04/2015



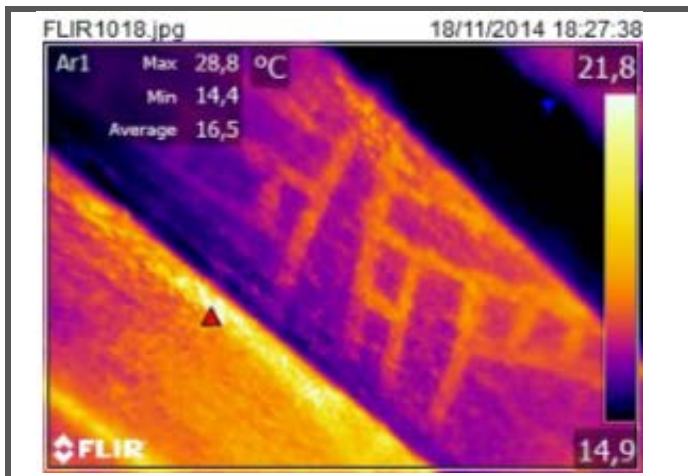
TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Passiva

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77

VALORACIÓ: Aquesta termografia passiva permet identificar el perfil dels element decoratius que hi havien hagut en el mur, actualment no es pot apreciar el detall a ull nu (veure imatge digital). S'adjunta una imatge tèrmica amb el detall d'aquests elements.



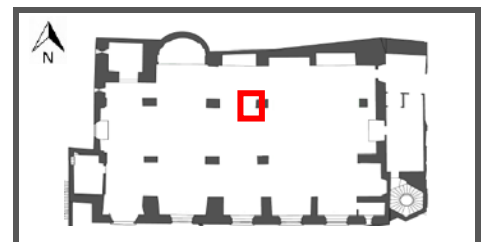
INFORME 11: ESGLÉSIA SANT PERE DE RIPOLLA, ARC INTERIOR



PARÀMETRES	
Tª màxima	28,8
Emissivitat	0,90
T. Reflectida	23,00
Distància	0,50
T. Atmosferica	20,00
Humitat relativa	47,00%



INFORMACIÓ IMATGE	
Model Càmera	FLIR E60
Lent	FOL18
Resolució IR	320X240
Data creació	17/04/2015



TIPUS DE TERMOGRAFIA: Termografia Activa

MATERIAL UTILITZAT: Càmera Termogràfica FLIR E60, Distanciòmetre làser BOSCH GLM 50 , mesurador d'humitat FLIR MR77, focu de llum.

VALORACIÓ: S'ha realitzat aquest termografia per a l'estudi de la viabilitat de la termografia activa per a la localització de pintures ocultes. S'ha observat que els majors contrastos de color en el mapa tèrmic es mostren quan s'arriba a una temperatura màxima del conjunt de 28,8°C.

15. CONCLUSIONS

Un cop realitzat l'estudi dels principis en que es basa la termografia, l'anàlisi del funcionament i de les aplicacions que pot tenir la termografia infraroja aplicada en l'edificació, s'arriba a la conclusió de que aquesta tecnologia presenta grans avantatges en l'estudi del patrimoni arquitectònic. Donat que es tracta d'una tècnica no destructiva i no invasiva, és aplicable a tot tipus de materials, facilitant l'estudi i la intervenció a aquells elements històrics que cal preservar i interactuar el mínim possible.

Un dels altres grans avantatges de les inspeccions termogràfiques, és que es realitzen a distància, sense que l'aparell ni la persona que du a terme les termografies hagi d'estar en contacte amb els objectes sotmesos als estudis. Gràcies a aquesta característica es poden examinar zones inaccessibles o amb risc de esfondrament, d'aquesta manera es pot preservar la integritat de l'element construït i de l'operari.

Per altre banda, les càmeres de termografia infraroja són lleugeres i manejables, permeten que es realitzin assajos in situ de manera àgil i còmoda. A més a més, permet la detecció exacte del punt defectuós en temps real, la qual cosa permet quantificar la gravetat i les repercussions de les patologies en el mateix lloc d'estudi i d'una manera molt ràpida i afectiva. En conseqüència, aquesta particularitat de la termografia permet analitzar les edificacions en profunditat amb relativa freqüència, fent que les patologies i les anomalies es detectin amb antelació sense que arribin a suposar intervencions totals en el patrimoni. Aquest tipus d'assaig no només és considerat interessant en l'estudi de l'estat de degradació de les edificacions o com a anàlisi de control de patologies, sinó que també té la capacitat d'aportar informació en estudis històrics del patrimoni construït.

Cal dir, que no només es poden analitzar les imatges termogràfiques in situ a través del visor de la càmera sinó que, els softwares de termografia permeten analitzar els mapes tèrmics a posteriori. L'opció d'analitzar les imatges en el mateix moment en que es prenen permet millorar l'enquadrament, l'enfoc i ajustar paràmetres per poder identificar elements que no es tenien localitzats abans de l'estudi. Per tal de realitzar un examen acurat de les diferents termografies realitzades, s'ha observat que la millor opció és prendre les imatges termogràfiques i visualitzar-les a través del visor de la càmera per poder-les ajustar correctament in situ, però posteriorment, analitzar-les totes elles amb més exactitud a partir del software (Flir Tools) a l'ordinador.

Seguint amb aquesta part més teòrica del treball, com s'ha pogut veure en l'apartat de normativa s'observa que no es disposa de cap norma que estableixi com s'ha d'actuar en el moment en que

es realitzen assajos termogràfics en les edificacions, ja sigui en estudi de construccions noves o en edificacions històriques. La normativa que es disposa fa referència bàsicament a com han de ser els aparells de termografia i com s'han de calibrar o de quins coneixement ha de disposar l'operari però no de com s'ha d'utilitzar, a més a més, gran part d'aquesta és de caire internacional. Per tant, es conclou que no hi ha normativa específica sobre les pautes d'actuació en assajos de termografia aplicada a l'edificació en el nostre territori.

Pel que fa a la bibliografia estudiada, no es disposa d'una gran quantitat de documentació escrita sobre aquesta aplicació determinada de la termografia. S'han examinat diferents articles relacionats amb l'estudi del patrimoni arquitectònic a través de la termografia i se'n ha extret la informació per tal de poder-la aplicar en els assajos realitzats en els edificis estudiats. Es considera que aquest és un camp encara poc conegut on queda molt per investigar.

En la part més pràctica del treball és on s'ha procedit a realitzar els estudis termogràfics a les esglésies de Sant Julià de Vallfogona i Sant Pere de Ripoll i comparar la informació obtinguda dels mapes tèrmics amb les deduccions aportades per la documentació bibliogràfica. De manera general, les revelacions que han aportat als assajos termogràfics realitzats es corresponen al tipus d'anomalies i patologies que indicaven els documents que es podien observar a través de la termografia. No obstant, algun mapa tèrmic ha revelat informació que es desconeixia que es pogués obtenir, aportant nous coneixements a aquesta tècnica. Per altre banda, en la realització de proves termogràfiques en elements mitjançant mètodes descrits en la bibliografia, s'ha observat que hi ha sistemes per millorar l'obtenció de dades que no estaven descrits en aquests processos, en aquests casos es pot dir que s'ha millorat la metodologia.

Mitjançant els assajos termogràfics s'ha revelat diferent tipus d'informació, alguns mapes tèrmics han indicat patologies en l'edificació, com descamacions de la pedra, on s'ha pogut quantificar la magnitud del dany o problemes d'humitats. Altres termografies han aportat informació històrica de les construccions, per exemple, a l'església de Sant Pere de Ripoll s'hi ha descobert un rosetó que es trobava tapiat, i a l'església de Sant Julià de Vallfogona, s'han pogut definir els perfils dels diferents elements decoratius que es troben degradats. Altres aportacions que s'han pogut fer gràcies a la termografia infraroja han estat la detecció de diferents materials de restauració, filtracions d'aire calent i pintures amb components metàl·lics. Cal dir, que no s'han pogut detectar pintures cobertes per altres materials tot i la realització de diferents assajos termogràfics.

Per últim, cal esmentar que la termografia és una tecnologia complexa, sense uns coneixements previs dels seus principis físics, del funcionament de la càmera termogràfica i dels diferents

paràmetres a definir havans de realitzar una imatge, no hagués estat possible obtenir informació en els assajos. Així com també cal haver-se familiaritzat amb els mapes tèrmics per tal d'obtenir informació, ja que si no es té un bon coneixement de la tecnologia es poden donar resultats erronis a partir de les imatges tèrmiques. En aquest estudi, haver-me format en termografia infraroja ha estat primordial a l'hora de realitzar els informes termogràfics.

En definitiva, es pot dir que s'han complerts els objectius que s'havien marcat a l'inici d'aquest document, ja que s'ha pogut aportar informació històrica no coneguda de les dues edificacions estudiades i també s'han pogut estudiar patologies i anomalies. Gràcies a aquest document es pot concloure doncs, que la termografia és una tècnica que pot ser molt útil en l'edificació tot i que queda molt de terreny per estudiar.

16. AGRAÏMENTS

No podria donar per acabat el treball sense donar les gràcies a totes aquelles persones que m'han ajudat i m'han donat suport en la realització d'aquest. En primer lloc, agrair al meu tutor, Miquel Àngel Chamorro, la seva col·laboració, i orientació en el desenvolupament del projecte i l'ajuda en la recerca documental.

M'agradaria agrair la col·laboració d'en Jordi Salvat, per ser el meu company d'assajos, per haver-me recolzat en la investigació, i per haver-me cedit documentació històrica de la seva tesis doctoral, juntament amb la Sònia Puig qui també ens ha acompanyat en la presa d'imatges termogràfiques.

A l'Aniol Ribot, professor del curs de termografia, per haver fet que la termografia sembles una mica menys complexa.

Donar les gràcies també a l'ajuntament de Vallfogona del Ripollès, en especial a l'alcalde M. Carme Freixa, per haver-nos facilitat la feina i haver-nos permès estudiar l'església de Sant Pere. Cal fer extens aquest agraïment als tècnics i treballadors de l'església de Sant Pere de Ripoll, per haver-nos deixat interrompre les seves tasques per poder realitzar les termografies, i per haver-me facilitat informació en tot moment.

I per últim, però no menys important, agrair a la meva família tot el suport que m'han donat al llarg d'aquestes mesos, i en especial a la meva parella, en Sergi. Sense vosaltres tot això no hauria estat possible.

17. BIBLIOGRAFIA

Normativa:

- ASNT SNT-TC- 1A *Recommended Practice - Standard Topical Outlines for Qualification of Nondestructive Testing Personnel (ANSI/ASNT CP-105)*
- ASTM E1934-99a (2014) Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography
- ASTM D4788-03 (Reapproved 2007). Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography
- ASTM C1046-95 (Reapproved 2007). Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components
- ASTM C1060-90 (Reapproved 2003). Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings
- ASTM C1153-97 (Reapproved 2003). Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging
- ISO 13372:2012 Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary
- ISO 13379-1:2012 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Data interpretation and diagnostics techniques -- Part 1: General guidelines
- ISO 9712:2012 Non-destructive testing -- Qualification and certification of NDT personnel
- ISO 17359:2011 Condition monitoring and diagnostics of machines -- General guidelines
- ISO 18434-1:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Thermography -- Part 1: General procedures

- ISO 18436-3:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for qualification and assessment of personnel -- Part 3: Requirements for training bodies and the training process
- ISO 18436-7:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for qualification and assessment of personnel -- Part 7: Thermography
- ISO 13374-2:2007 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Data processing, communication and presentation -- Part 2: Data processing
- ISO 13381-1:2004 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Prognostics -- Part 1: General guidelines
- ISO 18436-1:2004 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for training and certification of personnel -- Part 1: Requirements for certifying bodies and the certification process.
- ISO 13374-1:2003 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Data processing, communication and presentation -- Part 1: General guidelines
- ISO/DIS 10878 Non-destructive testing -- Infrared thermography – Vocabulary
- ISO 6781:1983 Thermal insulation -- Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes -- Infrared method
- EN 13187:1999 Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method

Llibres:

- Benitez, H. Dario, Humberto Loalza i Eduardo Celcedo. 2011. *Termografía activa pulsada en inspección de materiales. Técnicas avanzadas de procesado*. Universidad del Valle.

- Maldague, Xavier P. 2001. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Kai Chang, Editor Texas A&M University.

Articles:

- Bartz, Wojciech, Jaroslaw Rogóz, Robert Rogal, Adam Cupa I PAwel Szroeder. 2011. Characterization of historical lime plaster by combined non-destructive and destructive test: The case of the sgraff in Boznón (SW Poland). *Construction and Building Materials*. *Construction and Building Materials* 30 (2012) 439–446.
- Bisegna, Fabio, Dario Ambosini, Domenica Paoletti, Stefano Sfarra, Franco Guliermetti. 2014. A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient walls structures by passive infrared thermography – A case study. *Journal of Cultural Heritage* 15 (2014) 199–202.
- Cañas Guerrero, Ignacio, Silvia Martín Ocaña, Ignacio González Requena. 2003. Aplicabilidad de la termografía parar la inspección de los edificios rurales: Caso de una comarca española. Universidad Politécnica de Madrid. 235-1.
- Cusidó, J. A., M. Devant, J. Riba. 1996 *Aplicaciones de la termografía infrarroja y la espectrorradiometría en el estudio del deterioro del patrimonio arquitectónico nacional*. Institut de Tecnologia i Modelització Ambiental (UPC) 115-4
- Imposa, Sebastiano. 2010. Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy). *Journal of Cultural Heritage* 11 (2010) 259–264
- Kordatos, E.Z., D.A. Exarchos, C. Stavrakos, A. Moropoulou, T.E. Matikas. 2012. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. *Construction and Building Materials*. *Construction and Building Materials* 48 (2013) 1261–1265.

- Lerma, C., Á Mas, E. Gil, J. Vercher, M. J. Peñalver. 2014. *Pathology of building materials in historic buildings. Relationship between laboratory testing and infrared thermography*. *Materiales de Construcción*. Vol. 64, Issue 313, January–March 2014, e009
- Lerma, José L., Miriam Cabrello i Cristina Portalés. 2009. Multitemporal thermal analysis to moisture on a bulging façade. *Construction and Building Materials*. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2190–2197
- Maldague, Xavier. *Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation*. Université Laval, Quebec.
- Moropoulou, Antonia, Kyriakos C. Labropoulos, Ekaterini T. Delegous, Maria KAroglou, Asterios Bakolas. 2013 Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*. 48 (2013) 1222–1239
- Quagliarini Enrico, Enrico Esposito, Antonio del Conte. 2013. *The combined use of IRT and LDV for the investigation oh historical thin vaults*. *Journal of Cultural Heritage* 14 (2013) 122–128.
- Rodriguez Pedraza, Dolores, Juan Vicente Sabater González. *La termografía infrarroja en el patrimonio histórico*. Instituto Tecnológico de la Construcción – AIDICO, España.

Webs:

- Ajuntament de Ripoll
<http://www.ripoll.cat/municipi/>
(Consultat el 2 de Febrer del 2015)
- Ajuntament de Vallfogona
<http://www.vallfogona.cat/coneix/llocs-dinteres/esglesia-de-sant-julia/>
(Consultat el 2 de Febrer del 2015)
- Enciclopèdia catalana.
<http://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0069293.xml>
(Consultat el 4 de Març del 2015)

- Fluke
<http://es.slideshare.net/tecnojaume/introduccion-a-los-principios-de-la-termografia>
(Consultat el 2 de Desembre del 2014)
- Testo Academia Online
<file:///C:/Users/torrent/Desktop/PFC%20termografia/WEBS/Ventanas%20atmosf%20E9ricas%20%20Academia%20Testo.html>
(Consultat el 26 de Novembre del 2014)
- Termografics
<http://www.latermografia.com/2011/teoria-del-infrarrojo-2>
(Consultat el 16 de Desembre del 2014)

Documents varis:

- EESPa, Energy Equipments & Services Panama. *Termografía-Aplicaciones*.
- Flir Systems. 2011. *Guía de Termografía para mantenimiento predictivo*. Ed. Flir Systems.
- Flir Systems. *Historia de la aplicación*. Ed. Flir Systems.
- Flir Systems. *User's Manual*. 2014. Ed: . Flir Systems.
- ITC Infrared Training Center. *Curso básico de termografía aplicada a la edificación*. ED. ITC
(Apunts assistència al curs de termografia bàsica aplicada a l'edificació impartit a la EPS per la Fundació Universitat de Girona.
- Land, instruments international. 2004. *Guía Básica a la Termografía*. Ed. Land
- Luaña, Victor. 2002. *La distribución de Planck*.
- Melgosa Revillas, Sergio. *Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. 2011. Comunidad de Madrid.

- Pastor Vega, J.M. *Termoterapia*.
- Testo. 2008. *Termografía, guía de bolsillo. Teoría – Aplicación Práctica – Consejos y Trucos*.
Ed. Por Testo

ANNEXES

INDEX ANNEXES

Annex 1: TAULA EMISSIVITATS

Annex 2: ARTICLES

Annex 3: FITXA INFORMES TERMOGRAFIA

Annex 4: FITXA INFORMES TERMOGRAFIA ACTIVA

Annex 5: PLÀNOLS SANT PERE DE RIPOLL

Annex 6: PLÀNOLS SANT JULIÀ DE VALLFOGONA

Annex 1: TAULA EMISSIVITATS

Esta sección incluye una serie de datos de emisividad basados en la bibliografía sobre infrarrojos y en las medidas realizadas por FLIR Systems.

32.1 Bibliografía

1. Mikaél A. Bramson: *Infrared Radiation, A Handbook for Applications*, Plenum press, Nueva York
2. William L. Wolfe, George J. Zissis: *The Infrared Handbook*, Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
3. Madding, R. P.: *Thermographic Instruments and systems*. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin – Extension, Department of Engineering and Applied Science.
4. William L. Wolfe: *Handbook of Military Infrared Technology*, Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
5. Jones, Smith, Probert: *External thermography of buildings...*, Proc. of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, vol.110, Industrial and Civil Applications of Infrared Technology, Junio de 1977, Londres.
6. Paljak, Pettersson: *Thermography of Buildings*, Swedish Building Research Institute, Estocolmo, 1972.
7. Vleck, J: *Determination of emissivity with imaging radiometers and some emissivities at $\lambda = 5 \mu\text{m}$* . Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
8. Kern: *Evaluation of infrared emission of clouds and ground as measured by weather satellites*, Defence Documentation Center, AD 617 417.
9. Öhman, Claes: *Emittansmätningar med AGEMA E-Box*. Teknisk rapport, AGEMA 1999. (Emissance measurements using AGEMA E-Box. Technical report, AGEMA 1999.)
10. Mattei, S., Tang-Kwor, E: *Emissivity measurements for Nextel Velvet coating 811-21 between -36°C AND 82°C* .
11. Lohrengel & Todtenhaupt (1996)
12. ITC Technical publication 32.
13. ITC Technical publication 29.

32.2 Nota importante sobre las tablas de emisividad

Los valores de emisividad de la siguiente tabla se han registrado mediante una cámara de onda corta (OC). Los valores sólo deben considerarse recomendaciones y deben emplearse con precaución.

32.3 Tablas

Table 32.1 T: Espectro total; OC: 2–5 μm ; OL: 8–14 μm , OML: 6.5–20 μm ; 1: Material; 2: Especificación; 3: Temperatura en $^{\circ}\text{C}$; 4: Espectro; 5: Emisividad; 6: Referencia

1	2	3	4	5	6
3M 35	Cinta aislante de vinilo (varios colores)	< 80	OL	Aprox. 0,96	13
3M 88	Cinta aislante de vinilo negro	< 105	OL	Aprox. 0,96	13
3M 88	Cinta aislante de vinilo negro	< 105	MW	< 0,96	13
3M Super 33+	Cinta aislante de vinilo negro	< 80	OL	Aprox. 0,96	13
Aceite de lubricación	película sobre base de Ni: sólo base de Ni	20	T	0,05	2
Aceite de lubricación	película de 0,025 mm	20	T	0,27	2
Aceite de lubricación	película de 0,050 mm	20	T	0,46	2

1	2	3	4	6	6
Aceite de lubricación	película de 0,125 mm	20	T	0,72	2
Aceite de lubricación	recubrimiento grueso	20	T	0,82	2
Acero inoxidable	tipo 18 -8, pulido	20	T	0,16	2
Acero inoxidable	tipo 18-8: oxidado a 800 °C	60	T	0,85	2
Acero inoxidable	hoja pulida	70	OC	0,18	9
Acero inoxidable	hoja pulida	70	OL	0,14	9
Acero inoxidable	hoja en bruto ligeramente arañada	70	OC	0,30	9
Acero inoxidable	hoja en bruto ligeramente arañada	70	OL	0,28	9
Acero inoxidable	aleación: 8% Ni, 18% Cr	500	T	0,35	1
Acero inoxidable	enrollado	700	T	0,45	1
Acero inoxidable	limpiado con arena	700	T	0,70	1
Aglomerado	sin tratar	20	OC	0,90	6
Agua	nieve		T	0,8	1
Agua	nieve	-10	T	0,85	2
Agua	película de >0,1 mm de espesor	0-100	T	0,95-0,98	1
Agua	destilada	20	T	0,96	2
Agua	hielo, suave	-10	T	0,96	2
Agua	hielo, suave	0	T	0,97	1
Agua	hielo, muy cubierto de escarcha	0	T	0,98	1
Agua	cristales de hielo	-10	T	0,98	2
Alquitrán			T	0,79-0,84	1
Alquitrán	papel	20	T	0,91-0,93	1
Aluminio	lámina	27	10 µm	0,04	3
Aluminio	lámina	27	3 µm	0,09	3
Aluminio	con deposición al vacío	20	T	0,04	2
Aluminio	pulido	50-100	T	0,04-0,06	1
Aluminio	plancha pulida	100	T	0,05	4
Aluminio	hoja pulida	100	T	0,05	2
Aluminio	plancha sumergida en HNO ₃	100	T	0,05	4
Aluminio	plancha sin modificar	100	T	0,09	4
Aluminio	hoja sin modificar	100	T	0,09	2
Aluminio	hoja (4 muestras con diferentes patrones de estriado)	70	OC	0,05-0,08	9
Aluminio	hoja (4 muestras con diferentes patrones de estriado)	70	OL	0,03-0,06	9
Aluminio	superficie rugosa	20-50	T	0,06-0,07	1

1	2	3	4	6	6
Aluminio	desbastado	27	10 µm	0,18	3
Aluminio	desbastado	27	3 µm	0,28	3
Aluminio	bastante oxidado	50-500	T	0,2-0,3	1
Aluminio	muy meteorizado	17	OC	0,83-0,94	5
Aluminio	fundido y muy limpio	70	OC	0,47	9
Aluminio	fundido y muy limpio	70	OL	0,46	9
Aluminio	anodizado, gris claro, mate	70	OC	0,61	9
Aluminio	anodizado, gris claro, mate	70	OL	0,97	9
Aluminio	anodizado, negro, sin brillo	70	OC	0,67	9
Aluminio	anodizado, negro, sin brillo	70	OL	0,95	9
Aluminio	hoja anodizada	100	T	0,55	2
Amianto	polvo		T	0,40-0,60	1
Amianto	tela		T	0,78	1
Amianto	baldosa	35	OC	0,94	7
Amianto	placa	20	T	0,96	1
Amianto	pizarra	20	T	0,96	1
Amianto	papel	40-400	T	0,93-0,95	1
Arcilla	cocida	70	T	0,91	1
Arena			T	0,60	1
Arena		20	T	0,90	2
Arenisca	pulido	19	OML	0,909	8
Arenisca	rugoso	19	OML	0,935	8
Barniz	liso	20	OC	0,93	6
Barniz	sobre suelo de parquet de roble	70	OC	0,90	9
Barniz	sobre suelo de parquet de roble	70	OL	0,90-0,93	9
Barro			T	0,3-0,4	1
Bronce	pulido	50	T	0,1	1
Bronce	poroso, rugoso	50-150	T	0,55	1
Bronce	polvo		T	0,76-0,80	1
Bronce	bronce fosforoso	70	OC	0,08	9
Bronce	bronce fosforoso	70	OL	0,06	9
Bronce al aluminio		20	T	0,60	1
Carbón	hollín	20	T	0,95	2
Carbón	negro de humo	20-400	T	0,95-0,97	1
Carbón	polvo de carbón vegetal		T	0,96	1
Carbón	polvo de grafito		T	0,97	1
Carbón	grafito, superficie limada	20	T	0,98	2
Cemento		20	T	0,92	2

1	2	3	4	6	6
Cemento	seco	36	OC	0,95	7
Cemento	rugoso	17	OC	0,97	5
Cemento	paso de tránsito	5	OML	0,974	8
Cinc	pulido	200-300	T	0,04-0,05	1
Cinc	oxidado a 400°C	400	T	0,11	1
Cinc	hoja	50	T	0,20	1
Cinc	superficie oxidada	1.000-1.200	T	0,50-0,60	1
Cobre	electrolítico, pulido	-34	T	0,006	4
Cobre	electrolítico, cui- dadosamente pulido	80	T	0,018	1
Cobre	puro, superficie cuidadosamente preparada	22	T	0,008	4
Cobre	pulido mecánicamente	22	T	0,015	4
Cobre	pulido	50-100	T	0,02	1
Cobre	pulido	100	T	0,03	2
Cobre	pulido, comercial	27	T	0,03	4
Cobre	comercial, bruñido	20	T	0,07	1
Cobre	decapado	27	T	0,07	4
Cobre	fundido	1.100-1.300	T	0,13-0,15	1
Cobre	oxidado	50	T	0,6-0,7	1
Cobre	muy oxidado	20	T	0,78	2
Cobre	oxidado, negro	27	T	0,78	4
Cobre	oxidado hasta el negro		T	0,88	1
Cromo	pulido	500-1000	T	0,28-0,38	1
Cromo	pulido	50	T	0,10	1
Cuero	curtido		T	0,75-0,80	1
Dióxido de cobre	polvo		T	0,84	1
Ebonita			T	0,89	1
Escayola		17	OC	0,86	5
Escayola	recubrimiento grueso	20	T	0,91	2
Escayola	placa para tabi- car, sin tratar	20	OC	0,90	6
Escorias	caldera	0-100	T	0,97-0,93	1
Escorias	caldera	200-500	T	0,89-0,78	1
Escorias	caldera	600-1200	T	0,76-0,70	1
Escorias	caldera	1400-1800	T	0,69-0,67	1
Esmalte		20	T	0,9	1
Esmalte	laca	20	T	0,85-0,95	1
Esmeril	en bruto	80	T	0,85	1
Espuma de estireno	aislamiento	37	OC	0,60	7
Estaño	bruñido	20-50	T	0,04-0,06	1

1	2	3	4	6	6
Estaño	hoja de hierro estañado	100	T	0,07	2
Estuco	rugoso, barro	10-90	T	0,91	1
Goma	dura	20	T	0,95	1
Goma	suave, gris, rugosa	20	T	0,95	1
Granito	pulido	20	OML	0,849	8
Granito	rugoso	21	OML	0,879	8
Granito	rugoso, 4 muestras distintas	70	OC	0,95-0,97	9
Granito	rugoso, 4 muestras distintas	70	OL	0,77-0,87	9
Hidróxido de aluminio	polvo		T	0,28	1
Hielo: véase Agua					
Hierro fundido	pulido	38	T	0,21	4
Hierro fundido	pulido	40	T	0,21	2
Hierro fundido	pulido	200	T	0,21	1
Hierro fundido	líquido	1300	T	0,28	1
Hierro fundido	mecanizado	800-1.000	T	0,60-0,70	1
Hierro fundido	oxidado	38	T	0,63	4
Hierro fundido	oxidado	100	T	0,64	2
Hierro fundido	oxidado a 600°C	200-600	T	0,64-0,78	1
Hierro fundido	oxidado	260	T	0,66	4
Hierro fundido	oxidado	538	T	0,76	4
Hierro fundido	fundido	50	T	0,81	1
Hierro fundido	en bruto	900-1.100	T	0,87-0,95	1
Hierro fundido	lingotes	1000	T	0,95	1
Hierro galvanizado	hoja	92	T	0,07	4
Hierro galvanizado	hoja bruñida	30	T	0,23	1
Hierro galvanizado	hoja oxidada	20	T	0,28	1
Hierro galvanizado	muy oxidado	70	OC	0,64	9
Hierro galvanizado	muy oxidado	70	OL	0,85	9
Hierro y acero	electrolítico	22	T	0,05	4
Hierro y acero	electrolítico	100	T	0,05	4
Hierro y acero	electrolítico, cuidadosamente pulido	175-225	T	0,05-0,06	1
Hierro y acero	electrolítico	260	T	0,07	4
Hierro y acero	pulido	400-1000	T	0,14-0,38	1
Hierro y acero	brillante, atacado al ácido	150	T	0,16	1
Hierro y acero	tratado recientemente con esmeril	20	T	0,24	1

1	2	3	4	6	6
Hierro y acero	forjado, bien pulido	40-250	T	0,28	1
Hierro y acero	cubierto con herrumbre roja	20	T	0,61-0,85	1
Hierro y acero	hoja con herrumbre roja	20	T	0,69	2
Hierro y acero	hoja con herrumbre roja	22	T	0,69	4
Hierro y acero	con mucha herrumbre	17	OC	0,96	5
Hierro y acero	oxidado	100	T	0,74	4
Hierro y acero	oxidado	100	T	0,74	1
Hierro y acero	oxidado	125-525	T	0,78-0,82	1
Hierro y acero	oxidado	1227	T	0,89	4
Hierro y acero	enrollado en caliente	20	T	0,77	1
Hierro y acero	enrollado en caliente	130	T	0,60	1
Hierro y acero	enrollado en frío	70	OC	0,20	9
Hierro y acero	enrollado en frío	70	OL	0,09	9
Hierro y acero	fuertemente oxidado	50	T	0,88	1
Hierro y acero	fuertemente oxidado	500	T	0,98	1
Hierro y acero	rugoso, superficie plana	50	T	0,95-0,98	1
Hierro y acero	hoja pulida	750-1.050	T	0,52-0,56	1
Hierro y acero	hoja para conexión a masa	950-1.100	T	0,55-0,61	1
Hierro y acero	con herrumbre roja	20	T	0,69	1
Hierro y acero	oxidado	200	T	0,79	2
Hierro y acero	oxidado	200-600	T	0,80	1
Hierro y acero	hoja con capa de óxido brillante	20	T	0,82	1
Hierro y acero	pulido	100	T	0,07	2
Hierro y acero	enrollado recientemente	20	T	0,24	1
Hierro y acero	hoja enrollada	50	T	0,56	1
Hojalata	hoja	24	T	0,064	4
Krylon Ultra-flat black 1602	Negro mate	Temperatura ambiente hasta 175	OL	Aprox. 0,96	12
Krylon Ultra-flat black 1602	Negro mate	Temperatura ambiente hasta 175	MW	Aprox. 0,97	12
Laca	aluminio sobre superficie rugosa	20	T	0,4	1
Laca	baquelita	80	T	0,83	1
Laca	negra, mate	100	T	0,97	2
Laca	negra, sin brillo	40-100	T	0,96-0,98	1
Laca	negra, brillante, pulverizada sobre hierro	20	T	0,87	1

1	2	3	4	6	6
Laca	termorresistente	100	T	0,92	1
Laca	3 colores pulverizados sobre aluminio	70	OC	0,50-0,53	9
Laca	3 colores pulverizados sobre aluminio	70	OL	0,92-0,94	9
Laca	blanca	100	T	0,92	2
Laca	blanca	40-100	T	0,8-0,95	1
Ladrillo	silimanita: 33% SiO ₂ , 64% Al ₂ O ₃	1.500	T	0,29	1
Ladrillo	refractario, magnesita	1.000-1.300	T	0,38	1
Ladrillo	refractario, corindón	1000	T	0,46	1
Ladrillo	refractario, poco radiante	500-1.000	T	0,65-0,75	1
Ladrillo	refractario, fuertemente radiante	500-1.000	T	0,8-0,9	1
Ladrillo	arcilla refractaria	1200	T	0,59	1
Ladrillo	arcilla refractaria	1000	T	0,75	1
Ladrillo	arcilla refractaria	20	T	0,85	1
Ladrillo	alúmina	17	OC	0,68	5
Ladrillo	ladrillo refractario	17	OC	0,68	5
Ladrillo	silice, 95% SiO ₂	1230	T	0,66	1
Ladrillo	Gres muy silicioso, refractario	1000	T	0,66	1
Ladrillo	Gres muy silicioso, sin brillo, rugoso	1000	T	0,80	1
Ladrillo	Gres muy silicioso, con brillo, rugoso	1100	T	0,85	1
Ladrillo	común	17	OC	0,86-0,81	5
Ladrillo	hidrófugo	17	OC	0,87	5
Ladrillo	rojo, rugoso	20	T	0,88-0,93	1
Ladrillo	rojo, común	20	T	0,93	2
Ladrillo	mampostería	35	OC	0,94	7
Ladrillo	mampostería emplastada	20	T	0,94	1
Latón	bastante pulido	100	T	0,03	2
Latón	pulido	200	T	0,03	1
Latón	hoja enrollada	20	T	0,06	1
Latón	hoja tratada con esmeril	20	T	0,2	1
Latón	frotado con esmeril de grano 80	20	T	0,20	2
Latón	sin brillo, decolorado	20-350	T	0,22	1
Latón	oxidado	70	OC	0,04-0,09	9
Latón	oxidado	70	OL	0,03-0,07	9
Latón	oxidado	100	T	0,61	2

1	2	3	4	6	6
Latón	oxidado a 600°C	200-600	T	0,59-0,61	1
Madera	suelo		T	0,5-0,7	1
Madera	planchas	20	T	0,8-0,9	1
Madera	roble en planchas	20	T	0,90	2
Madera	blanca, húmeda	20	T	0,7-0,8	1
Madera	roble en planchas	70	OC	0,77	9
Madera	roble en planchas	70	OL	0,88	9
Madera	pino, 4 muestras distintas	70	OC	0,67-0,75	9
Madera	pino, 4 muestras distintas	70	OL	0,81-0,89	9
Madera	contrachapado, suave, seco	36	OC	0,82	7
Madera	contrachapado, sin tratar	20	OC	0,83	6
Madera		19	OML	0,962	8
Madera		17	OC	0,98	5
Magnesio		22	T	0,07	4
Magnesio	pulido	20	T	0,07	2
Magnesio		260	T	0,13	4
Magnesio		538	T	0,18	4
Molibdeno		600-1.000	T	0,08-0,13	1
Molibdeno	filamento	700-2.500	T	0,1-0,3	1
Molibdeno		1.500-2.200	T	0,19-0,26	1
Mortero		17	OC	0,87	5
Mortero	seco	36	OC	0,94	7
Nextel Velvet 811-21 Black	Negro mate	-60-150	OL	> 0,97	10 y 11
Nicromio	enrollado	700	T	0,25	1
Nicromio	limpiado con arena	700	T	0,70	1
Nicromio	alambre limpio	500-1.000	T	0,71-0,79	1
Nicromio	alambre limpio	50	T	0,65	1
Nicromio	alambre oxidado	50-500	T	0,95-0,98	1
Nieve: véase Agua					
Níquel	electrolítico	22	T	0,04	4
Níquel	electrolítico	38	T	0,06	4
Níquel	electrolítico	260	T	0,07	4
Níquel	electrolítico	538	T	0,10	4
Níquel	mate decapado	122	T	0,041	4
Níquel	pulido	122	T	0,045	4
Níquel	comercialmente puro, pulido	100	T	0,045	1
Níquel	comercialmente puro, pulido	200-400	T	0,07-0,09	1
Níquel	alambre	200-1000	T	0,1-0,2	1

1	2	3	4	6	6
Níquel	electrochapado en hierro, pulido	22	T	0,045	4
Níquel	electrochapado, pulido	20	T	0,05	2
Níquel	electrochapado en hierro, sin pulir	22	T	0,11	4
Níquel	electrochapado en hierro, sin pulir	20	T	0,11-0,40	1
Níquel	oxidado	200	T	0,37	2
Níquel	oxidado	227	T	0,37	4
Níquel	oxidado a 600°C	200-600	T	0,37-0,48	1
Níquel	oxidado	1227	T	0,85	4
Oro	pulido	130	T	0,018	1
Oro	pulido, con cuidado	200-600	T	0,02-0,03	1
Oro	bastante pulido	100	T	0,02	2
Papel	amarillo		T	0,72	1
Papel	rojo		T	0,76	1
Papel	azul oscuro		T	0,84	1
Papel	verde		T	0,85	1
Papel	negra		T	0,90	1
Papel	recubierto de laca negra		T	0,93	1
Papel	blanca	20	T	0,7-0,9	1
Papel	aglomerante blanco	20	T	0,93	2
Papel	blanco, 3 brillos diferentes	70	OC	0,76-0,78	9
Papel	blanco, 3 brillos diferentes	70	OL	0,88-0,90	9
Papel	4 colores diferentes	70	OC	0,68-0,74	9
Papel	4 colores diferentes	70	OL	0,92-0,94	9
Papel	negra, sin brillo	70	OC	0,86	9
Papel	negra, sin brillo	70	OL	0,89	9
Papel	negra, sin brillo		T	0,94	1
Papel pintado	dibujo suave, gris claro	20	OC	0,85	6
Papel pintado	dibujo suave, rojo	20	OC	0,90	6
Pavimento de asfalto		4	OML	0,967	8
Piel	humana	32	T	0,98	2
Pintura	aluminio, distintas antigüedades	50-100	T	0,27-0,67	1
Pintura	amarillo cadmio		T	0,28-0,33	1
Pintura	verde cromo		T	0,65-0,70	1
Pintura	azul cobalto		T	0,7-0,8	1
Pintura	óleo	17	OC	0,87	5

1	2	3	4	6	6
Pintura	al óleo, promedio de 16 colores	100	T	0,94	2
Pintura	óleo, varios colores	100	T	0,92-0,96	1
Pintura	óleo, negra	20	OC	0,94	6
Pintura	óleo, negra brillante	20	OC	0,92	6
Pintura	óleo, gris	20	OC	0,97	6
Pintura	óleo, gris brillante	20	OC	0,96	6
Pintura	plástica, negra	20	OC	0,95	6
Pintura	plástica, blanca	20	OC	0,84	6
Pintura	8 colores y calidades diferentes	70	OC	0,88-0,96	9
Pintura	8 colores y calidades diferentes	70	OL	0,92-0,94	9
Placa de fibra	dura, sin tratar	20	OC	0,85	6
Placa de fibra	porosa, sin tratar	20	OC	0,85	6
Placa de fibra	tablero prensado	70	OC	0,77	9
Placa de fibra	tablero prensado	70	OL	0,89	9
Placa de fibra	conglomerado	70	OC	0,75	9
Placa de fibra	conglomerado	70	OL	0,88	9
Plata	pulido	100	T	0,03	2
Plata	puro, pulido	200-600	T	0,02-0,03	1
Platino		17	T	0,016	4
Platino		22	T	0,03	4
Platino		100	T	0,05	4
Platino		260	T	0,06	4
Platino		538	T	0,10	4
Platino		1094	T	0,18	4
Platino	puro, pulido	200-600	T	0,05-0,10	1
Platino		1.000-1.500	T	0,14-0,18	1
Platino	alambre	50-200	T	0,06-0,07	1
Platino	alambre	500-1000	T	0,10-0,16	1
Platino	alambre	1.400	T	0,18	1
Platino	cinta	900-1.100	T	0,12-0,17	1
Plomo	sin oxidar, pulido	100	T	0,05	4
Plomo	brillante	250	T	0,08	1
Plomo	oxidado, gris	20	T	0,28	1
Plomo	oxidado, gris	22	T	0,28	4
Plomo	oxidado a 200°C	200	T	0,63	1
Plomo rojo		100	T	0,93	4
Plástico	PVC, suelo de plástico, sin brillo, estructurado	70	OC	0,94	9
Plástico	PVC, suelo de plástico, sin brillo, estructurado	70	OL	0,93	9

1	2	3	4	6	6
Plástico	placa de aislamiento de poliuretano	70	OC	0,29	9
Plástico	placa de aislamiento de poliuretano	70	OL	0,55	9
Plástico	lámina de fibra de vidrio (placa de circuitos impresos)	70	OC	0,94	9
Plástico	lámina de fibra de vidrio (placa de circuitos impresos)	70	OL	0,91	9
Polvo de magnesio			T	0,86	1
Polvo de plomo rojo		100	T	0,93	1
Porcelana	blanca, brillante		T	0,70-0,75	1
Porcelana	vidriada	20	T	0,92	1
Teja	vidriada	17	OC	0,94	5
Tela	negra	20	T	0,98	1
Tierra	seco	20	T	0,92	2
Tierra	saturada con agua	20	T	0,95	2
Titanio	pulido	200	T	0,15	1
Titanio	pulido	500	T	0,20	1
Titanio	pulido	1000	T	0,36	1
Titanio	oxidado a 540°C	200	T	0,40	1
Titanio	oxidado a 540°C	500	T	0,50	1
Titanio	oxidado a 540°C	1000	T	0,60	1
Tungsteno		200	T	0,05	1
Tungsteno		600-1.000	T	0,1-0,16	1
Tungsteno		1.500-2.200	T	0,24-0,31	1
Tungsteno	filamento	3300	T	0,39	1
Yeso		20	T	0,8-0,9	1
Óxido de aluminio	polvo activado		T	0,46	1
Óxido de aluminio	polvo puro (alúmina)		T	0,16	1
Óxido de cobre	rojo, polvo		T	0,70	1
Óxido de níquel		500-650	T	0,52-0,59	1
Óxido de níquel		1000-1250	T	0,75-0,86	1

Annex 2: ARTICLES



Available online at
SciVerse ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com/en



Case study

A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography – A case study

Fabio Bisegna^{a,*}, Dario Ambrosini^{b,1}, Domenica Paoletti^{b,2}, Stefano Sfarra^{b,3}, Franco Gugliermetti^{a,4}

^a SAPIENZA, University of Rome, Department of Astronautical, Electrical and Energetic Engineering, 18, Via Eudossiana, 00184 Rome, Italy

^b DIIE, University of L'Aquila, 18, Via G. Gronchi, 67100 L'Aquila, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 October 2012

Accepted 18 March 2013

Available online 20 April 2013

Keywords:

Infrared thermography

Thermal imprints

Historical buildings

Preventive diagnosis

Seismic risk

ABSTRACT

The significant number of buildings constructed in the world before the appearance of compulsory earthquake projecting norms, as well as the subsequent construction in the safe seismic zones, requires a constant re-evaluation of the strength of the structures. For example, the 2009 earthquake happened in L'Aquila city (Italy), killed about 300 people. Furthermore, many old buildings, seriously damaged, were considered as historical monuments and their importance is still critical both from a cultural standpoint and for the city itself. On the basis of the surveys carried out by the Las.e.r. Laboratory (university of L'Aquila) before and after 2009 earthquake, this paper introduces the infrared thermography (IRT) as a mean to characterize particular thermal imprints that appear on ancient facades, employing the passive thermography, discussing the infrared images collected during several years, and analyzing their relationship with all kinds of influence factors, in order to validate the effectiveness of the technique and its role in preventive diagnosis.

© 2013 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Research aims

Infrared thermography (IRT) for building diagnostics can identify abnormalities that could otherwise go undetected and could evolve to more serious problems.

In this paper, the performance and the effectiveness of IRT in the preventive diagnosis for consolidation and in the evaluation of the risk of damage after the 2009 seismic event based on an experimental campaign of the historical cultural heritage of L'Aquila city (Italy) and its surroundings are discussed.

2. Introduction

IRT is a proactive troubleshooting and predictive maintenance tool [1–3]. In building diagnostics, it is an excellent tool for fast identification of masonry textures and discontinuities, hidden structures, cracks pattern, structural failures, moisture and humidity

problems. In the investigation of historical structures, where a restoration or conservation treatment can cause irreversible damage to the structure, it is considered to be of most importance, and together with other NDT methods can be also used on panel paintings, mosaics and frescos [4–7].

This method is excellent for subsurface investigations through acquisition of surface thermal patterns: temperature varying in space and time may reveal discontinuities beneath the surface, moisture growth, cracks or other kinds of defects. This is why it has been recently proposed [8] as a method to prevent historical building structures from damages caused by earthquakes. Moreover, there is the experimental evidence [9] that some subsurface cracks not detectable to the naked eye and evidenced by thermographic analysis represent the baselines of the damages produced by an earthquake. To go through this, an IRT diagnostic campaign was conducted before and after the 2009 earthquake that seriously damaged L'Aquila (Italy). In this paper, we present the results of the preventive thermographic campaign reconsidered by comparison with new measurements and inspections performed in the years 2009–2010. This investigation involved a relatively large number of historical buildings in order to give account of the potentiality and limits of this new application of IRT. In the following, a synthetic presentation of the area and of the buildings (§3) and then the experimental results (§5) will be presented. For the sake of brevity, we kindly ask the reader to check the references for a detailed description of the IRT technique and potential applications.

* Corresponding author. Tel.: +39 06 48 14 332; fax: +39 06 48 80 120.

E-mail addresses: fabio.bisegna@uniroma1.it (F. Bisegna),

dario.ambrosini@univaq.it (D. Ambrosini), domenica.paoletti@univaq.it

(D. Paoletti), stefano.sfarra@univaq.it (S. Sfarra), franco.gugliermetti@uniroma1.it

(F. Gugliermetti).

¹ Tel.: +39 08 62 43 43 34; fax: +39 08 62 43 43 03.

² Tel.: +39 08 62 43 43 36; fax: +39 08 62 43 43 03.

³ Tel.: +39 08 62 43 43 36; fax: +39 08 62 43 43 03.

⁴ Tel.: +39 06 44 58 54 29; fax: +39 06 44 58 56 62.

3. Location and characteristics of the historical buildings considered in the research

All the historical buildings considered are located in the surroundings of L'Aquila (AQ) the regional capital of the Abruzzo region, in Central Italy. The area is full of historical buildings and monuments of different ages. In April 2009, it was hit by a shocking earthquake and most of these structures were seriously damaged. In this case study, five historical buildings are considered.

3.1. Santa Maria ad Cryptas, Fossa (AQ)

Santa Maria ad Cryptas is among the best examples of Gothic art in Abruzzo. It is at about 1 km from the center of Fossa, a fine ancient village 12 km East of L'Aquila (Italy). The investigation of this church was described in detail in a previous paper [9].

3.2. San Silvestro, L'Aquila

Built between the XIII and the XIV century in the surroundings of the West side of the city walls, the church presents a medieval structure with an elegant Romanesque-Gothic façade made of stone. On the right, there is a bell tower (XVIII century). The interior is typically gothic; paintings of rare beauty and frescoes are present.

3.3. Santa Maria di Roio, L'Aquila

The church of Santa Maria di Roio was built in 1391 and suffered extensive damage due to earthquakes over the centuries. The reconstruction changed and simplified the original façade, which is now divided in three bands by pilasters. The central part contains the portal and the great XIV-century rose window, whose dimensions are disproportionate to the overall church, consisting of radial columns variously made.

3.4. Santa Giusta, Bazzano (AQ)

According to tradition, it was built in the XIII century. The structure was altered over the years: the three original naves now can be seen only for the short initial section, while the rest of the building continues with two naves. The façade is the most noticeable part of the church, as it is composed by a grid of small columns and cornices dividing it in three tiers, where anthropomorphic or zoomorphic forms are present. On the left side there is the bell tower, perhaps erected together with the church.

3.5. San Domenico, L'Aquila

The church of San Domenico is part of a vast complex comprising also a monastery and two cloisters. The church, with its Latin cross structure, has two entrances: the main one, with a great Romanesque portal and two circular windows, and a secondary entrance, at the south transept. The plant, with its three naves, transept and apse, is typical of a XIV century church, while the interiors are mainly Baroque, due to the 1700 restoration works.

4. Materials and method

A qualitative comparison between an analysis based on naked eye survey (before and after the earthquake) and an analysis based on passive IRT (before the earthquake) is proposed herein in order to link the thermal imprints detected to the damage arose and affirm their contribution as key factor in a preventive diagnostic campaign. Qualitative analysis may involve direct observation of the structure to identify decay and damage, to determine whether or not the phenomena have stabilized and to decide whether or

not there are immediate risks and therefore urgent measures to be taken.

The application of IRT in building diagnostics involves the evaluation of surface thermal patterns: temperature varying in space and time may reveal discontinuities beneath the surface that modify the heat flow. Once material properties and boundary conditions are roughly known or uniform everywhere, it is possible to locate the defects (discontinuities in masonry, filled openings etc.) of the wall by a map of the surface temperatures.

Generally speaking, each building should be analyzed in detail, clearly identifying the type damage and the resulting temperature pattern in an IR image. This task is made difficult by the great variety of existing masonry. Furthermore, to gain better insight into the structure, quantitative approaches should be used; currently, for the external façades, they are applied on small areas, working without expensive wide-angle lens, using a passive hybrid method, i.e., acquiring several images of the same part for hours during the natural thermal cycle [10]. Instead, for the internal façades, an active approach, i.e. using lamps, is usually used [11]. However, there is an interest also for qualitative and simple approaches that could be used on a large number of buildings and (as in the present case) on the results of previous surveys.

In the current investigation, the thermographic surveys have been repeated several times during the day and for many days, preferably in the early morning before sunrise and in the evening after sunset. Particular attention was paid to the definition of the distance from the instrument to the building, to assure the best fitting resolution for evidencing the irregularities of the structure. Basing on a virtual grid ideally dividing the buildings in parts, thermal images were acquired, post-elaborated and matched to obtain only one radiometric image. The device used is a Flir Systems ThermoCAM S65, based on a microbolometric non-cooled FPA detector, sensible to the spectral range 7.5–13 μm . The environmental conditions have always been recorded during the measurements by means of the thermo-hygrometer De Lorenzo Instruments DLIN TH500.

5. Experimental results

All the buildings were investigated by passive IRT in the period 2003–2008 and then after the 2009 seismic event.

Comparing the information of naked eye and thermographic surveys before the earthquake, it is possible to recognize some warnings of decay: capillary humidity coming from the ground (the coldest areas), incipient formation of cracks, and lack of homogeneity among different materials used. After the 2009 earthquake, the situation became so critical that safety measures were required to prevent further damages.

As shown in detail in [9], the state of cracking after the earthquake is quite superimposable to the map of decay detected before the earthquake, confirming the preventive value of thermographic diagnosis: although the damage was not visible by naked eye before the earthquake, traces of lack of mortar on the masonry and discontinuities were detectable by IRT.

By comparing the images on Figs. 1–4, the main damages can be detected:

- in S. Silvestro (Fig. 1), the overturning of the left upper part of the façade, as well as damages to the bell tower;
- in S. Maria di Roio, the damages are evident in the left upper part (Fig. 2);
- in S. Giusta, the bell tower crashed, and all the roof, especially near the central window is seriously damaged (Fig. 3). This is particularly interesting, because historical reconstruction studies [12] demonstrated a substantial remodeling of the façade in the

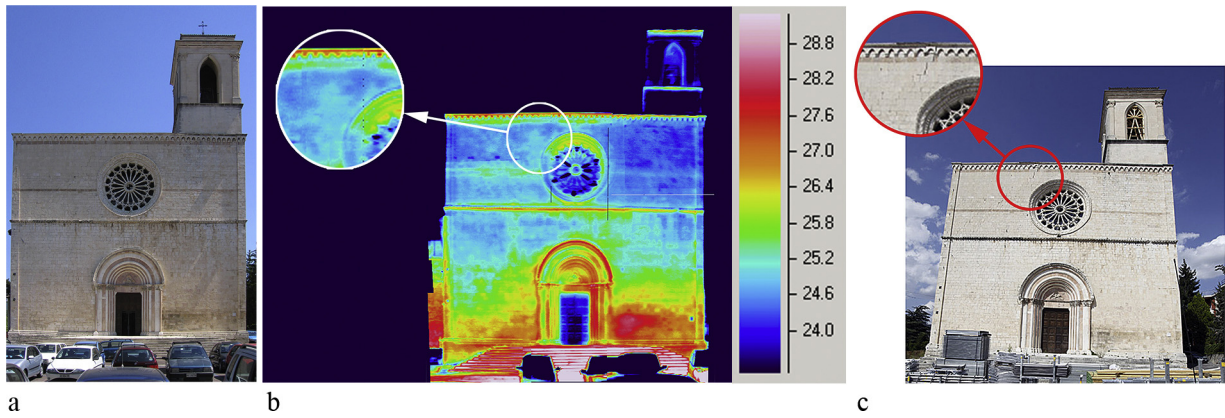


Fig. 1. San Silvestro: naked eye images May 2004 (a) and July 2009 (c) and thermogram (b). The façade is South–South West facing and the thermogram was taken on 20 July 2004 at 21:45.

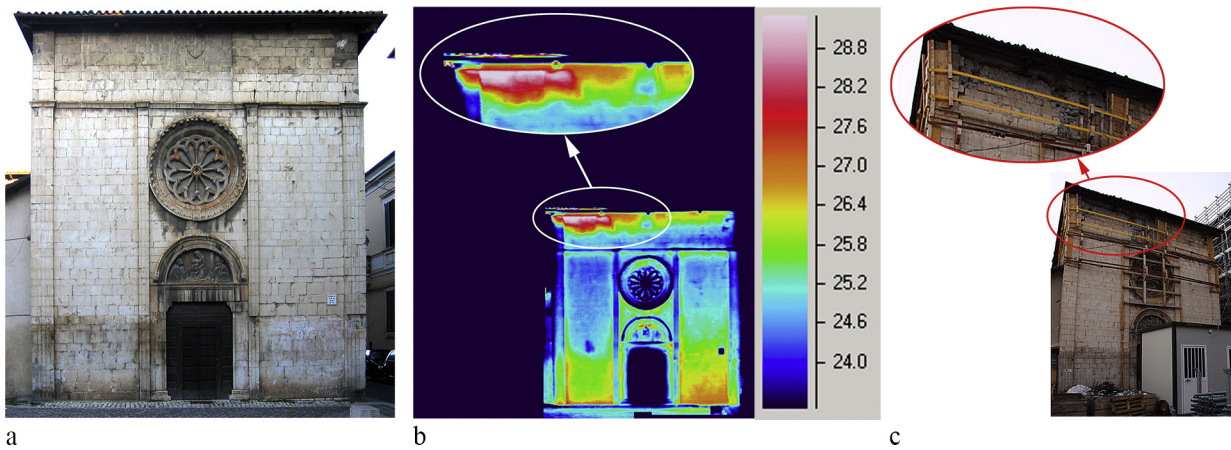


Fig. 2. Santa Maria di Roio: naked eye images August 2004 (a) and July 2009 (c) and thermogram (b). The façade is East facing and the thermogram was taken on 18 August 2004 at 7:00 a.m.

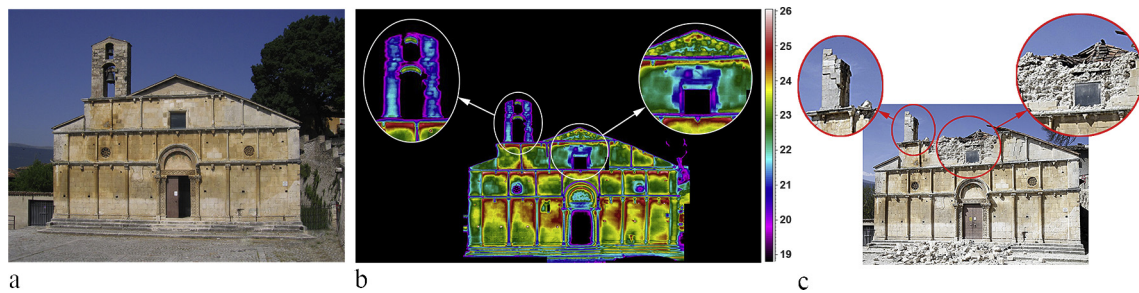


Fig. 3. Santa Giusta: naked eye images May 2005 (a) and July 2009 (c) and (b). The façade is East facing and the thermogram was taken on 8 August 2008 at 6:30 a.m.

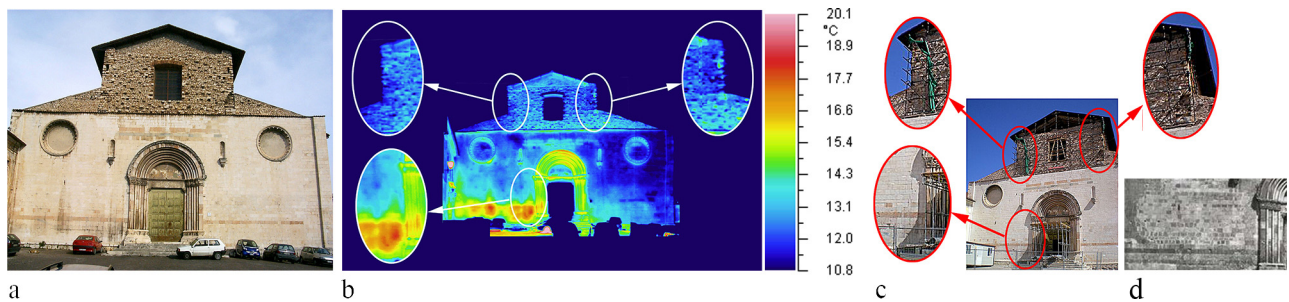


Fig. 4. San Domenico: naked eye images February 2003 (a), July 2009 (c) and end of XIX century (detail) (d) and thermogram (b). The façade is South West facing and the thermogram was taken on 27 March 2003 at 21:10.

damaged area, with a rose window substituted by the central window;

- in S. Domenico, the main entrance and the upper part (Fig. 4). A comparison with an ancient image, see Fig. 4 (d), shows that thermal imprints and damaged, that occurred on the left of the portal, are coincident with a difference in masonry texture (perhaps an old repair work).

The most relevant damages produced by the earthquake can be inferred by a qualitative analysis of the thermal images captured in the period 2003–2008, and they come to life after the earthquake. The procedure proposed could be generalized to other cases of the same type if the thickness of the walls, as well as their change over time, is well known, i.e. the historical data must be available [13].

6. Conclusions

In building diagnostics, and especially in the investigation of historical structures, IRT is used for the identification of cracks patterns, structural failures, moisture and humidity problems. In a previous paper [9], the authors presented an application of passive IRT for preventing historical building structures from damages caused by earthquakes. In this paper, some results of thermographic surveys conducted before and after the 2009 earthquake are presented. The analysis showed that damages occurred after the earthquake were corresponding to thermal imprints previously detected, and this demonstrated the effectiveness of IRT as a mean for safeguarding the cultural heritage from the risk of damages caused by seismic events.

References

- [1] X.P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing*, Wiley, New York, 2001.
- [2] ASNT Nondestructive testing Handbook, third edition: Vol. 3, Infrared and Thermal Testing. Technical Editor: X.P.V. Maldague. Editor: Patrick O. Moore (2001) cap. 18.
- [3] N.P. Avdelidis, D.P. Almond, A. Dobbins, B.C. Hawtin, Pulse thermography: philosophy, qualitative and quantitative analysis on certain aircraft applications, *Insight* 48 (2006) 286–289.
- [4] N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *J. Cult. Herit.* 5 (2004) 119–127.
- [5] E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti, Monitoring of ancient buildings by the thermal method, *J. Cult. Herit.* 3 (2002) 21–29.
- [6] G.M. Carlomagno, C. Meola, Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT, *NDT&E Int.* 35 (2002) 559–565.
- [7] D. Ambrosini, C. Daffara, R. Di Biase, D. Paoletti, L. Pezzati, R. Bellucci, F. Bettini, Integrated reflectography and thermography for wooden paintings diagnostics, *J. Cult. Herit.* 11 (2010) 196–204.
- [8] E. Grinzato, G. Cadelano, P. Bison, A. Petracca, Seismic risk evaluation aided by IR thermography, *Proc. SPIE* 7299 (2009) 72990C-1.
- [9] D. Paoletti, D. Ambrosini, S. Sfarra, F. Bisegna, Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) 116–121.
- [10] E.Z. Kordatos, D.A. Exarchos, C. Stavrakos, A. Moropoulou, T.E. Matikas, Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments, *Constr. Build. Mater.* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.062> [In press].
- [11] E.Z. Kordatos, D.A. Exarchos, C. Stavrakos, A. Moropoulou, T.E. Matikas, Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments, *Constr. Build. Mater.* (2013), In press.
- [12] <http://www.youtube.com/watch?v=r3eHQpCMcR8>, accessed on 10 January 2013.
- [13] M. Moretti, *Architettura Medievale in Abruzzo*, De Luca, Roma, 1971.



Pathology of building materials in historic buildings. Relationship between laboratory testing and infrared thermography

C. Lerma^a✉, Á. Mas^a, E. Gil^a, J. Vercher^a, M.J. Peñalver^a

a. Universitat Politècnica de València. (Valencia, España)
✉clerma@csa.upv.es

Received 13 December 2012
Accepted 12 March 2013
Available on line 01 April 2013

ABSTRACT: Study of historic buildings requires a pathology analysis of the construction materials used in order to define their conservation state. Usually we can find capillary moisture, salt crystallization or density differences by deterioration. Sometimes this issue is carried out by destructive testing which determine materials' physical and chemical characteristics. However, they are unfavorable regarding the building's integrity, and they are sometimes difficult to implement. This paper presents a technique using infrared thermography to analyze the existing pathology and has the advantage of being able to diagnose inaccessible areas in buildings. The results obtained by this technique have been compared with those obtained in the laboratory, in order to validate this study and thus to extrapolate the methodology to other buildings and materials.

KEYWORDS: Limestone; Decay; Physical properties; Thermal analysis

Citation / Citar como: Lerma, C.; Mas, Á.; Gil, E.; Vercher, J.; Peñalver, M.J. (2014) Pathology of Building Materials in Historic Buildings. Relationship Between Laboratory Testing and Infrared Thermography. *Mater. Construcc.* 64 [313], e009 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2013.06612>

RESUMEN: *Patología de materiales de construcción en edificios históricos. Relación entre ensayos de laboratorio y termografía infrarroja.* El estudio de edificios históricos requiere un análisis de la patología de los materiales de construcción empleados para poder definir su estado de conservación. Habitualmente nos encontramos con humedades por capilaridad, cristalización de sales o diferencias de densidad por deterioro. En ocasiones esto se lleva a cabo mediante ensayos destructivos que nos determinan las características físicas y químicas de los materiales, pero que resultan desfavorables respecto a la integridad del edificio, y en ocasiones resulta complejo llevarlos a cabo. Este trabajo presenta una técnica para analizar la patología existente mediante el empleo de termografía infrarroja con la ventaja de poder diagnosticar zonas de difícil acceso en los edificios. Para validar este estudio se han comparado los resultados obtenidos mediante esta técnica con los alcanzados en el laboratorio. De esta forma podemos extrapolar la metodología empleada a otros edificios y materiales.

PALABRAS CLAVE: Caliza; Deterioro; Propiedades físicas; Análisis térmico

Copyright: © 2014 CSIC. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0 License.

1. INTRODUCTION

Conservation measures appropriate to the building under study can only be planned and executed following an accurate diagnosis of the deterioration – including adequate and reliable information about

the materials used, as well as the factors and processes involved in the deterioration (1). It is necessary to be very careful when examining historic buildings and the use of non-destructive techniques such as infrared thermographic imaging facilitates the study of materials without damaging the structure.

In the building studied, as in most historic buildings, various materials have been used. This diversity is due to architectural considerations, constructive or artistic requirements, and proximity to quarrying materials. The state of deterioration of a monument is characterised by the type, intensity, and extent of the damage.

The images in this paper show the outer walls of the Seminary-School of Corpus Christi in Valencia, Spain, comprising a stone footing course under a Valencian-style rammed earth and brick wall some 80 cm thick.

There are several methods of using infrared technology (9), although the most common are active thermographic imaging, which involves artificially heating the sample, and passive thermographic imaging, where the material or the structure is heated by sunlight. When studying large areas, such as the facades of buildings, we believe that passive thermographic imaging is the most suitable option – especially for buildings in narrow streets.

Infrared thermographic imaging was used in previous studies in relation to defects in stone materials and images were interpreted for different points of the walls (3). Areas with thermal discontinuities corresponded to defective points in the material, while points with similar temperatures represent thermal inertia, or the tendency of an element to withstand temperature changes and – depending on the characteristics of the material – dampness and damage (4). Thermographic imaging has also been used to detect dampness using multi-temporal analysis (5). Our contribution focuses on comparing laboratory and material analyses with thermographic imaging in order to corroborate the results obtained using either technique.

In this study, we used a FLIR B335 camera that produces thermographic images at a resolution of 320×240 pixels, with a temperature range of -20 to +120 °C and an accuracy of less than 50 mK NETD. The thermographic images were subsequently processed with FLIR QuickReport software, which can vary the colour palette, temperature range, distance, as well as calculate the maximum, minimum, and average temperatures in the study areas. The temperature of each pixel in the image can be exported in Excel format.

2. METHODOLOGY

The procedure involves an analysis of thermographic images of a building. We compare the results obtained from these images with laboratory tests made on the materials.

The materials analysed are traditional limestone blocks from the Valencia region, such as stone from Godella and Ribarroja (widely used for centuries in the city of Valencia) and Bateig Azul limestone (in use today).

Laboratory tests detail the characteristics of the material, such as density, porosity, chemical composition, etc., and infrared imaging reveals the thermal behaviour of these materials. The weight of the samples used in the laboratory is registered using precision scales (0.01 g).

2.1. Infrared thermography

The ability to clearly see defects in a material depends on the difference between the thermal characteristics of the material and the degree of homogeneity (6), while the thermal behaviour of a material largely depend on its characteristics (thermal diffusion, porosity, density, etc.). The emissivity value is higher than 90% for most common construction materials, and in our case we have used a default value of 0.95 so that the results of measurements can be considered reliable (7).

Passive thermography has been used in laboratory and in situ tests. According to Cañas (8), in the absence of heat from the sun, data obtained from thermographic imaging is very accurate for ceramics, stone, and adobe. However, if the sun's rays shine on a facade then the thermal response of the material is altered. The thermal images shown in this study were taken before dawn, when the material was at its coolest, and this enables us to make fewer errors when comparing data and images.

The temperature difference between materials is largely due to density and specific heat, and in particular, thermal inertia. Stone has considerable capacity to store energy and takes longer to heat or cool than materials such as brick.

We linked the thermal images with some of the properties of stone, and examined those properties that are linked to the deteriorating state of the building as they involve water circulation mechanisms in porous media.

Building materials are porous and can deteriorate through moisture penetration, compound dissolution, salt migration and crystallisation, or volumetric changes such as swelling, cracking, and flaking (2).

2.2. Test description

2.2.1. Rising dampu

The walls of the building sit on humid ground. Dampness rises through the walls due to capillary action, while drying occurs on the walls due to surface evaporation. There is normally an equilibrium between the two phenomena that generates a wet front or tide mark of capillary action.

The drying process can be divided into two stages: the first corresponds to evaporation from the surface and depends on capillary action and the nature of the solution – and is a linear function in time (13). The second stage has a much slower rate of evaporation and

corresponds to the water vapour diffusion through the porous medium towards the surface (14, 15).

The formula for capillary action is [1] (16):

$$H=2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta / (r \cdot \rho \cdot g) \quad [1]$$

Where, γ : surface tension, θ : contact angle, r : capillary radius, ρ : liquid density, g : gravity.

The equilibrium formula (17) between capillary action and evaporation is [2]:

$$h=S (b / (2 \cdot e \cdot \theta_w))^{1/2} \quad [2]$$

Where, h : capillary equilibrium height; S : absorption capacity; b : wall thickness; e : evaporation rate per unit of humid surface area; θ_w : water content in the humid region (volume of water for unit volume of material).

To apply Equation [2] we use the following data (17): the absorption capacity S of the limestone is in the range (0.5–1.5) mm/min^{1/2} so we chose as an average value 1.0 mm/min^{1/2}. The fraction of volume of porosity f is generally and approximately 0.25, and in the knowledge that $\theta_w=0.85f$, we assume $\theta_w=0.2$. We assume the wall to be 800 mm thick. For the evaporation rate, we assume the value of $e=0.004$ mm/min (a rate four times greater than the average annual potential evaporation in the UK). We ignore the action of gravity. In this way, we obtain an equilibrium height of $h=0.71$ m. This theoretical measure provides a reference with respect to the actual level reached at any time, as the balance varies depending on weather conditions.

The surrounding stone footing has a height between 0.5 and 1.5 m, and there are areas where

the rising damp wet front reaches the rammed earth wall (Figure 1).

Tests in the laboratory were based on UNE-EN 1925:1999: ‘Test methods for natural stone – determination of coefficient of water absorption by capillary action which specifies a method for determining the coefficient of water absorption by capillary action of natural stone.’ In accordance with this norm, the results (see the graph in Figure 2) show the mass absorbed in grams divided by the area of the submerged base of the test area in m², based on the square root of the time in seconds. The graph shows two straight lines that indicate the value of C_1 on the slope of the first stage [3],

$$\text{where } C_1=(m_i - m_d) / A \cdot t_i \quad [3]$$

With m_i : mass for moment i (g); m_d : dry mass (g); A : area of the submerged base (m²); t_i : duration of a moment (s).

2.2.2. Salt crystallisation

Efflorescence is the crystallisation of salts on the surface of the material. A hard black scab or crust may be produced that contains various carbonaceous products of pollution (including soot and dust). Scaling, scabbing, or flaking produces laminas a few millimetres thick and parallel to the surface (10).

This is caused by salt crystals, such as potassium or sodium sulfates, commonly found in wall materials, and occurs above all in the summer. Efflorescent

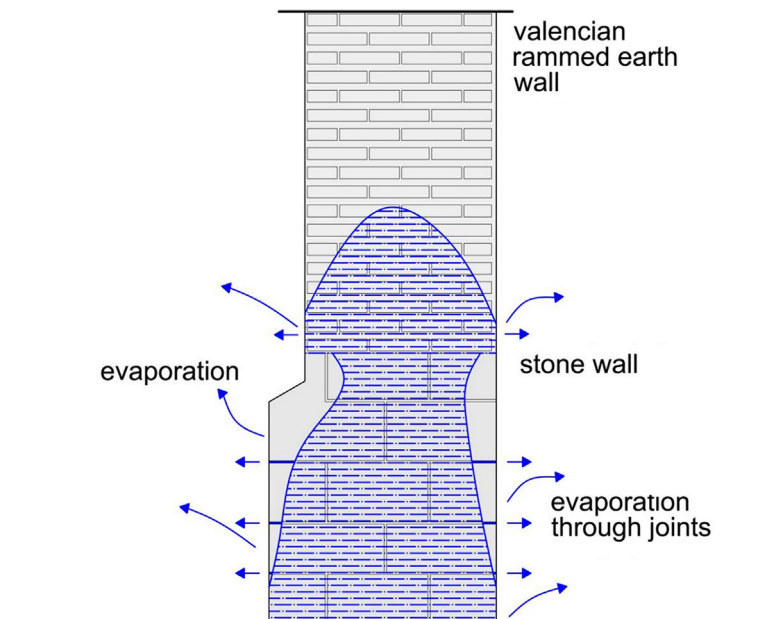


FIGURE 1. Capillary rise in a stone and rammed earth wall.

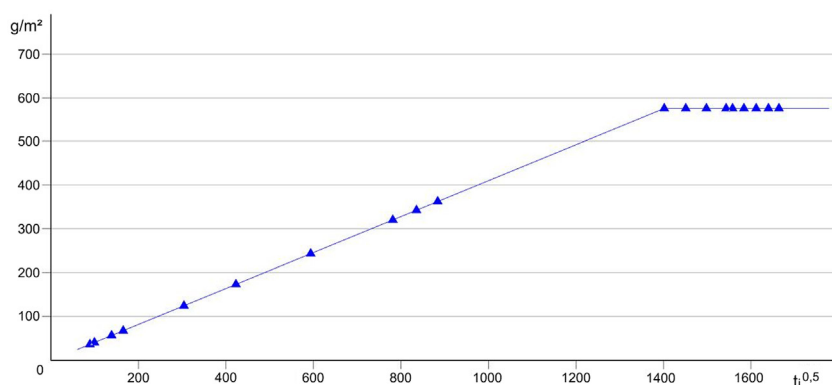


FIGURE 2. Absorption of water by capillary action plotted against the square root of time (seconds).

salt marks indicate points of evaporation on the surface of porous materials, or with the same frequency, just below the surface and within the pores.

2.2.3. Identification of the characteristics of different materials

In the laboratory, we compared two limestone samples of differing densities. One sample was from the Godella stone quarry ($D_a = 2.55 \text{ g/cm}^3$) and the other sample was from the Bateig quarry ($D_a = 2.21 \text{ g/cm}^3$). The test consisted of maintaining the samples for 72 hours at $70 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, as in other procedures for natural stone, and recording with a thermographic camera the heat loss over time (in seconds). The room temperature was $24.3 \text{ }^\circ\text{C}$ and relative humidity was 50.3%.

2.2.4. Deterioration caused by loss of density

Density expresses the relationship between the amount of material and volume. The greater the density, the greater the conductivity exponentially (11). The apparent density is a magnitude applied to porous materials, which typically contain air gaps, so that the total density is less than the density would be if the material were compacted.

Deterioration caused by loss of density in the material has been previously studied for other materials such as wood (12).

In the laboratory, we forced the deterioration of the material by adding hydrochloric acid (25% HCl) as described by D'Orazio (22). Acid partially dissolves the limestone, and leaves insoluble residues. In this way, we decreased the apparent density of the sample.

3. RESULTS

Table 1 summarizes the results of the tests performed, both in situ and in laboratory and in some cases, theoretical.

3.1. Capillarity

3.1.1. In situ

Once a structure is damp, the factors on which drying depend are: temperature, relative humidity, microenvironment, porosity, mechanical behaviour of the material, and duration of the humid/drying cycle (23).

Figure 3 clearly shows how the curve generated by rising damp capillary action of groundwater is reflected in the infrared image.

3.1.2. In laboratory

The results of capillary water absorption test with quarry samples demonstrate that capillary action in this material is slow.

Recent experiments have shown that higher moisture content means higher material temperatures when compared with dryer parts or materials (2). The cooling effect from evaporation is evident as the temperature is lower than the surrounding temperature. Additionally, the properties of the material significantly influence the rate of evaporation and, therefore, the speed at which a material yields moisture into the atmosphere.

In laboratory tests performed following the work of Gaius (21) it can be seen that evaporation begins once a material is dampened, and the surface temperature clearly falls. As the material loses moisture, the surface temperature and the surrounding air temperature begin to equalise.

In the laboratory, we conducted an experiment that consisted of observing and recording the evolution over time of the drying process of the samples (Figure 4).

Figure 5 shows the thermographic images for three stages of the evaporation process. Of the six samples, the first two (left) correspond to curve (a); the centre two to curve (b); and the last two (right) to curve (c). In this greyscale image, black indicates

TABLE 1. Results of tests

TEST	TYPE	MATERIAL	RESULT
Capillarity	Theoretical	Limestone	Height 0.71 m.
	Laboratory	Bateig	Ta=83% Evaporation Tb=88% Tc=100%
	On site	Godella	Variable depending on weather conditions (T and RH). Height measured with thermal camera 1.30 m.
Crystallization of salts	Theoretical	Bateig	Evaporation in colder regions, areas of salts concentration.
	On site	Sandstone	Efflorescence T1=100% T2=94%
		Ribarroja	Flakes T1=100% T2=56%
Material identification	Laboratory	Godella D1=2,55	t0 t1 t2 t3 100% 64% 57% 34%
		Bateig D2=2,21	86% 50% 43% 34%
	On site	Godella D1=2,60 P: 15%	T1=80%
		Ribarroja D2=2,64 P: 5%	T2=100%
Density deterioration	Laboratory	Bateig D1=2,21 D2=1,91	T1=100% T2=81%
	On site	Godella D1=2,60 D2=2,12	T1=100% T2=85%

D: Bulk density. P: porosity. t: time. T: temperature

lower temperatures (up to 18.7 °C), and white indicates higher temperatures (room temperature is 24.3 °C). It can be seen how the two samples on the right remain at room temperature and humidity (and are consequently difficult to see). As the experiment advances, the other four samples lose moisture and so their temperatures approach room temperature.

Figure 6 (left) shows the moisture content as a percentage of the dry weight of the six samples, and illustrates how weight loss evolves over time. The graph shows three curves, each curve representing the average of two samples with differing levels of moisture – and it can be seen how these samples tend to equilibrate with the moisture level in the

atmosphere. Curve (a) refers to two samples that were immersed in water for 72 hours, long enough to absorb more water than the other samples; samples (b) were only immersed for 5 minutes; the (c) samples were references for room temperature (24.3 °C) and humidity (52.9%). The results are summarized in Table 1.

Figure 6 (right) also shows the change in the temperature of the samples. The curve (a) samples are wetter, take longer to evaporate the absorbed water, and therefore maintain a low temperature for longer. Curve (b) samples are drier, evaporate more easily, and the temperature begins to rise more quickly. Curve (c) samples maintain initial moisture and temperature at constant levels.

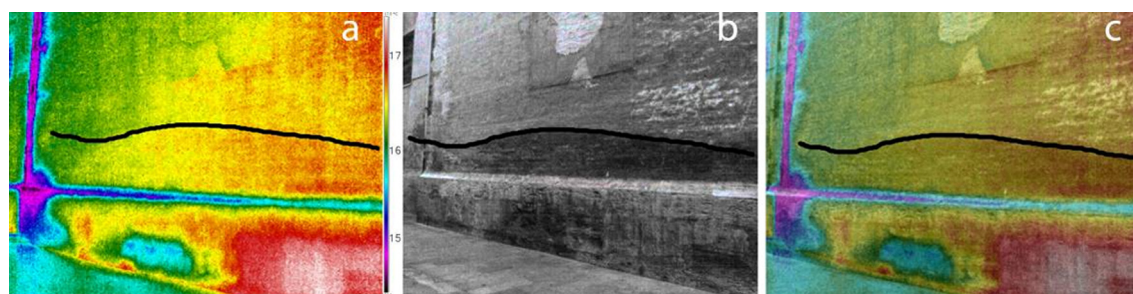


FIGURE 3. Capillary rise of the water viewed in (a) with a thermographic camera, (b) a photograph and (c) the superimposition of (a) over (b).



FIGURE 4. Equipment required for thermographic imaging and sample weight.

3.2. Salt crystallisation

3.2.1. Theoretical

A distinct type of deterioration due to the crystallisation of salts in the material (20) (Figure 7) is produced in function of the speed of evaporation (V_1), and speed of water migration towards the surface (V_2).

The consequences of the accumulation of salt can block pores and capillaries through which water evaporates, pushing the wet front or tide mark upwards and so increasing moisture levels

(18), reducing the capillary absorption coefficient (19). Moreover, the constant dissolution and recrystallisation of salts, as caused by changes in humidity and temperature, can damage a building material. Sodium sulphates from groundwater can be particularly destructive to buildings and monuments (24).

3.2.2. In situ

The wall in Figure 8 clearly shows rising damp on a facade that faces north and so never receives direct sunlight. Depending on the speed of evaporation (V_1), efflorescence may appear. A thermographic image shows a set of colours that represents the temperature for each point. In this figure, a temperature graph for the material is superimposed on an axis so that we can quantify temperature variations.

The facade in Figure 9 faces south and receives sunlight, therefore the speed of evaporation (V_1) is greater than in the previous case and the pathology generated is scaling – as shown in the figure.

The Ribarroja stone positioned at the doorway of the Seminary-School of Corpus Christi is suffering degradation in parallel lines that is generating a series of flakes at the surface. Not all the flakes are visible to the naked eye, but they are easily detected with thermal imaging (Figure 10). The flaking suffered by the stone involves the

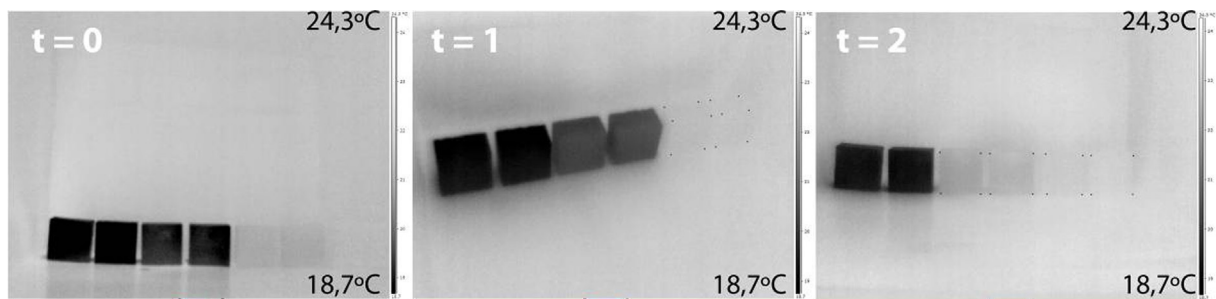


FIGURE 5. Evaporation process of thermography.

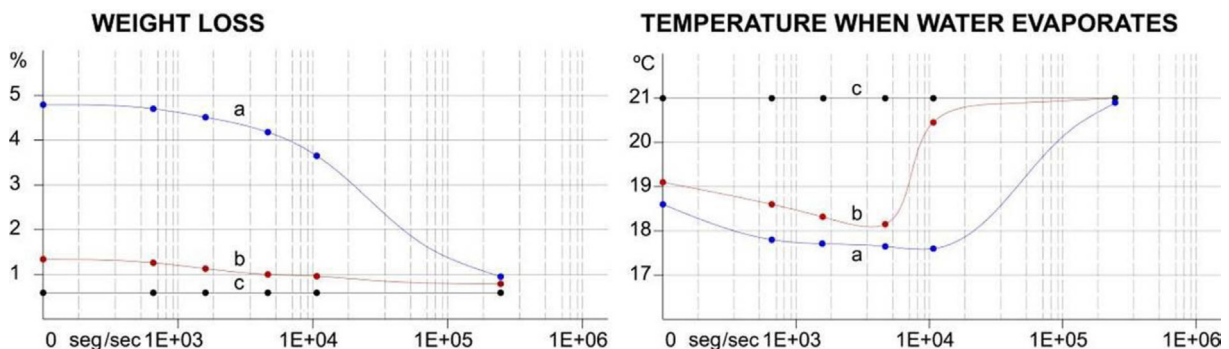


FIGURE 6. Weight loss and temperature while evaporating the water from the samples.

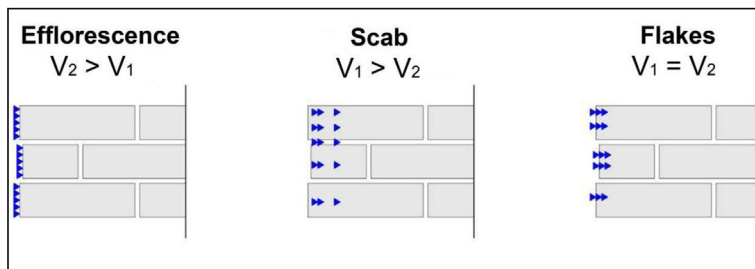


FIGURE 7. Material deterioration morphology cause by salt crystallization.

separation of one or more layers (altered or not) of uniform thickness (several millimetres). These flakes run parallel to each other and the structural line or a fault line in the stone (10). The flakes are thin and cool rapidly.

Figure 10b shows the pathology in detail. Flakes are forming and coming loose. Where the flakes have not become detached we can see the surface of the stone, and where no flakes remain we can see the inside of the stone blocks.

3.3. Identification of the characteristics of different materials

3.3.1. In situ

Figure 11 illustrates two types of stone, the footing being made of stone from Godella (left) and stone from Ribarroja (right). The thermographic

image was taken at 7:12 am, after about 12 hours without sunlight, and the air temperature was 7.3 °C. The analytical data is given in Table 2. Bearing in mind that Ribarroja stone is less porous and denser (mean values), the thermographic image shows a thermal response 20% higher than that of Godella stone (Table 1). Denser and more compact stone has greater thermal inertia and better maintains a temperature.

3.3.2. In laboratory

Figures 12 and 13 show the loss of temperature (the Godella sample is on the left and the Bateig sample is on the right). It can be seen how over time this sample always registers a higher temperature, and so we can confirm that when a sample has a higher density it also maintains higher temperatures.

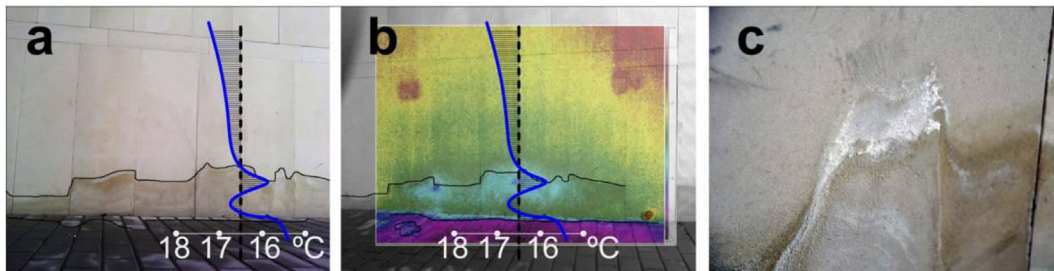


FIGURE 8. Ashlar with efflorescence, (a) thermographic image, (b) photograph and (c) superimposition of (a) over (b).

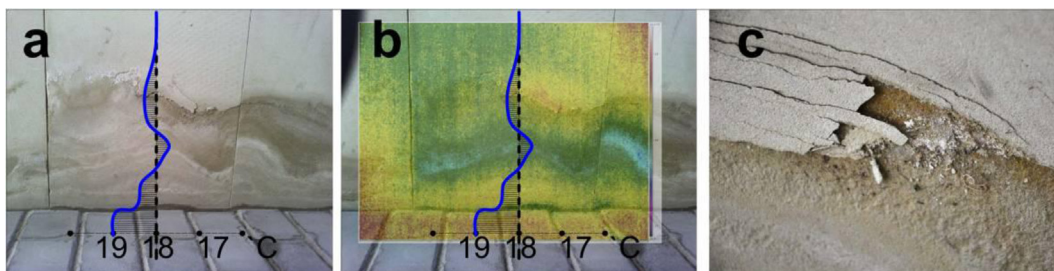


FIGURE 9. Ashlar with flakes, (a) thermographic image, (b) photograph and (c) superimposition of (a) over (b).

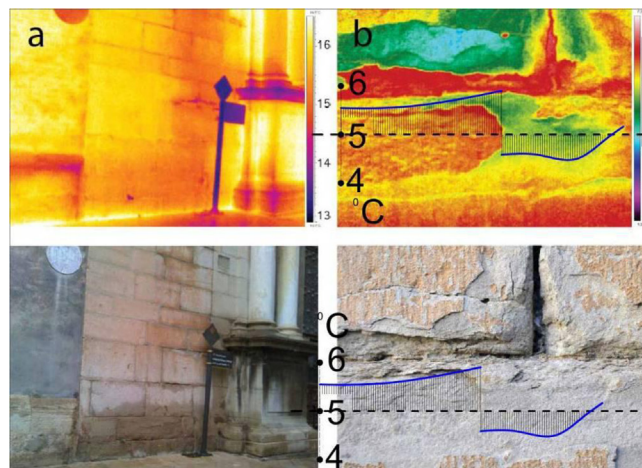


FIGURE 10. General view (a) and detail (b) of an instance of spalling. Thermographic images (top) and photographs (bottom).

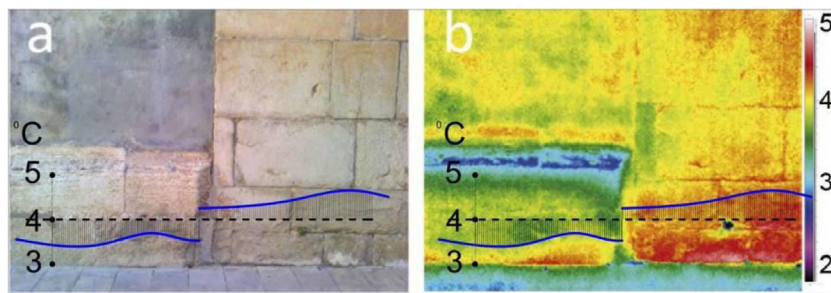


FIGURE 11. Comparison between Godella and Ribarroja stone. Photograph (a) and thermographic image (b).

3.4. Deterioration caused by loss of density

3.4.1. In situ

In Figure 14 we can see an area of the stone footing made from Godella stone. All the blocks are of the same type of stone and positioned facing west, but in the left part of the images it can be seen that alveolisation has occurred. Temperature and humidity conditions were identical as the thermographic images were taken at the same time. The thermographic images show how the temperature in the damaged area is reduced by 15%, since the left area has an average temperature of 4.1 °C and the right area a temperature of 4.8 °C (Table 1).

3.4.2. In laboratory

We moistened the samples and then left them to evaporate. We found that the degraded sample had a lower temperature. Even newly moistened degraded samples showed lower temperatures (Figure 15 and Table 1). Sample 22 was not moistened, unlike samples 23 and 24.

4. DISCUSSION

Passive infrared imaging, which takes into account the cyclical heating affect of the sun, can provide considerable information on building materials and their conservation status.

TABLE 2. Identification of different materials for their characteristics

SAMPLE	GODELLA (LEFT)	RIBARROJA (RIGHT)
Average relative density	2.60 (g/cm ³)	2.64 (g/cm ³)
Average porosity	15%	5%
Temperature	80% (3.27 °C)	100% (4.07 °C)

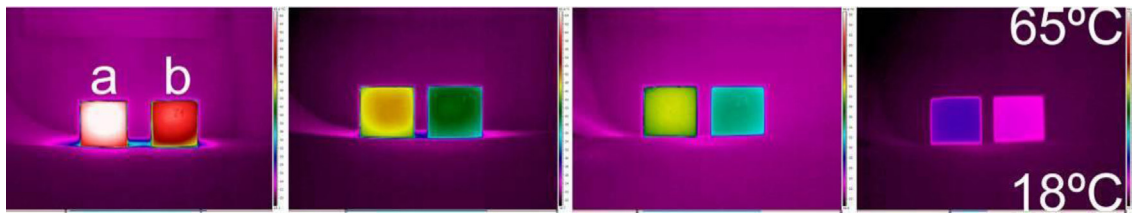


FIGURE 12. Thermography of temperature loss of two samples with different density.

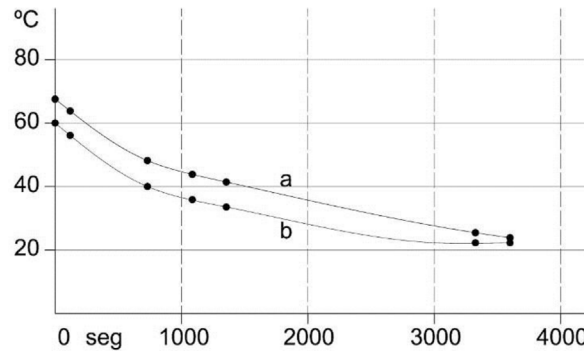


FIGURE 13. Temperature loss of two samples with different density.

We have confirmed in the laboratory that rising damp, or capillary water action through walls, is generally a long process and tends to stabilise according to the environmental conditions for evaporation and the diffusion properties of the material. In the studied case, the average theoretical equilibrium height is 0.7 m (Table 1). The height reached by the wet front can be seen in the thermographic image – as well as the position reached in each moment (Figure 8).

In the laboratory, the cooling effect of evaporation and its relation with the temperature of the material was confirmed. It was shown that at the beginning of the process the temperature falls significantly because of the transformation from liquid to gas. Over time, the material loses humidity and its temperature tends to equalise with the air temperature.

The capillary action of rising damp is linked to salt precipitation. In cases where salts reach the surface

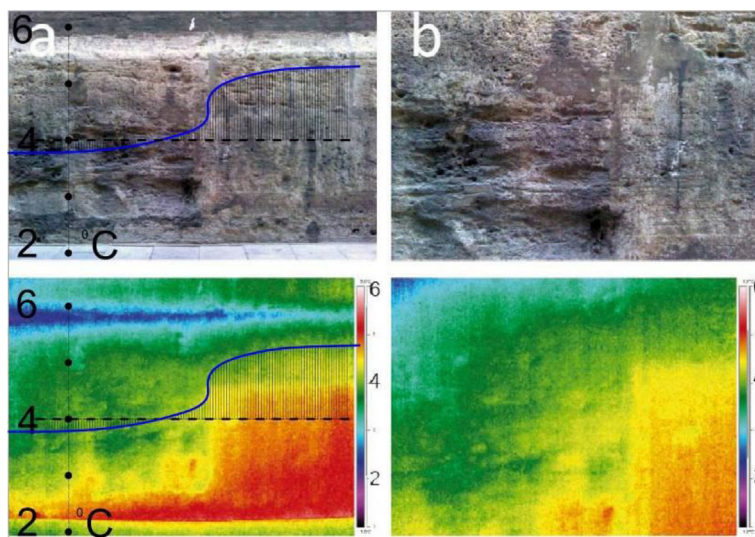


FIGURE 14. General view (a) and detail (b) of the socle with clear superficial erosion. Photographs (top) and thermographic images (bottom).

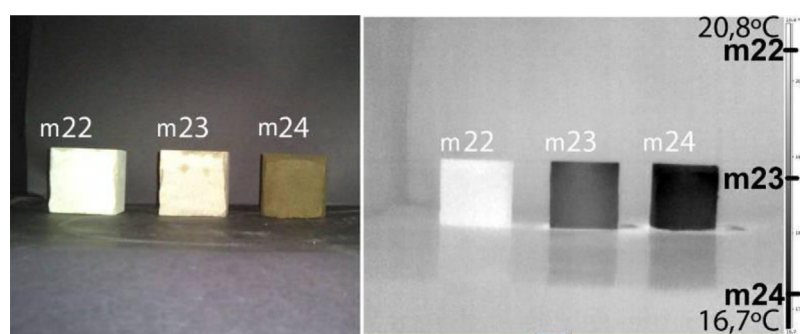


FIGURE 15. Photography and thermography of 3 samples, 23 and 24 just moistened.

(efflorescence) or just below the surface (scaling) differences in temperature are recorded because the stone no longer has same density as the rest of the stone in the wall (Table 1). Infrared thermographic imaging has also been useful in the diagnosis of scaling and flaking (Figure 10). Deterioration in the form of flakes that are parallel to the surface – but slightly separated from the rest of the stone – shows a significant temperature reduction.

To identify two materials, such as two types of stone, environmental conditions must be the same (temperature and relative humidity), either at the building or in a laboratory (Figures 11 and 12), obtaining that materials with higher density and with less porosity reflect a higher temperature (Table 1).

Constant conditions must be maintained when analysing the same material, and we must consider that while the actual density is the same, apparent density differs and is closely related to porosity. In this case, thermographic images show lower temperatures for areas with lower apparent density, and therefore higher porosity (Figure 14). In the laboratory, artificial deterioration was caused by adding hydrochloric acid to a sample and it was found that the sample with the lowest density recorded the lowest temperature.

The more tests we perform, the more details we generally learn. However, destructive tests are not always appropriate because they degrade materials, and in some cases, may degrade the integrity of the building.

We can discover the thermal response of materials and their pathology using thermographic imaging technology or laboratory testing. By comparing the information obtained by both methods, we can produce a better diagnosis and observe the stages prior to deterioration and thus anticipate and initiate appropriate intervention.

5. CONCLUSIONS

Before restoring or rehabilitating a building it is necessary to study its history, the original documentation, and analyse the condition of the construction materials. In this article, we illustrate with

infrared images the most important properties of deteriorated stone materials.

Deterioration in important historical buildings (such as the formation of efflorescence, flaking, powdering, and alveolarisation) requires an analysis that should begin with a diagnosis and survey of the building.

Thermographic imaging can help detect these deteriorations and create a sustainable approach that avoids the use of destructive methods.

A large part of the damage caused to building materials is due to the effect of rainwater. We can observe the cooling effect when water evaporates from the surface of a facade, as well as identify the wet front caused by rising damp, and the height reached by dampness at any given moment.

The rise of groundwater by capillary action (rising damp) generates a wet front within the walls that can be identified by thermographic images, and the results can be compared with laboratory or theoretical results (Table 1).

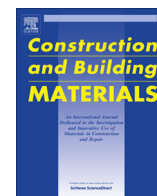
When soluble salts precipitate on the surface, the local density increases and this effect can be seen in thermographic images.

The analysis shows that stone from Godella is more porous than stone from Ribarroja. The apparent density of Godella stone is less than Ribarroja stone, and this is confirmed by the thermal response. This observation enables us to state that when the apparent density is greater, the recorded temperature increases – and this is confirmed in laboratory tests. We can test different areas of the same material under the same conditions and compare the apparent density of the various areas with the thermal response in order to understand which areas have suffered the most deterioration. Areas with less apparent density (greater porosity) are shown in thermographic images to have lower temperatures (up to 15% lower).

This technique enables us to identify areas in which flakes are about to fall loose as it is easy to observe in thermographic images the effects of the reduced thickness of the flakes when compared to undamaged rock.

REFERENCES

- Fitzner, B. en VV. AA (1996). *Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- Válek, J.; Kruschwitz, S.; Wostmann, J.; Kind, T.; Valach, J.; Kopp, C.; Lesák, J. (2010) Nondestructive investigation of wet building material: multimethodical approach. *Journal of performance of constructed facilities*, 462–472. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000056](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000056).
- Danese, M.; Demsar, U.; Masini, N.; Charlton, M. (2010) Investigating material decay of historic buildings using visual analytics with multi-temporal infrared thermographic data. *Archaeometry*, 52 [3], 482–501. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4754.2009.00485.x>.
- Campbell, J.B. (1996) *Introduction to remote sensing*, 2° ed., Taylor & Francis, London.
- Lerma, J.L.; Cabrelles, M.; Portalés, C. (2011) Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. *Constr. Build. Mater.* 25, 2190–2197. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.007>.
- Meola, C.; Carlomagno, G.M.; Giorleo, L. (2004) The use of infrared thermography for materials characterization. *J. Mater. Process. Technol.*, 155–156, 1132–1137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.268>.
- Rodríguez Liñán, C. (2011) Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz). *Informes de la Construcción* 63, 13–22. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.032>.
- Cañas I. (2005) Thermal-physical aspects of materials used for the construction or rural buildings in Soria (Spain). *Constr. Build. Mater.* 19, 197–211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.016>.
- Mercuri, F.; Zammit, U.; Orazi, N.; Paoloni, S.; Marinelli, M.; Scudieri, F. (2011) Active infrared thermography applied to the investigation of art and historic artefacts. *J. Therm. Anal. Calorim.* 104, 475–485. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-011-1450-8>.
- Ordaz, J.; Esbert, R.M. (1988) Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. *Mater. Construcc.* 38 [209], ene-feb-mar, 1988.
- González Cruz, E.M. (2003) *Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática*. Instituto de investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Zulia, Venezuela.
- Rodríguez-Liñán, C.; Morales-Conde, M.J.; Rubio-de Hita, P.; Pérez-Galve, F. (2012) Analysis of the influence of density on infrared thermography and of the scope of this technique in the detection of internal defects in wood. *Mater. Construcc.* 62 [305], 99–113. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2012.62410>.
- Hammecker, C. (1995) The importance of the petrophysical properties and external factors in stone decay on monuments. *Pageoph.* 145, 337–361.
- Scherer, G.W. (1990) The theory of drying. *J Am Ceram Soc.* 73, 3–14.
- Freitas, D.S. (2000) Pore network simulation of evaporation of a binary liquid from a capillary porous médium. *Transp. Porous Media.* 40, 1–25. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006651524722>.
- Rirsch, E.; Zhang, Z. (2010) Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties. *Constr. Build. Mater.* 24, 1815–1820. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024>.
- Hall, C.; Hoff, W.D. (2002) *Water transport in brick, stone and concrete*. London: Spon Press.
- Oliver, A. (1988) *Dampness in buildings*. Oxford: BSP Professional Books.
- Buj, O.; López, P.L.; Gisbert, J. (2010) Characterization of pore system and their influence on decay rates caused by salt weathering on limestones and dolostones quarried in Abanto (Zaragoza, Spain). *Mater. Construcc.* 60 [299], 99–114. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2010.50108>.
- Rossi-Manaresi, R. (1988) *Degradación del Patrimonio*. Conferencia celebrada en la Facultad de Geografía e Historia. Valencia.
- Gayo, E.; De Frutos, J.; Palomo, A.; Massa, S.A. (1996) Mathematical Model Simulating the Evaporation Processes in Building Materials: Experimental Checking through Infrared Thermography. *Building and Environment*, 31 [5], 469–475. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(96\)00007-8](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(96)00007-8).
- D'Oracio, M.; Munafò, P. (2013) A methodology for the evaluation of the hygrometric and mechanical properties of consolidated stones. *International Journal of Architectural Heritage*. <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2012.756078>.
- Binda, L.; Gardani, G.; Zanzi, L. (2010) Nondestructive testing evaluation of drying process in flooded full-scale masonry walls. *J. Perform. Constr. Facil.* 24, Sp. Issue: Flood Impact to Heritage Structures, 473–483. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000097](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000097).
- De Clercq, H. (2008) *Proc. Conference on salt weathering on buildings and stone sculptures*. Copenhagen: Tech University of Denmark.



Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments



E.Z. Kordatos^a, D.A. Exarchos^a, C. Stavrakos^b, A. Moropoulou^c, T.E. Matikas^{a,*}

^a Department of Materials Science and Engineering, University of Ioannina, Greece

^b Department of History and Archaeology, University of Ioannina, Greece

^c School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Greece

HIGHLIGHTS

- ▶ IR thermography can unveil in-depth defects in murals.
- ▶ IR thermography enables nondestructive assessment of damage in cultural heritage monuments.
- ▶ Graduate heating thermography is suitable to characterize degradation of murals from distance and in real time.

ARTICLE INFO

Article history:

Available online 24 August 2012

Keywords:

Non-destructive evaluation
Infrared thermography
Damage assessment
Historic monuments
Murals
Masonries

ABSTRACT

This work presents recent results of infrared thermographic assessment of murals at the “Monastery of Molybdoskepastos” in the Ioannina region (Greece). Infrared thermography is a real-time technique based on monitoring the temperature variation on the surface of materials and structures. This method identifies and interprets differences of surface temperature in the material, enabling the evaluation of damage distribution and accumulation. Infrared thermography is a non-destructive, full field and non-contact technique allowing the characterization of degradation in buildings including historic monuments.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Monitoring the structural safety of cultural heritage monuments is of great importance. Early assessment of murals, frescoes and masonries condition can prevent irreversible damage and can also provide significant information for the restoration and conservation of the monuments. Non-destructive testing and evaluation techniques are the most suitable for this aim. One of the methods used for real time non-destructive monitoring is Infrared Thermography (IRT). It is a full field, non-contact, fairly portable method and its efficiency in the literature is well documented in the investigation of historic structures. IRT is based on the monitoring of object's surface temperature variation. IR cameras detect infrared radiation emitted by materials and create a thermal image depicting the surface temperature distribution. This thermal distribution is influenced by some physical conditions and material properties such as relative humidity, atmospheric temperature, reflected apparent temperature and material emissivity. The knowledge of

materials emissivity is crucial; therefore, many studies on the emissivity of structural materials have been conducted [1–3]. Studies have shown increasing interest in infrared thermography's methodologies. IRT has been successfully used for the damage assessment of historic structures [4,5] and also for the assessment of conservation materials and techniques such as surface cleaning, restoration of masonry by repair mortar and stone consolidation [6–8]. Moreover, infrared thermography has been applied to detect and disclose artificial and in-depth defects such as cork discs, air-filled plastic bags and polystyrene cuboids [9–11], hidden structures like niches and buried openings [12–14], and substrate features as tesserae on a plastered mosaic and sub-surface mural [6–8,15,16]. In addition, one major advantage of thermography applications is the detection of moisture and rising damp in buildings and masonry structures [5,13,17–22]. It should also be mentioned that IRT is a potent tool for damage characterization such as adhesion of frescos, crack mapping [14,16,23,24], insulation deficiencies [20] and can combine well with one-sided ultrasound for assessment of the depth of defects [23–25].

The historic monument (see Fig. 1) studied in this research is situated north of the city of Ioannina (Greece), in the valley of the river Aous and close to the Albanian borders. It is the monastery of the

* Corresponding author. Tel.: +30 26510 07216; fax: +30 26510 08054.

E-mail address: matikas@otenet.gr (T.E. Matikas).



Fig. 1. The exterior view of the monastery of "Molybdoskepastos".

"Assumption of the Virgin", also known as "Molybdoskepastos". This name emerged when the monastery's catholicon was once roofed by lead – "molybdos" – shingles [26–28].

The foundation of the monastery and the establishment of the archbishopric are associated with the name of the emperor "Constantine IV Pogonatos" (AD 668–85) and the tradition is borne out by documentary evidence which may or may not have been invented to supplement the deficiencies of the historians [29]. The catholicon itself has been built in a fairly complex style. It comprises a three-niche church, to the western part of which were progressively added a single-room cross-shaped section then a timber-roofed narthex as well as one chapel upon each of the southern and northern walls of the catholicon, and which are both complete ruins nowadays. The original three niched section, according to the work of researchers, dates from the 11th century; the cross-shaped section from the late 13th or the first two decades of the 14th century; and the narthex on the western side (with many repairs and additions, as it stands nowadays) from the 16th century [30].

The monastery of Molybdoskepastos is stauropegial, which is subjected directly to the Ecumenical Patriarchate. In the 14th century it incorporated a scriptorium; but in the 16th it was at the height of its glory. It was frescoed twice then, in 1521 AD and 1537 AD [31].

There is an interesting donor's inscription over the west door of the church. The text takes up seven lines of script and is dated 1521 AD. Molybdoskepastos has great historical significance and the donor's inscription can give valuable information about the year that the monastery was built or reconstructed.

The aim of this study is the damage assessment of the murals and masonry of the aforementioned Monastery. In order to achieve this goal, infrared thermography inspection, as a non-destructive evaluation method, has been conducted. In the present work, three different IR thermographic approaches were used in order to evaluate the damage of the donor's inscription as well as other parts of the masonry.

2. Experimental study

2.1. Methodology of thermographic investigation

The non-destructive evaluation of a structure using infrared thermography can be achieved by two different approaches, the passive and the active. Active thermography is based on the thermal excitation of the specimen inspected in order to obtain significant temperature differences witnessing the presence of subsurface defects. In this study, three different active thermographic methods have been used to damage characterization of Monastery of Molybdoskepastos's dome and detect in-depth defects on donor's inscription.

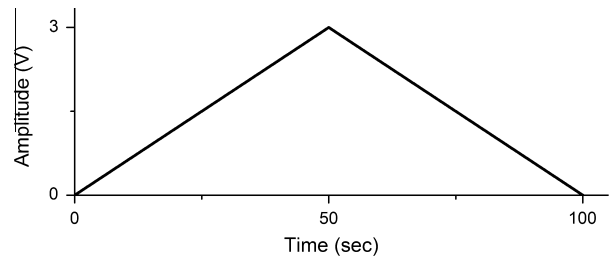


Fig. 2. Thermal excitation rate in graduated heating thermography.

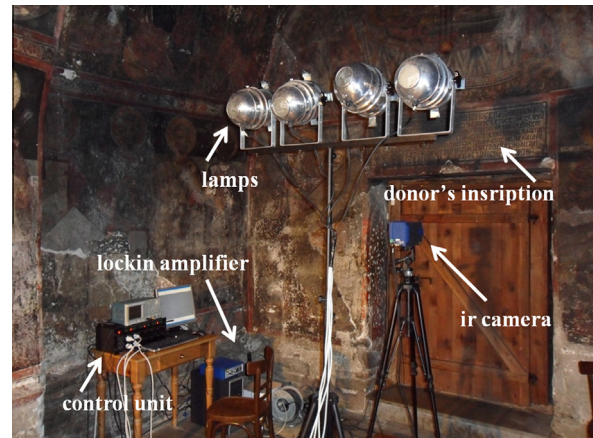


Fig. 3. Experimental setup.

The first thermographic method used was the "graduated heating thermography". The increase of surface temperature was monitored during the heating. The heating procedure was achieved using four lamps. The examined surfaces were being heated gradually for 100 s. In the first 50 s the lamps direct current was being increased from 0 to 3 V and in the next 50 s the lamps direct current was being decreased from 3 to 0 V at a constant rate, as it can be seen in Fig. 2. The thermal excitation rate and the duration have been chosen after preliminary experiments on-site, in order to achieve uniform heating of the murals and not to exceed a critical temperature of 50 °C that may cause further damage to the great significance murals of the church [16].

Another method used in this survey was the "Lock-in Thermography" (LT). In this active method, wave generation was performed by periodic deposition of heat on the inspected area through sine-modulated lamp heating while the resulting oscillating temperature field in the stationary regime was recorded remotely through thermal infrared emission. Lock-in thermography is based on the monitoring of the exact time dependence between the recorded temperature signal and the reference signal. The depth of images is inversely proportional to the modulation frequency, so that higher modulation frequencies restrict the analysis in a near surface region [32].

Moreover, the "Pulsed Phase infrared Thermography" (PPT) has been applied. This method combines the advantages of both pulsed infrared thermography and lock-in thermography. In "Pulsed Thermography" (PT) the specimen is heated briefly and then the temperature decay curve is recorded by an infrared camera. The procedure for PPT is based on the Fourier transform. The sequence of infrared images to process which witnesses the temperature decay and follows the initial thermal pulse is obtained as in pulsed thermography. For each pixel, the temporal evolution is extracted from the image sequence. This enables computation of phase images. In pulsed phase thermography the analysis is performed in the transient mode, while in lock-in thermography the signal is recorded in the stationary mode [32].

2.2. Experimental setup

The experimental setup included four lamps (4 × 1 kW) powered with direct current of 0–10 V range for the heating procedure, a control unit for image processing, a lock-in amplifier and two different types of IR cameras. In Fig. 3, the on-site experimental setup can be observed.

In order to achieve the best monitoring of inspected areas structural integrity, two different IR cameras with different bands of infrared spectrum have been used.

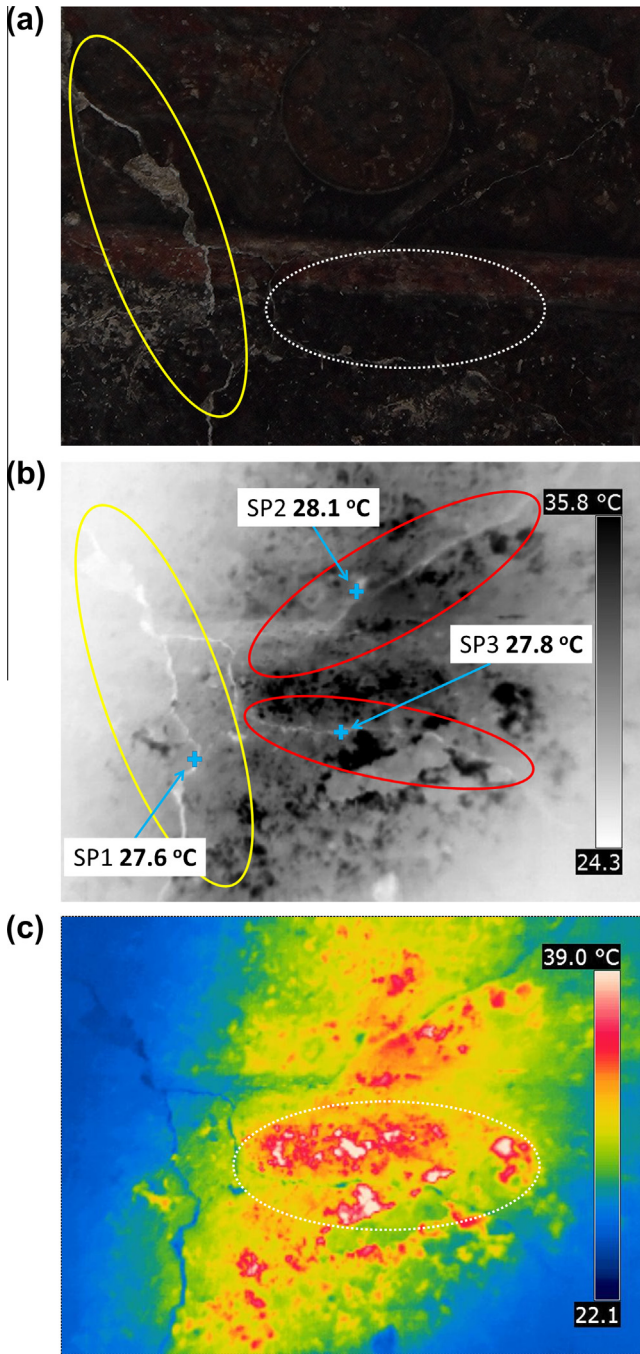


Fig. 4. (a) Murals on roof of the “Monastery of Molybdoskepastos”, (b) thermograph of the dome indicating cracks and (c) IR image of the dome indicating delaminations.

Lock-in and pulsed phase thermographic methods conducted with a mid-wavelength infrared camera (MWIR) CEDIP which has a cooled indium antimonide (InSb) detector (3–5 μm). The frame rate for the experiments of this research was 100 Hz. Moreover, thermographic images have a format of 320 (horizontal) × 240 (vertical) pixels. The noise equivalent temperature difference of this camera is under 25 mK and the optical lens which has been used has 50 mm focal length.

In the “graduated heating thermography” method a long wavelength infrared camera (LWIR) Flir T360 has been used. The LWIR camera has a spectral range of 7.5–13 μm and an uncooled microbolometer sensor. The noise equivalent temperature is under 60 mK. In addition, the optical lens which was adapted to this camera has 18 mm focal length.

Furthermore, the under examination murals do not have a specific emissivity value due to the surface heterogeneity, therefore according to the literature a mean value of 0.75 emissivity has been used.

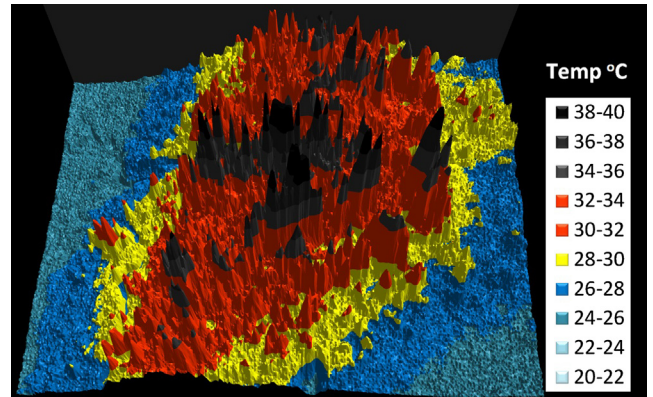


Fig. 5. Three dimension (3D) temperature mapping of the dome.



Fig. 6. The donor's inscription.

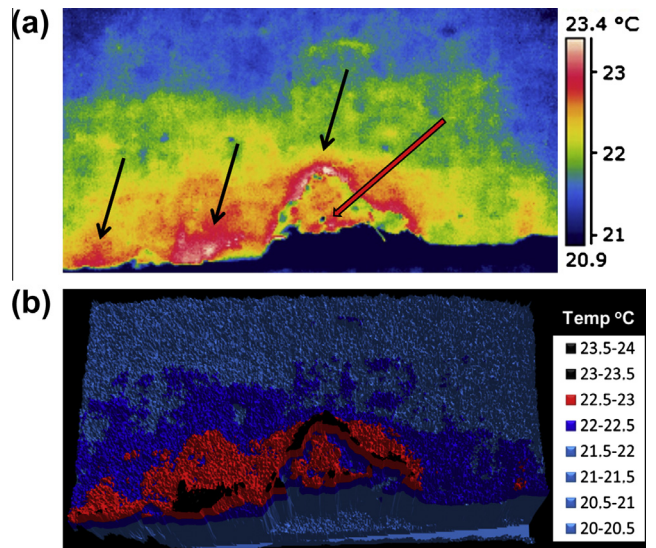


Fig. 7. (a) Thermographic image depicting part of the donor's inscription and (b) 3D temperature mapping of the donor's inscription.

3. Results and discussion

At the monastery of “Molybdoskepastos” non-destructive evaluation was applied for the assessment of damage characterization. IR thermography inspection was preceded by optical observation

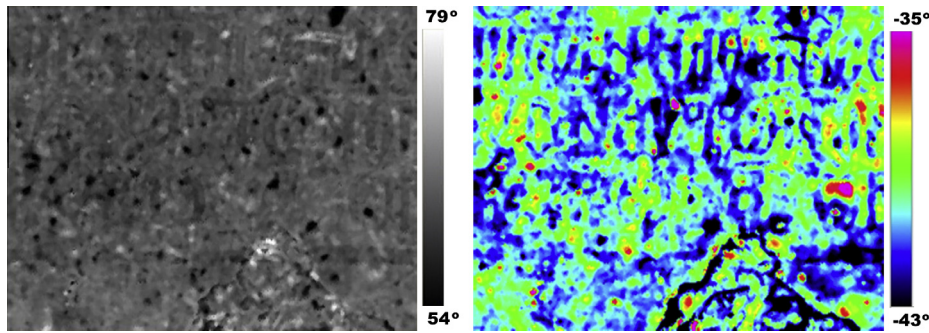


Fig. 8. Lock-in phase images present the substances of the fresco where the donor's inscription is painted.

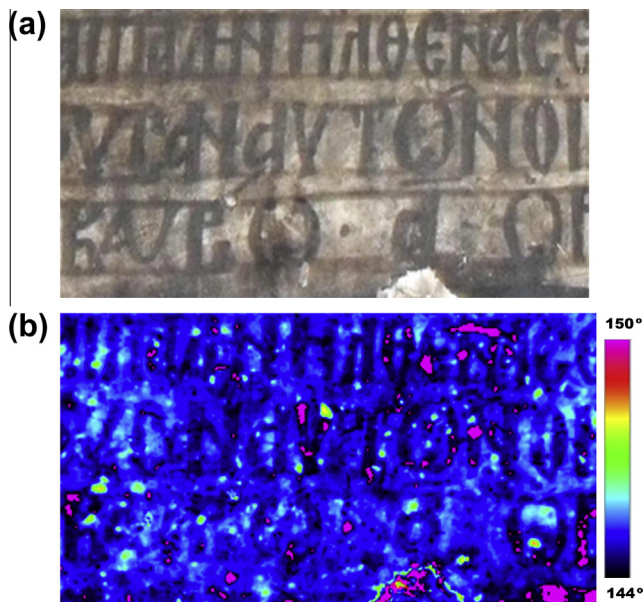


Fig. 9. (a) Digital image of a part of the inscription and (b) pulsed phase image with in-depth defects.

of the monastery indoor space in order to detect specific areas with critical damages and substantial historical importance.

One of the areas that have been inspected in this survey is the dome of the monastery (Fig. 4a). Considering the fact that the dome is five meters above the floor, it is very difficult an optical inspection to be applied. Therefore, "graduated heating thermography" was used for the damage characterization of this mural. On the photograph (see Fig. 4a) there are many critical and surface cracks, while on the thermograph (Fig. 4b) the severity of the cracks can be observed. The visible crack is indicated with yellow circles in both Fig. 4a and b. Moreover, in Fig. 4b additional cracks which are hardly visible, show up clearly in the thermograph and are pointed out with red circles. In addition, comparing the Fig. 4a and b can be deduced that cracks indicated with red circles are not only surface damages but they are as critical as the cracks with yellow circle. This can be assumed from the same temperature variation illustrated in both types of cracks which is clearly indicated with exact temperatures of the spots in Fig. 4b.

Additionally, the infrared thermography inspection revealed the existence of delaminations and detachments on the mural of the dome. To elucidate this, the accumulated heat in the part of the mural that can be observed in Fig. 4c, indicates that this part of the mural has been detached. This extended detached area is marked with white dot-line circle in Fig. 4a and c. In order to further highlight the remarkable temperature variation in the

delaminated area, the three dimension (3D) temperature map was plotted (Fig. 5) from the extracted thermographic data.

Fig. 5 illustrates the distribution of inspected area temperatures in a 3D graph. The xy surface in the graph shows the pixels of the thermograph and the z axis indicates the temperature of each pixel. The detached area is depicted with grey and black colors which correspond to the temperature range of 34–40 °C.

The thermographic inspection of the mural on the dome resulted that this area requires immediate restoration in order to prevent additional irreversible damage.

Another area of interest that has been examined is the donor's inscription above the west gate of the church. Donor's inscription provides very useful information about the year of church's foundation and further historical details. A part of this inscription has been destroyed as it can be seen in Fig. 6. The inspected area was chosen near the destroyed part of the inscription in order to assess the possible existence of further damage (see in Fig. 6 red circle).

The donor's inscription was evaluated with LWIR and MWIR cameras employing all the aforementioned thermographic methods. Concerning the graduated heating thermography method, the increment of the temperature near the area of the destroyed part of the mural discloses three detached regions (indicated by black arrows) as it can be seen in Fig. 7a. The region indicated with red arrow corresponds to the destroyed area in which has been revealed an older donor's inscription (see Fig. 6). In this region, an increment of temperature can be observed. This is due to the different depth and material type. Therefore, this indication in the thermograph was not considered as subsurface damage or delamination. The experimental data of the thermograph in Fig. 7a was also illustrated in a 3D temperature mapping plot. As can be noticed from the Fig. 7b, the black areas corresponded to the range of 23–24 °C reveal more clearly the presence of delamination and detachments.

The second method that had been applied was the lock-in thermography which has been contacted by a MWIR camera. In Fig. 8 it can be observed an assortment of different shape and geometry patterns due to the phase variation depicting the substances of the fresco used to paint the mural, such as straws, wires and gravel. The implementation of this method has resulted in the better assessment of the fresco's substances.

The mid wavelength infrared band has been used in the third thermographic method. Pulsed phase thermography revealed very interesting results concerning the in-depth defects. Fig. 9 depicts the digital photo and the phase thermographic image of the inscription. According to the IR image (Fig. 9b) the magenta spots correspond to subsurface defects not visible in the digital image (Fig. 9a). These intense variations in the obtained thermographs can be attributed to the historical elements. To elucidate this, in one indoor area of the church, where some murals were partially destroyed, preexistent murals have been revealed. As it can be



Fig. 10. Mural with artificial holes.

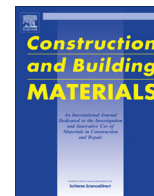
observed in Fig. 10, there is presence of holes caused by hagiographers in order to fasten up the new murals. More specifically, the magenta subsurface defects shown in Fig. 9b correspond to a significant variation in phase of about 5 degrees compared to the phase of visible letters. These spots of Fig. 9b have not the same shape or geometry with the holes of Fig. 10 due to the fact that the holes beneath the inscription are partially filled with fresco. In addition, it should be mentioned that the holes was made by hand, therefore their orientation do not follow an exact pattern. Therefore, the PPT has the potential to detect in-depth defects.

4. Conclusions

This study demonstrates that IR thermography is a powerful method enabling nondestructive assessment of damage in cultural heritage monuments. Specifically, this full-field method is suitable to characterize degradation of murals from distance and is a useful tool to draw conclusions in real time about the state of damage in historic monuments. This work led to interesting results about the inscription, enabling the damage evaluation and characterization. Furthermore, the thermographic assessment of the mural on the roof resulted in valuable findings such as critical surface and sub-surface cracks, and extended detached areas causing concern about its structural integrity. However, further work should be done in the identification of in-depth defects applying an addition NDE method such as ultrasonic to compare and establish these findings.

References

- [1] Avdelidis NP, Moropoulou A. Emissivity considerations in building thermography. *Energy Build* 2003;35(7):663–7.
- [2] Moropoulou A, Avdelidis NP. Emissivity measurements on historic building materials using dual-wavelength infrared thermography. In: Rozlosnik AE, Dinwiddie RB, editors. 1st ed. Orlando (FL, USA): SPIE; 2001. p. 224–8.
- [3] Moropoulou A, Avdelidis NP. Role of emissivity in infrared thermographic imaging and testing of building and structural materials. In: Maldague XP, Rozlosnik AE, editors. 1st ed. Orlando (FL, USA): SPIE; 2002. p. 281–7.
- [4] Kandemir-Yucel A, Tavukcuoglu A, Caner-Saltik EN. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. *Infrared Phys Amp Technol* 2007;49(3):243–8.
- [5] Moropoulou A, Avdelidis NP, Theoulakis P. Outdoor thermographic survey of historic structures. In: Cramer KE, Maldague XP, editors. 1st ed. Orlando (FL, USA): Cramer; 2003. p. 117–21.
- [6] Avdelidis NP, Moropoulou A. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *J Cultural Heritage* 2004;5(1):119–27.
- [7] Avdelidis NP, Moropoulou A. IRT in the investigation of buildings and historic structures. In: Burleigh DD, Cramer KE, Peacock GR, editors. 1st ed. Orlando (FL, USA): Cramer; 2004. p. 150–7.
- [8] Avdelidis NP, Moropoulou A, Delegou ET. A thermographic study for the assessment of historic structures. In: 7th Quantitative infrared thermography conference (QIRT); Brussels – Belgium: 2004.
- [9] Meola C. Infrared thermography of masonry structures. *Infrared Phys Amp Technol* 2007;49(3):228–33.
- [10] Omar M, Hassan MI, Saito K, Alloo R. IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects. *Infrared Phys Amp Technol* 2005;46(4):283–9.
- [11] Arndt RW. Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering. *Infrared Phys Amp Technol* 2010; 53(4):246–53.
- [12] Imposa S. Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy). *J Cultural Heritage* 2010;11(3):259–64.
- [13] Grinzato E, Bison PG, Marinetti S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *J Cultural Heritage* 2002;3(1):21–9.
- [14] Grinzato E, Bressan C, Marinetti S, Bison PG, Bonacina C. Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Phys Amp Technol* 2002;43(3–5):165–9.
- [15] Theodorakeas P, Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, Avdelidis NP, Kouli M, Maldague X, et al. NDT inspection of plastered mosaics by means of transient thermography and holographic interferometry. *NDT; E Int* 2012;47:150–6.
- [16] Kordatos EZ, Exarchos DA, Matikas TE, Stavrakos C, Moropoulou AI. Application of IR thermography to damage characterization of structures and the diagnosis of historic monuments. *Ioannina* 2012:77–81.
- [17] Moropoulou A, Avdelidis NP, Kouli M, Delegou ET, Tsiourva T. Infrared thermographic assessment of materials and techniques for the protection of cultural heritage. In: Tong Q, Zhu Y, Zhu Z, editors. 1st ed. Wuhan, China: SPIE; 2001. p. 313–8.
- [18] Gayo E, de Frutos J. Interference filters as an enhancement tool for infrared thermography in humidity studies of building elements. *Infrared Phys Technol* 1997;38(4):251–8.
- [19] Ludwig N, Redaelli V, Rosina E, Augelli F. Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. *Infrared Phys Technol* 2004;46(1–2):161–6.
- [20] Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy Build* 1998;29(1):1–9.
- [21] Colantonio A. Thermal performance patterns on solid masonry exterior walls of historic buildings. *J Build Phys* 1997;21(2):185–201.
- [22] Tavukcuoglu A, Düzgüneş A, Caner-Saltik EN, Demirci Ş. Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Ağzıkarahan (Aksaray), Turkey. *NDT E Int* 2005; 38(5):402–10.
- [23] Aggelis DG, Kordatos EZ, Soulioti DV, Matikas TE. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Constr Build Mater* 2010;24(10):1888.
- [24] Aggelis DG, Kordatos EZ, Strantzsa M, Soulioti DV, Matikas TE. NDT approach for characterization of subsurface cracks in concrete. *Constr Build Mater* 2011; 25(7):3089–97.
- [25] Aggelis DG, Shiotani T. Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements. *Cem Concr Compos* 2007; 29(9):700–11.
- [26] Karamperide A. Ζωγράφοι από το Γράμμα στην Ήπειρο τ^ο 17ου αιώνα. Στοιχεία από τις επιγραφές των έργων τους. *Ioannina* 2003 [in Greek].
- [27] Papadopoulou B. Η Κόνιτσα και η ευρύτερη περιοχή κατά τη Βυζαντινή περίοδο. *Konitsa* 1996 [in Greek].
- [28] Tsoures K. Ο κεραμοπλαστικός διάκοσμος των υστερο-βυζαντινών μνημείων της βορειοδυτικής Ελλάδος. *Kavala* 1988. p. 10; 1; 3; 49–50; 104–7; 21; 49; 51; 76 [in Greek].
- [29] Nicol DMG. The churches of Molyvdoskepastos: British School at Athens; 1953.
- [30] Papadopoulou B, Karamperide A. Βυζαντινά και μεταβυζαντινά μνημεία Μολυβδοσκεπάστου. *Ioannina* 2006 [in Greek].
- [31] Chatzidakis M. Έλληνες ζωγράφοι μετά την Άλωση (1450–1830). *Athens* 1987 [in Greek].
- [32] Ibarra-Castanedo C, Piau J-M, Guilbert S, Avdelidis NP, Genest M, Bendada A, et al. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures. *Res Nondestr Eval* 2009;20(1):1–31.



Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage



Antonia Moropoulou^{*}, Kyriakos C. Labropoulos, Ekaterini T. Delegou, Maria Karoglou, Asterios Bakolas

National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, 9 Iroon Polytechniou Street, Zografou Campus, Athens GR15780, Greece

HIGHLIGHTS

- NDTs are valuable for the protection of built cultural heritage.
- NDTs can assess the preservation state of materials and structures.
- NDTs can evaluate the efficiency of restoration/protection interventions.
- NDTs are integrated into information systems for effective planning of interventions.

ARTICLE INFO

Article history:

Available online 11 April 2013

Keywords:

Built cultural heritage
Non-destructive techniques
Ultrasonic testing
Infrared thermography
Fibre-optic microscopy
Ground penetrating radar
Digital image processing

ABSTRACT

Recent technological developments in the field of non-destructive techniques have enhanced their usefulness in the field of built cultural heritage protection, and are indispensable tools for the characterisation of materials, detection of wear and degradation of materials, assessment of interventions' effectiveness and evaluation of compatible materials and processes. State-of-the-art techniques such as digital image processing, infrared thermography, ground penetrating radar, ultrasonic testing and fibre-optic microscopy, and their respective signal and image analyses, validated by in-lab analyses, allow the successful implementation of an integrated approach for the protection of built cultural heritage which encompasses scientific support to decision making.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The sustainable maintenance, preservation and revitalisation of built cultural heritage, and in particular historic sites and monuments, have been the focus of significant efforts from the scientific and technical community. In the past, decisions regarding conservation interventions and protection of monuments were largely based on prior experience, on inadequate and non-systematic identification of the prevailing problems and on available technological resources. This approach, however, limited the effectiveness of the implemented interventions, whereas, in some cases even caused more decay to the monuments.

Although a large array of analytical techniques are available, that can be used in the field of built cultural heritage protection, the difficulties associated with the accessibility and irreversible destructive sampling on monuments do not permit extensive use of such available analytical resources. In contrast, the use of Non-Destructive Techniques (NDTs) that can be applied in situ

and do not require destructive sampling, is preferred. Recent research and developments on their sensors and associated data analysis software have enhanced their usefulness and are nowadays an indispensable tool in the field of cultural heritage protection for the characterisation of materials, detection of their wear and degradation, assessment of the effectiveness of interventions and evaluation of compatible materials and processes applications.

Decay of the building materials can be defined as the degradation over time of the materials' properties (physical, chemical, mechanical, etc.) and characteristics (mineralogical, texture, etc.), leading to their failure as building components. Decay phenomena develop at the interface of materials with the environment or at the interface of materials with other materials and are a function of intrinsic and extrinsic factors. The analysis of these factors is essential to the study of the decay pathology of the monument, but also in helping to elucidate the information obtained by the NDT. Intrinsic factors include the type of building materials, their properties, their mass distribution, their origin and the processing technology, their "history" (prior conservation interventions) and their compatibility with other materials.

^{*} Corresponding author.

E-mail address: amoropul@central.ntua.gr (A. Moropoulou).

Extrinsic factors include the climate characteristics (distribution, orientation, and amplitude of environmental factors), the prevailing microclimate, the type of the atmosphere (urban, marine, etc.), the action of water (aerosol, rain, rising damp, condensation, and salt crystallization) and the monument's static and dynamic loading patterns. The decay of materials under the environmental loads is not generalised. Each case should be dealt in the direction of revealing the specific active decay mechanism. This is performed at two scales, the macroscale, which focuses on determining the type of decay (morphology), and the microscale, which focuses on determining the kinetics of the phenomenon (decay rate) and its thermodynamics (susceptibility to decay). NDT, unlike many analytical techniques, are advantageous as they can be used at both levels.

In the past, incompatible conservation interventions and/or the use of incompatible materials has caused significant damage and enhanced the decay in historic buildings/monuments. Instead, decision making regarding interventions on built cultural heritage should be based on established specifications, criteria and methodology involving scientific support. Decision making should concern the selection of compatible conservation materials and interventions, evaluation of their lifetime performance, the assessment of their socio-economic impact and sustainability considerations. To this end, effective built cultural heritage protection requires knowledge of the building's structure and materials, an integrated diagnostic study, and assessment of the performance of conservation materials and interventions.

An integrated diagnostic study includes historic documentation, characterisation of the historic materials and study of their provenance, evaluation of previous interventions and assessment of the environmental impact [1]. It further involves monitoring of the acting environmental factors, in situ macroscopic observations for the materials' preservation state and structure's pathology, in situ decay mapping with the aid of NDT, in-lab study of the decay products and mechanisms, and correlation of intrinsic and extrinsic factors on the monument scale. The identification of the problem is then followed by application of pilot conservation interventions and their assessment, in which NDT are specifically utilised in quality control of conservation materials, and assessment of their performance in lab and in situ. Both functions (decay diagnosis and assessment of pilot conservation interventions) provide essential scientific support to decision making regarding monument's protection.

This work focuses on the use of Digital Image Processing (DIP), Infrared Thermography (IRT), Ground Penetrating Radar (GPR), Ultrasonic (US) testing and Fibre Optic Microscopy (FOM) for the diagnosis of decay and assessment of conservation interventions, and how these NDT results are interrelated with Computer Aided Design (CAD) and Geographical Information Systems (GISs) in order to support strategic planning of the conservation interventions on monument scale and environmental impact assessment for the protection, management and sustainable development of built cultural heritage.

2. Results and discussion

Conservation and protection of built cultural heritage involves many processes and materials [2]. Non-destructive testing and evaluation techniques, such as Digital Image Processing (DIP), Infrared Thermography (IR-Thermo), Ground Penetrating Radar (GPR), Ultrasonic (US) testing and Fibre Optic Microscopy (FOM) offer certain unique capabilities in a variety of applications. Representative results are given in the following sections.

2.1. Digital Image Processing (DIP)

Digital Image Processing (DIP) refers to the use of software to perform image processing on digital images, allowing to classify, to extract features, and to recognise patterns on architectural surfaces of monuments [3], both at the macroscale (photographs) and the microscale (images from fibre-optics microscopy [4,5], scanning electron microscopy [6]). The basic principle of the method, at macroscale applications, is that the different levels of light reflected and diffused by the surface, correspond to the structural characteristics and the degree of weathering of the surface under investigation. DIP converts the varying surface energy content, interpreted through the colour variations of a captured image, to a pseudo-colour system, which renders and perceives the real degradation process. The final output arises from the application of a proper pseudo-colour system through the process of applying various colour maps and by assessing and evaluating them with physicochemical retrieval codes (textural and microstructural characteristics) [7]. The DIP's texture analysis can be validated by porosimetric data and microscopic textural investigation with scanning electron microscopy [3,8].

The ability of DIP to provide detailed materials mapping for the evaluation of conservation interventions compatibility, is presented in Fig. 1. In particular, incompatible restoration materials, hard carbonate and biogenic crust, partial replacement by new incompatible building stones are shown in Fig. 1a and a'. The alveolar disease varying from disintegration to pitting, cavities, interconnected cavities and full face caves can be distinguished and quantified in Fig. 1b and b' [3,8,9].

2.2. Infrared Thermography (IRT)

Infrared Thermography (IRT) is an established non-destructive and evaluation technique with a wide array of applications ranging from enhancing night vision to detecting defects on architectural surfaces [10]. In the field of built cultural heritage, in particular, IRT is a valuable NDT for the investigation of structures, their building materials and their preservation state, as it offers the advantages of investigating without the need for sampling and of being able to examine large areas. The basic principle of the technique is that, since all objects above the absolute zero temperature (0 K) emit infrared radiation, it is possible to detect and map thermal variations and correlate these to variations of the materials' properties, microstructure and surface morphology. Thermal variations are measured with the aid of infrared cameras operating at the mid (3–5 μm) and long (7–14 μm) wave infrared bands, corresponding to two of the high transmittance infrared windows of the atmosphere [11] and an image of the investigated area is rendered in colour, corresponding to a temperature scale.

Two approaches in IRT investigations are employed in the field of cultural heritage protection [11–14]. Passive thermography is used when the features of interest are naturally at a different temperature than the background. The passive approach is commonly used for the inspection of architectural surfaces, where the materials under investigation are usually examined in terms of qualitative means (detection of discontinuities/interfaces, defects, voids, etc.). Instead, when the features of interest are in thermal equilibrium with the surroundings, and thus difficult to differentiate, active thermography is employed, where an energy source is utilised to produce a thermal contrast (heating or cooling) between the feature of interest and the background [11,12]. In this case, it is also possible to attain quantitative results, because the heating or cooling features of the excitation source are specified in time and amplitude. In "Pulsed Thermography" (PT) the specimen is heated briefly and then the temperature falling curve is recorded by an IR camera. In "Lock-in Thermography" (LT) wave generation is per-

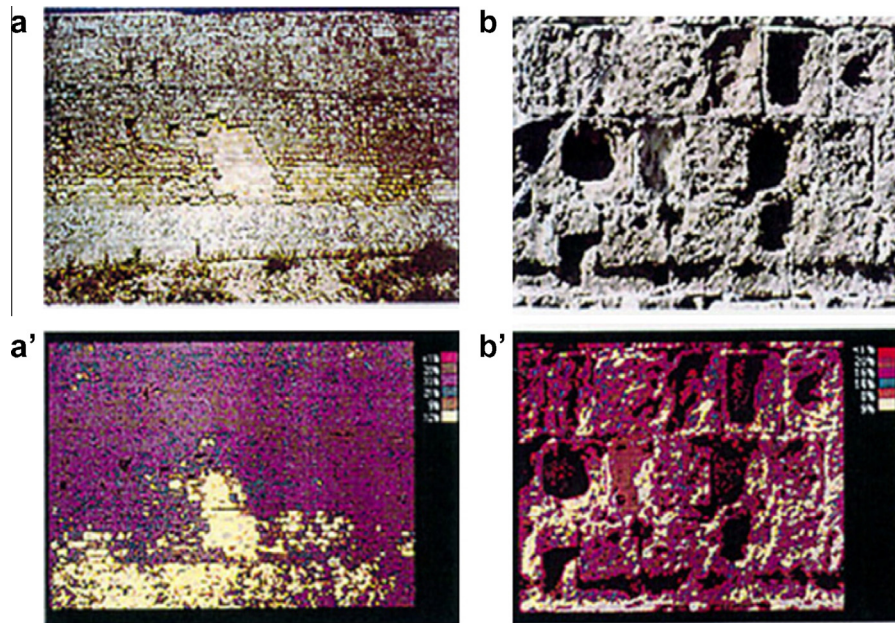


Fig. 1. Digital images processing at the medieval fortifications of Rhodes [3,8].

formed by periodic deposition of heat on the inspected area through sine-modulated lamp heating, the resulting oscillating temperature field in the stationary regime being recorded remotely through thermal infrared emission. Lock-in thermography is based on the monitoring of the exact time dependence between the recorded temperature signal and the reference signal. The depth of IR images is inversely proportional to the modulation frequency, so that higher modulation frequencies restrict the analysis in a near surface region [15]. Passive approach is usually employed when surveying large areas, e.g. masonries, whereas active approach is employed when surveying small areas of interest (e.g. investigation of specimens in lab, or small mosaic areas) where the controlled thermal excitation is feasible.

Furthermore, there are various physical properties that need to be considered during an IRT survey of a structure [13]. These include the materials' spectral properties (emissivity, absorption, reflection, and transmission), its thermal properties (conductivity, diffusivity, effusivity, and specific heat) and other properties such as porosity, volumetric mass, physical-bounded water content. These are essential in "interpreting" the thermographs obtained in IRT surveys; however, they are not always available for historic building materials. For instance, a material with voids or pores, decreases its thermal conductivity and density, its thermal diffusivity is altered and so the conduction of heat transfer within the material is affected [13]. Also, when the investigated material contains moisture, its optical properties are altered, the density, specific

heat capacity and thermal conductivity are also affected and so any temperature changes are much slower in a moist area [13,16,17]. Moreover, the knowledge of materials emissivity is crucial and many studies on the emissivity of structural materials have been conducted [18,19]. In practice, IRT is very useful in the evaluation of the performance of various conservations interventions (such as application of restoration materials, cleaning, and consolidation), also the assessment of the preservation state of historic masonries (detection of residual moisture), and study of architectural surfaces of artistic value (such as mosaics).

2.2.1. Evaluation of restoration materials on the monument scale

As mentioned above, IRT is widely used to evaluate the performance of restoration materials, on the monument scale, due to its ability to survey large areas, compared to other NDT [13,20]. An example of such an application is the thermographic survey on the fortification masonry facing the National Stadium of Heraklion, Crete. The use of cement binding mortars on historic structures has been causing compatibility problems to the authentic materials of a historic structure [21]. From a previous work, where several masonry sandwich-type specimens consisting of two porous stones bound by a restoration mortar (lime or hydraulic lime or cement) were examined in the laboratory, it was proved that cement mortars present physicochemical incompatibility to materials such as limestones and lime mortars [22]. This was also verified in situ, where the obtained thermal image presented in Fig. 2 shows a dif-



Fig. 2. Left: Fortification masonry facing the National Stadium of Heraklion in Crete; Right: infrared thermograph of the same masonry.

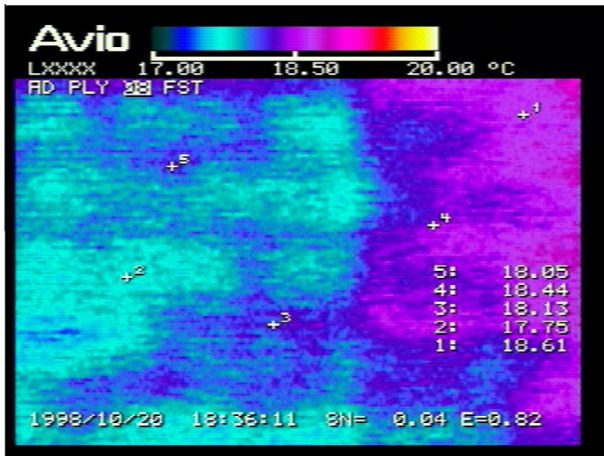


Fig. 3. Infrared thermal image of Kapandriti porous stone surface at the historic building of the Bank of Greece, in Athens. Two cleaning methods were applied; water blasting method (right part of thermal image) or sepiolite poultice of $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 15% w/v solution (left part of thermal image) [26].

ferent behaviour of the joint mortar; cold building stones and hot joint mortars. This is due to the historic mortars attaining similar temperatures to those of the stones, whereas, cement restoration mortars attain much higher temperatures, due to their impermeability to salt solutions [23]. A microstructural investigation [24] validated the in situ IRT survey by revealing that the cement mortars have different porosity values and pore size distributions compared to the historic mortars, causing differential heat and mass transfer, among the porous materials within the examined masonry.

2.2.2. Evaluation of cleaning interventions on architectural surfaces

IRT is also used with other NDT to evaluate, in situ, cleaning interventions on architectural surfaces [25]. Such an application is the evaluation of the efficiency of cleaning treatments on certain architectural surfaces of different materials and decay patterns at the Bank of Greece historic building in Athens [26]. The cleaning methods applied on a porous stone surface (Kapandriti stone) were a water blasting method under controlled pressure (right part of Fig. 3) or a sepiolite poultice of $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 15% w/v solution (left part of Fig. 3). The thermograph reveals that on the left part of the surface, there exist indication of moisture (indicated with low temperatures on the thermal image) due to the presence of

sepiolite residues (not properly removed from the porous stone surface) which withhold moisture. In contrast, at the right part of the thermal image, cleaning was effectively accomplished using the water blasting method. Since the specific heat of water is approximately five times greater than marble or porous stone, this would mean that any changes in temperature would be much slower in an area contaminated by water. Thus, the areas affected by water present lower temperatures and can be detected by IRT.

2.2.3. Evaluation of consolidation interventions on architectural surfaces

The use of IRT for evaluation of consolidation interventions is based on the fact that the spectral and thermal properties of the building materials change with the addition of consolidants, thus resulting in surface temperature variations depending on the type and penetration depth of the consolidation treatment [17]. Pilot-scale laboratory applications of consolidants and their evaluation with IRT and other analytical and non-destructive techniques, are valuable in interpreting the thermal images obtained in situ [17].

An application of IRT for the evaluation of consolidation interventions on architectural surfaces is shown in Fig. 4. This masonry, at St. Paul's gate in the Medieval City of Rhodes, is close to the sea and south oriented, thus the backside of this masonry is continuously fed by salt solution. The consolidation interventions was performed in 1997, using silicon-based materials (RP: Ethyl silicate – Rhodorsil RC 70; EU: Acryl siliconic resin – ACS 2001; PH: Prehydrolysed ethyl silicate with amorphous silica-Silbond HT20; PL: Aqueous colloidal dispersion of silica particles – Ludox HS30), since they present good compatibility with the stone, chemical stability owing to the Si–O–Si bond, preventing discolouration. RP and EU present relatively higher temperatures when compared to the treatments with PH and PL. This is probably due to the fact that the first two treatments alter the physicochemical characteristics of the stones, whereas, PH and PL treatments present better physicochemical compatibility to the original non-treated stone.

2.2.4. Study of moisture transfer phenomena

IRT is used for the detection of moisture and rising damp in historic buildings and masonry structures [16,20,21]. Such an application is the investigation of the National Bank of Greece historic building in Nafplio, Fig. 5, where an IRT survey provided temperature values and their distribution on the examined architectural surfaces, by the rendering of different colours [27]. The investigation revealed that the beige painted lime plaster presents intermediate to low temperature values (A1–B1) [28]. This is attributed to

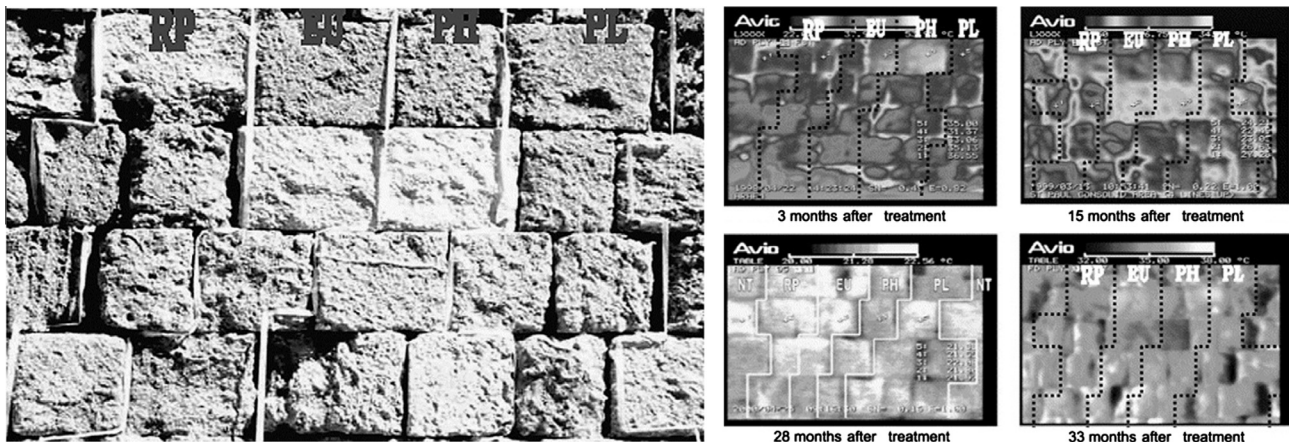


Fig. 4. (Left) Consolidated masonry at St. Paul's gate, Medieval City of Rhodes, see text for consolidants. (Right) Thermal images of the same masonry after 3, 15, 28 and 33 months.

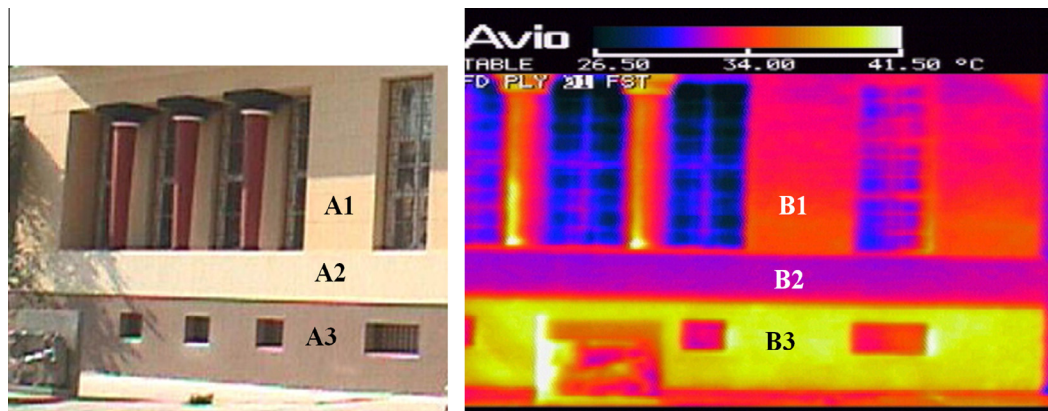


Fig. 5. Historic building in Nafplio: (Left) photograph of the examined area; (Right) infrared thermograph of the same area. (A1–B1) beige painted plaster, (A2–B2) new light beige painted plaster, (A3–B3) dark brown painted hammered textured plaster. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

moisture withholding, deriving from the acrylic putty application (a cement based material rich in organic components), that inhibits the respiration behaviour of the lime-plastered surfaces by constraining its water movement and vapour permeability [17]. The respiration behaviour among cement, organic and lime-based materials varies because of the differences noticed not only in their chemical and mineralogical composition but also in their microstructure (i.e. total porosity, pore size distribution, pore radius) [13,17]. Thus, there is different permeability among such materials leading to physicochemical incompatibility [13]. The new light beige painted cement plaster, demonstrates the lowest temperature readings (A2–B2), since cement materials are hydrophilic, withholding moisture. The hammered plaster high temperatures (A3–B3) appear not only due to the plaster's surfacial relief, but also because the plaster's moisture evaporation rate is not inhibited, as no acrylic putty was applied [28]. In order to validate IR-Thermo, different types of simulating masonry prototypes are monitored by the technique in lab during water absorption curves (capillary) and/or evaporation phenomena [13].

2.2.5. Examination of mosaics

IRT is used for the assessment of the preservation state of mosaics and to reveal substrate features such as plastered mosaics or sub-surface murals [12,29–31]. Such an application took place in Hagia Sophia, Istanbul, a church decorated with mosaics dating back to the 6th century. Throughout its history, the building has been damaged by earthquakes, vandalism, and has been the subject of various interventions. Many mosaic areas that survived through the centuries were plastered during the use of church as a Mosque. Since the conversion of Hagia Sophia into a museum, 1935, the conservation of the remaining non-covered mosaics has begun, including mosaics that have been revealed from areas where the plaster was removed during the conservation process of the monument.

The ability of IRT to reveal plastered mosaics has been demonstrated in previous research work, where various types of mosaics were investigated in the laboratory using IRT, to reveal the mosaic-tesserae beneath the plastered surfaces [29]. Active IRT was employed, with optical lamps providing the heat, and during the cooling down process the thermal image was obtained. This is feasible, due to the different thermal diffusion each layer presents (Fig. 6), enabling active-IRT to detect the different sub-surfaces on the plastered mosaics, corresponding to the temperature variations observed on the surface.

In-situ, a plastered mosaic surface, characteristic of Vakif intervention, in the Hagia Sophia dome was investigated, situated

between the 19th and the 20th rib at the northwest part of the dome, 16 m from the centre of the dome [30,32,33] Fig. 7a depicts the examined surface, and Fig. 7b thermal images from the same surface. The thermograph reveals the existence of a coated mosaic, as well as detached areas within it. Darker grey areas—lower temperature values—represent the mosaic, whereas, the detached areas, behaving similarly to a sub-surface defect, present higher temperature values, due to their different thermal diffusion rate (thermal contrast).

2.3. Ground Penetrating Radar (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) is an established non-destructive technique [34,35] that uses radar pulses to image the examined sub-surface. It uses electromagnetic radiation (typically 100 MHz to 2.6 GHz for built cultural heritage applications) detecting the reflected signals from sub-surface structures as the diffusing pulse meets boundaries with different dielectric constants. GPR is commonly used in Earth Sciences (with even lower frequency antennae) to provide information about the rock and sediment structure of ground, in transportation to identify the layering of substructures in roads and railways, and in Civil Engineering to present information about the interior of load bearing elements of concrete buildings and structures (e.g. bridges, tunnels, etc.) or to detect and map buried utilities.

In the field of cultural heritage protection, GPR is increasingly used in archaeology [36] to detect buried structures [36–39] – usually in conjunction with other geophysical methods (magnetic, soil resistance and electromagnetic surveys) – and in the assessment of the preservation state of monuments and historic structures. In the latter application, GPR is utilised to locate the position of large voids and inclusions of different materials [40], to qualify the state of preservation of the structural system [41,42], to define the presence and the level of moisture [40], to control the effectiveness of repair interventions [40], and to reveal the morphology/geometry of wall sections in multiple-leaf stone and brick masonry structures [40,41,43].

The penetration depth of GPR depends largely on the material investigated and the frequency of the antenna used; for a given material, lower antenna frequencies increase penetration depth but resolution is decreased. The use of high-resolution high-frequency antennae does not pose any significant limitations in the use of the technique on historic buildings and structures, as most features of interest are within the methods' penetration depth. Like all NDT, care should be taken in “interpreting” the results obtained, and it is very important that the technique is used in conjunction

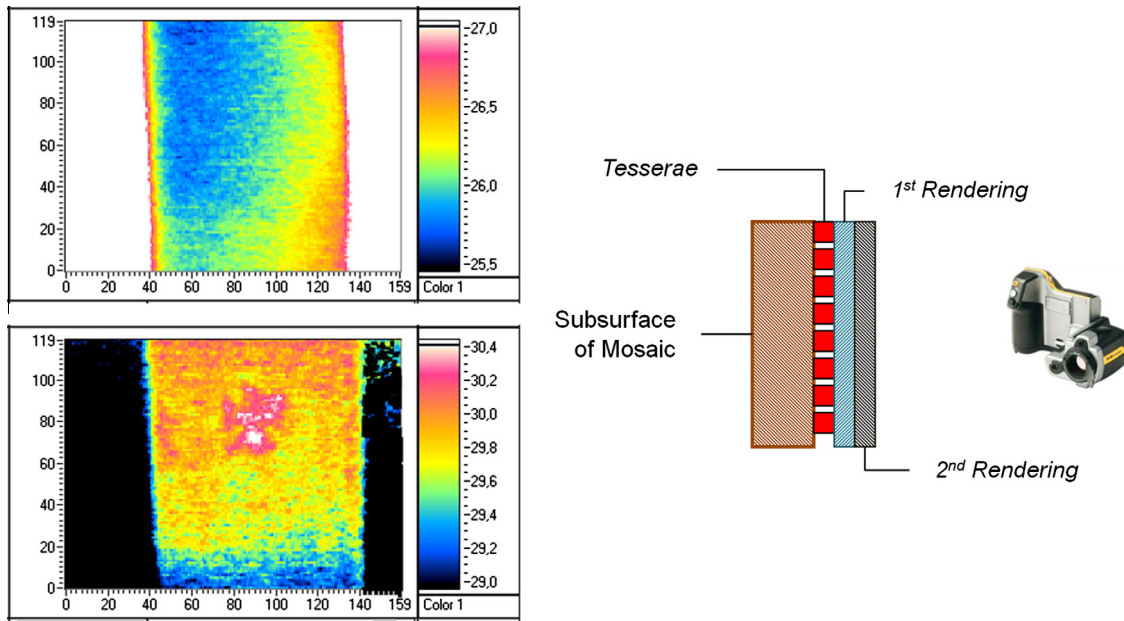


Fig. 6. Demonstration of detection of sub-surface mosaic layer with the use of active IRT. Top – Blank (Lime putty/brick powder/quarry sand: 2/1.5/3); bottom: mosaic with gold and enamel with two renderings of lime mortar (L/S: 1/1) [29].

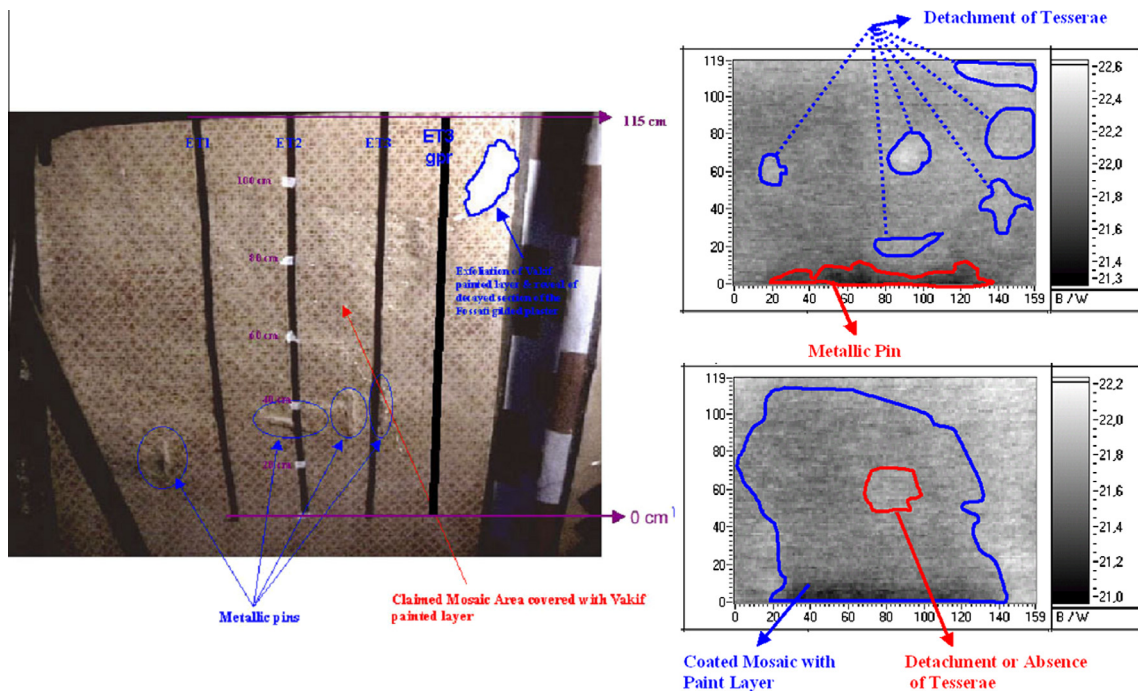


Fig. 7. (a) Left: investigated plastered mosaic area – vakif intervention. (b) Right: thermal images from the same surface revealing the presence of coated mosaic, detachment or absence of tesserae and metallic support pins.

with other analytical or non-destructive techniques for careful elaboration of the collected data and for successful assessment and diagnosis of the structural problems associated with historic buildings. State-of-the-art processing software can improve the raw data obtained and give GPR a 3-D imaging capability. In contrast to typical civil engineering applications (e.g. reinforced concrete structures), this is even more crucial in the field of built cultural heritage protection, since structural information is often very limited and the historic materials' properties (dielectric constant, etc.) are largely unknown and greatly varying.

2.3.1. Assessment of the preservation state of the structural system

Based on experience gained from civil engineering applications, GPR is increasingly used in assessing the decay state of historic buildings and structures, due to its ability to provide an “image” of the examined sub-surface. However, the lack of knowledge regarding the structural characteristics of the monument (construction techniques, detailed architecture of all phases, etc.) and the materials involved (historic materials, restoration materials and interventions, decay of materials, etc.) often make identification of the observed features in a radargram a difficult task.

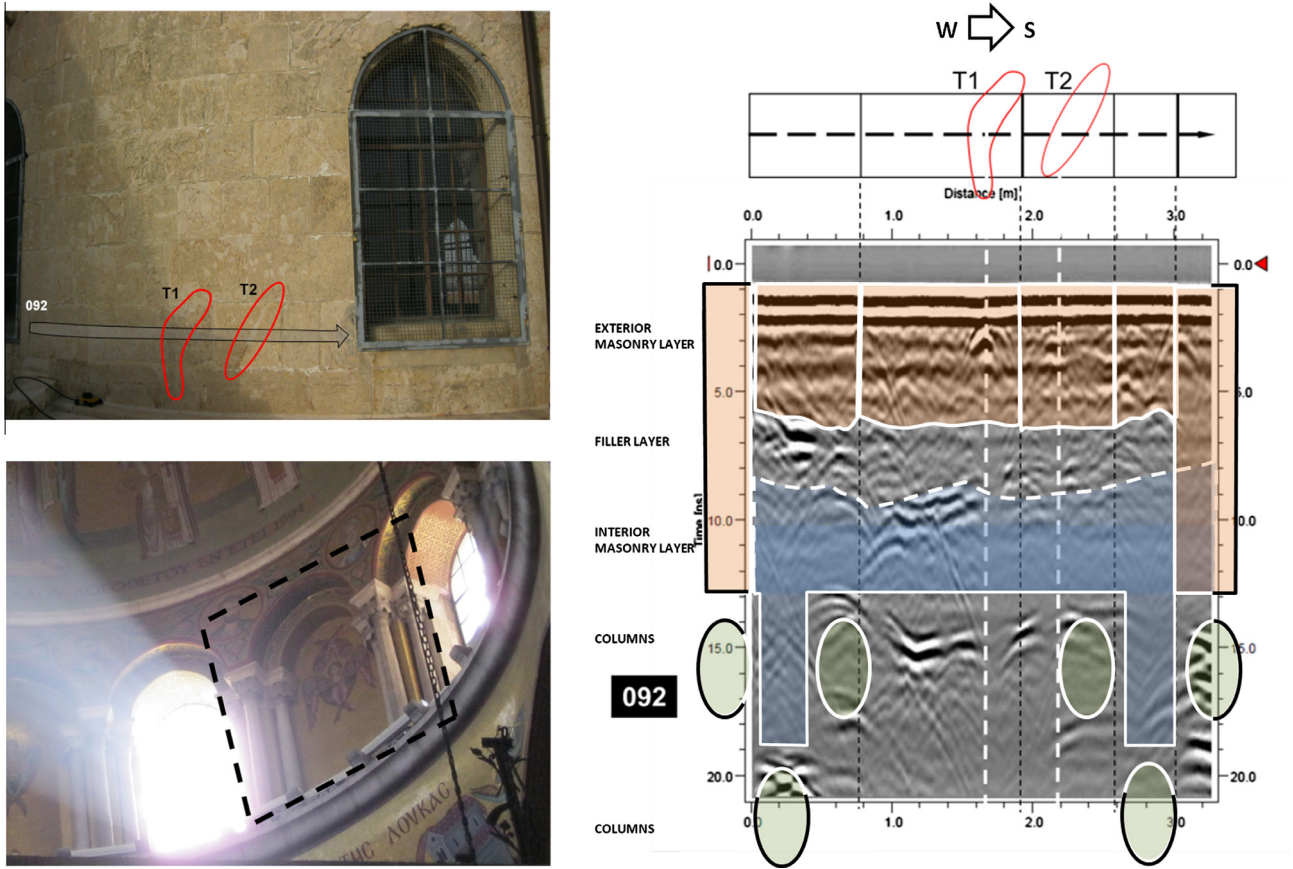


Fig. 8. (Upper left) External view of the examined south-west masonry of the Dome of the Catholic, Church of the Holy Sepulchre, with indication of the position of the GPR scan and the structural cracks T1 and T2. (Lower left) Interior view of the back side of the examined area. (Right) GPR scan (MALÀ ProEx system with 1.6 GHz antenna and Groundvision 2 software) with overlay of the interpretation of the interior structure of the masonry at the level of the scan. T1 and T2 are covering the whole thickness of the respective ashlar [44,45].

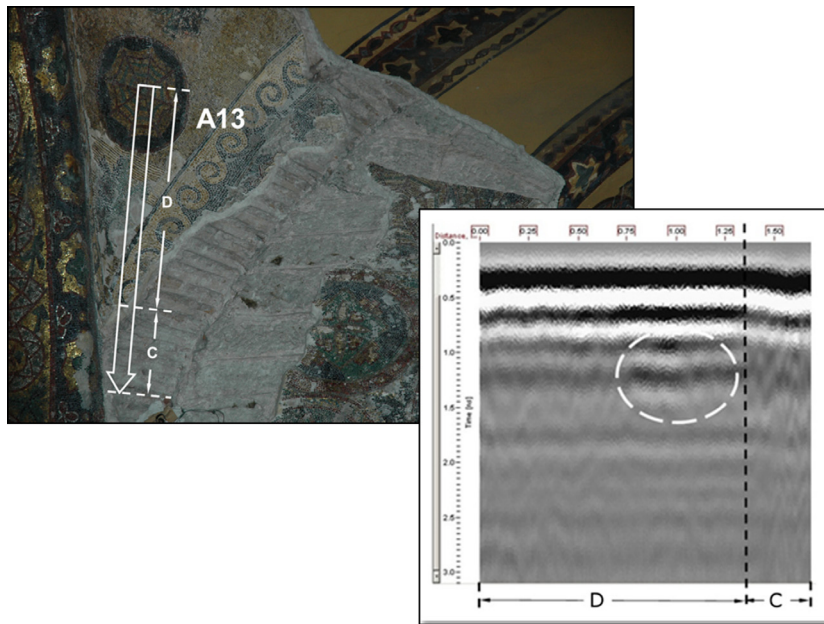


Fig. 9. GPR scan at a revealed mosaic area at Hagia Sophia, south upper gallery, intersection of two arches [30]. Target denoted with dashed white curve corresponds to an internal space possibly filled with mortars and bricks (2.3 GHz antenna).

Fig. 8 shows the typical results obtained by processing data from a GPR survey on a historic masonry. In particular, as part of

a preliminary diagnostic study of the Church of the Holy Sepulchre, NDT were cooperatively applied in order to determine and map

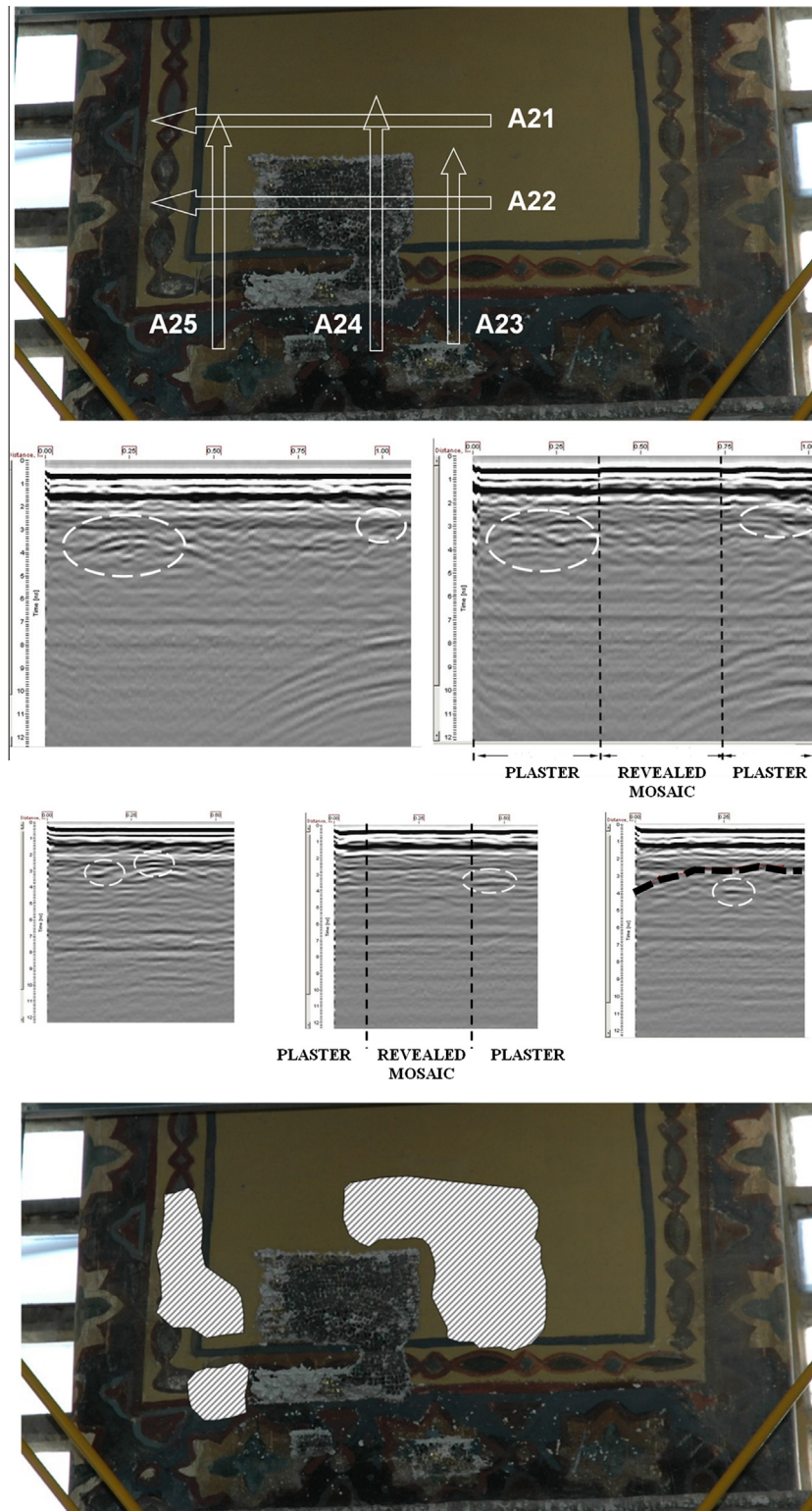


Fig. 10. Top row: Location of GPR scans A21–A25 over area situated between two windows at the south upper gallery. Part of the plaster layer has been removed revealing the underlying mosaic. Damage to the plaster and the mosaic is observed at the lower part of the area due to humidity problem; second row GPR scans (1.6 GHz) A21 (1.09 m), A22 (1.03 m); third row: scans A23 (0.47 m), A24 (0.60 m), A25 (0.55 m); lower: proposed areas around the revealed mosaic where the presence of void spaces below the plastered mosaic layer has been identified by ground penetrating radar.

incompatible materials used for the monument's conservation and structural maintenance interventions [44,45]. Fig. 8 shows the radargram of a scan over the exterior south-west masonry of the Dome of the Catholic, overlaid with an interpretation of the interior and exterior structure of the examined masonry. In this particular

ashlars row, two cracks T1 and T2 (Fig. 8) were observed externally, filled with grout material during prior conservation intervention. GPR was employed to assess whether these cracks are shallow or penetrate the whole thickness of the respective ashlar; Fig. 8 indicates that both cracks are indeed penetrating the complete

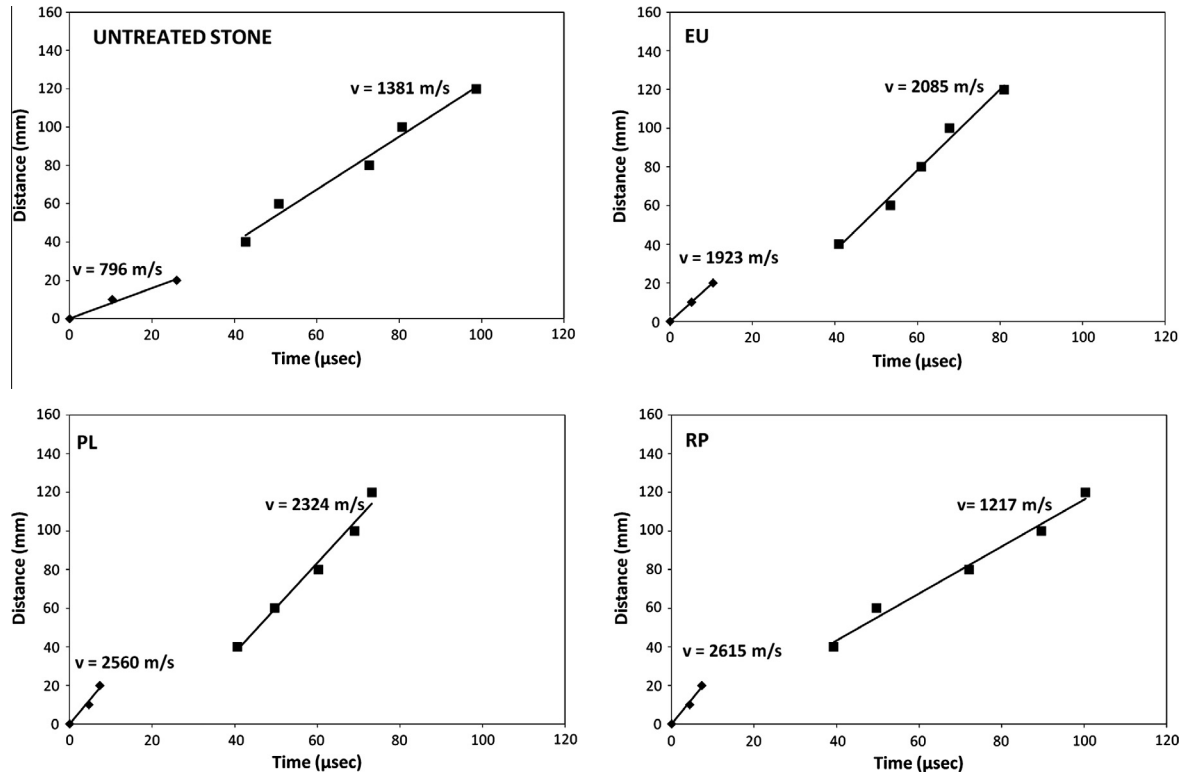


Fig. 11. Estimation of consolidation effectiveness of porous stones: (top left) untreated stone; (top right-EU) stone treated with acryl silionic resin; (lower left-PL) stone treated with aqueous colloidal dispersion of silica particles; (lower right-RP) stone treated with ethyl silicate [55].

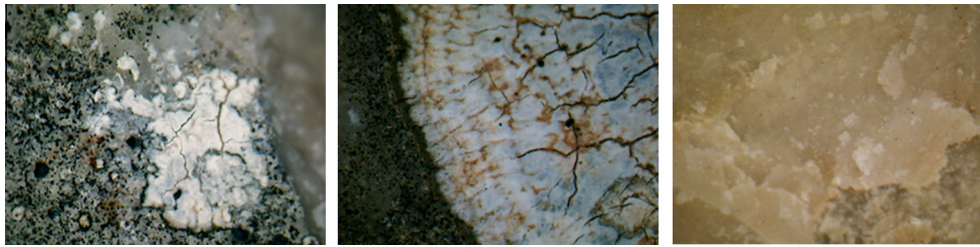


Fig. 12. FOM (50 \times) at Sarantapicho, Rhodes. Left: lichen with carpic structure. Middle: interface of lichen-stone. Right: interior of grey limestone [66].

thickness of the ashlar. It also shows the position of the internal filler layer, between the external and the internal layers of ashlar. The pulse even penetrates the complete thickness of the masonry and detects, from the outside, the circular dome support columns.

2.3.2. Assessment of the preservation state of mosaics

GPR is used for the assessment of the preservation state of mosaics and to reveal substrate features such as plastered mosaics or sub-surface murals [30,31,33,46,47]. In Hagia Sophia's mosaics, for example, at the south upper gallery, GPR was employed in an area at the perpendicular intersection of two arches (a north east bracing arch) which includes recently revealed ornamental mosaic areas, exposed brick structure and exposed stone structure. Fig 9 shows the corresponding GPR radargram with indication of a target [30]. This target corresponds to the space created at the perpendicular intersection of the left arch (stone structure) with the right arch (outer brick structure sub-area C). This space is possibly filled with mortar and bricks, and thus, care should be taken at this junction area regarding the cohesion of the preserved mosaic with its support mortar and the structure.

In another area, located between windows at the south masonry of the south upper gallery, part of the plaster has been removed, revealing the underlying mosaic. External damage to the plaster and the mosaic is observed at the lower part of the area due to moisture problems. A systematic GPR survey revealed the presence of an underlying mosaic layer, beyond the portion that has been revealed by the removal of the plaster, but it also revealed void spaces below this mosaic layer that need attention if it is decided, in the future, to reveal a larger portion of the mosaic. After correlation of the positions of these void spaces in the respective horizontal and vertical scans, a "map" of their position was proposed and indicated as the grey areas in Fig. 10.

2.4. Ultrasonic testing

Ultrasonic testing (US) is an established non-destructive method that detects surface and sub-surface flaws or discontinuities in materials [48,49]. High-frequency sound waves are introduced into the examined surface which travel through the material with some attendant loss of energy (attenuation) and are reflected at any interfaces encountered. The reflected beam is then detected on



Fig. 13. FOM (50 \times) at Erimokastro. Left: surfacial cracks on the dark-brown inclusion. Middle: Lichen on the off-white limestone. Right: carpic structure at the off-white limestone [66]. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

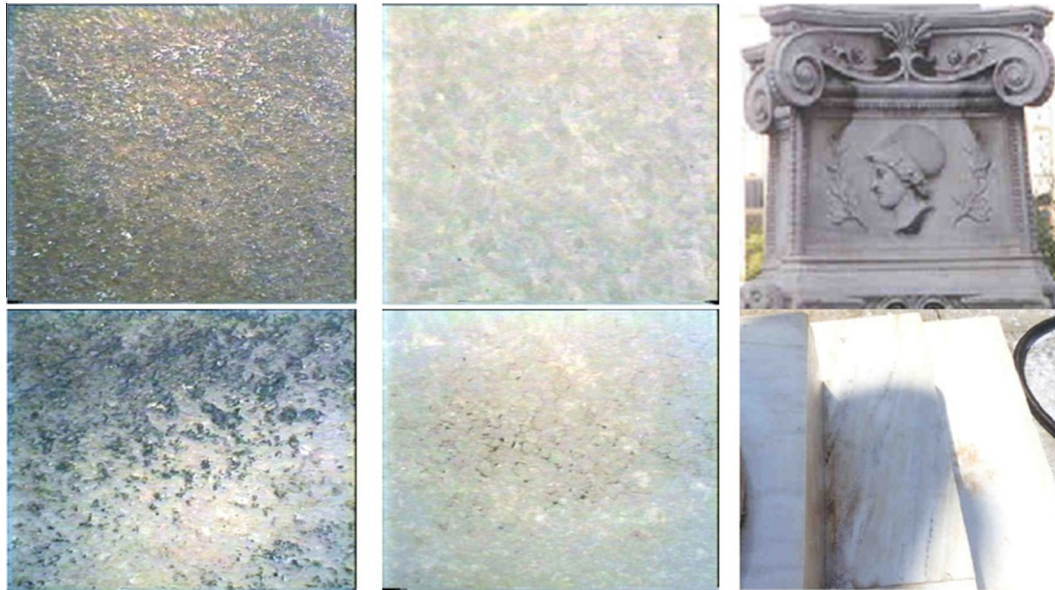


Fig. 14. Evaluation of cleaning interventions with FOM (25 \times), Athens Academy historic building [60]. (Top row) Black–grey crust on pentelic marble surface (top right), before cleaning (top left), and after cleaning (top middle). (Lower row) Black organic depositions on pentelic marble surface (lower right), before cleaning (lower left) and after cleaning (lower middle).



Fig. 15. Evaluation of consolidation interventions with FOM (50 \times), Medieval City of Rhodes. Comparative microstructures of untreated porous stone (left), porous stone treated with a prehydrolyzed ethyl silicate with amorphous silica (middle), and porous stone treated with an aqueous colloidal dispersion of silica particles (right) [8,55].

the surface and analysed to determine the presence and location of flaws or discontinuities. It is commonly used in transportation and construction sectors, mainly to identify flaws (cracks, inclusions, etc.) in materials.

In the field of built cultural heritage protection, ultrasonic testing can provide, non-destructively, the elastic properties of historic building materials [50–52]. In particular, the elastic constants parameters (dynamic modulus of elasticity, E_d , Poisson ratio, ν_d , and G_d) are calculated by the following equations, using the ultrasonic velocity values:

$$E_d = 4 \cdot \rho \cdot v_t^2 \cdot \frac{\frac{3}{4} - \left(\frac{v_t}{v_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{v_t}{v_l}\right)^2} \quad \nu_d = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{v_t}{v_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{v_t}{v_l}\right)^2} \quad G_d = \rho \cdot v_t^2 \quad (1)$$

where V_t and V_l are the transverse and longitudinal ultrasound waves propagation velocities respectively. However, although the above equation seems to work well with typical modern building materials like concrete, and even a correlation existing between the dynamic elastic constants and those obtained by mechanical tests, there are experimental difficulties (e.g. rough surface finish, loss of coherence, and weathered surface) in measuring in situ, weathered historic materials, often of unknown microstructure and composition. As the ultrasonic wave propagation velocity can be correlated with some of the materials microstructure parameters [50,51], and since decay directly affects the microstructure of materials, ultrasonic testing is often used to assess their decay state.

Furthermore, US can determine the depth of the decayed layer within a material, which is evaluated using the indirect ultrasonic

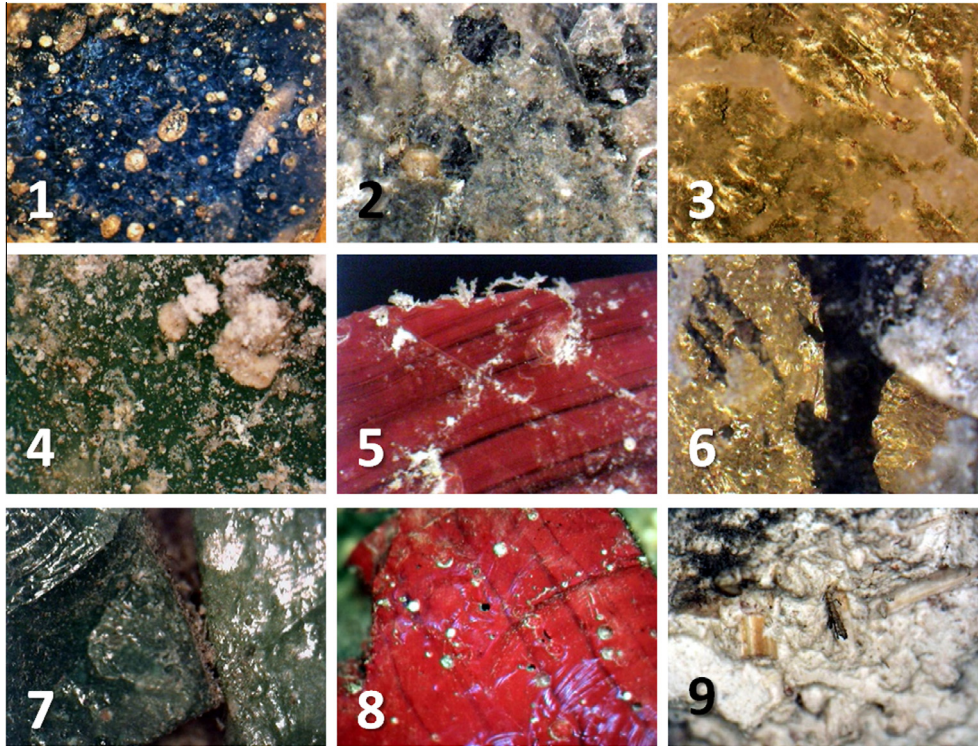


Fig. 16. FOM images, Hagia Sophia mosaics, south gallery–north east bracing arch [64]. (1) Ornamental mosaic, blue tessera, (50×). (2) Ornamental mosaic, blue tessera, (120×). (3) Ornamental mosaic, gold tessera, (120×). (4) Ornamental mosaic, green tessera, (120×). (5) Ornamental mosaic, red tessera, (120×). (6) Ornamental mosaic, gold tessera, (120×). (7) Ornamental mosaic, dark green tesserae, (50×). (8) Ornamental mosaic, red tessera, (50×). (9) Bedding mortar, ornamental mosaic, (50×). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 1
Building materials of at the north façade of the Mela Palace [67].

Legend	Description
1	Masonry plaster – finish: lime binder with low proportion of white cement, calcareous aggregates with traces of dolomite admixtures. Second layer: binder of grey cement with lime, calcareous aggregates with traces of dolomite admixtures
2	Decorative stuccos – geison, buniato, pilaster, pediment and archivolts: cement binder with lime, calcareous aggregates with admixtures of aluminosilicates
3	Balusters: binder of white cement rich in calcium aluminates, calcareous aggregates
4	Dentils – capitals: white cement binder with low proportion of lime – quartz aggregates with lower proportion of calcite which present dolomite
5	Decorative elements: Hermes–Caryatid body, keystone, and flower pot – white finish: lime binder with fibre reinforced cement. Second layer: binder of grey cement with lime, calcareous aggregates with dolomite admixtures
6	Hermes–Caryatid base: binder of white cement with low proportion of lime – calcareous aggregates
7	Smooth grey marble facings: homogeneous and coarse grained marble
8	Grey marble facings of hammered finish: homogeneous and coarse grained marble
9	Smooth white marble facings: calcitic medium grained marble with thin zones of fine grained calcite
10	Roof chamber grating: reinforced concrete
11	Tile roof

velocity technique. In this case the transmitter is placed on a suitable point of the surface and the receiver is placed on the same surface at successive positions along a specific line. The transit time is plotted in relation to the distance between the centres of the transducers. A change of slope in the plot indicates that the pulse velocity near the surface is much lower than it is deeper down in the

rock. This layer of inferior quality could arise as a result of weathering [53,54]. The thickness, D , of the weathered surface layer is estimated as follows:

$$D = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_S - V_D}{V_S + V_D}} \quad (2)$$

where V_S , V_D , are the ultrasonic velocities in the healthy and damaged part of the stone respectively and X_0 the distance between the transducers where a change in slope of the distance–time curve is observed.

Ultrasonic testing is also used to assess of cohesion enhancement by estimation of the penetration depth of consolidation materials. Fig. 11 presents the US evaluation on untreated and consolidated specimens of the porous stone of medieval city of Rhodes [53,55]. Untreated specimens (upper left) indicate a weathered layer, corresponding to the change of slopes (velocities) of the weathered and non-weathered areas and can be calculated by the above equation. In the other three plots, the velocities of the treated areas are all higher than the untreated ones, indicating a clear consolidation effect; RP shows the highest consolidation enhancement. The reflection phenomena observed in EU and PL are responsible for the fact that the interior of the stone (untreated) presents similar to the consolidated areas slopes. US can be validated in lab by elasticity modulus measurements and porosimetric data.

2.5. Fibre Optics Microscopy (FOM)

A Fibre Optics Microscope (FOM) is a non-destructive microscope that can be utilised in situ to acquire magnified, visible spectrum, images. FOM is a microscope system integrating advanced optics, fibre optics and digital components. Whereas in traditional optical microscopy a sample is required to be placed at the micro-

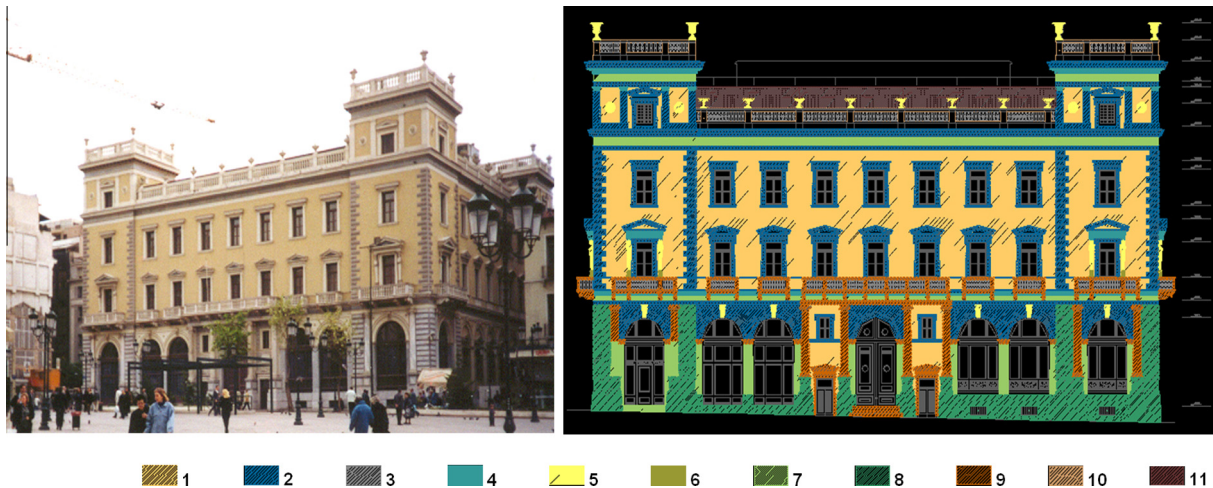


Fig. 17. Photo of Mela Palace; CAD Mapping of building materials (north façade) [67].

Table 2

Decay patterns at the north façade of the Mela Palace [67].

Legend	Description
<i>Plastered surfaces</i>	
1	Intense black depositions and dust fall
2	Blackish depositions and dust fall
3	Washed out surfaces
4	Firm painting
<i>Marble surfaces</i>	
5	Black crust
6	Saccharoidal decay
7	Black depositions and dust fall
8	Washed out surfaces
9	Cracks
10	Graffiti

scope, with FOM, no sampling is required and the image can be acquired in situ. High resolution, high contrast magnified (up to 600×) images of the surface can be obtained and stored digitally for further processing (e.g. DIP), by selecting and attaching the appropriate magnification optics (e.g. 25×, 50×, 100×, 200×).

In the field of cultural heritage protection, FOM is employed to identify differences in the texture and composition of surfaces, for materials classification (e.g. classifications of mortars), for the study of the decay phenomena (alveolation, hard carbonate crust, etc.) [56], to investigate materials' surface morphology [57,58], to identify defects in historic building materials [58], for materials characterisation [55], to classify decay typologies for porous stones [9], to evaluate cleaning interventions [59,60], consolidation interventions [61,62] and incompatible interventions, and to study the preservation state of mosaics [63,64]. Furthermore, FOM, can be used in combination with DIP and morphological fusion algorithms to detect and quantify decay patterns on building materials [4,65].

Fig. 12 shows in situ microstructural observations at Sarantapicho [66], where the presence of extensive biological decay with lichens main body (thallus) of white grey colour and fruiting bodies leading to colour alterations of the stone and the development of superficial microcracks and microcavities are identified. At the interior of the stone, a light orange¹ hue is observed.

Fig. 13 shows FOM observations at Erimokastro, Rhodes [66], where colour and morphological alterations are observed at the

surfaces of the stones. There exists a large variety of biodegradation factors present on the stones. Superficial microcracks are observed on the dark-brown inclusions of the grey limestone (limerich hornstone), whereas the roughness of the off-white porous stone is increased, often accompanied with superficial cracks.

FOM investigations on pentelic marble surfaces of the historic building of Athens Academy, Greece (Fig. 14), demonstrates the ability of FOM to study the surface morphology before and after a cleaning intervention (wet micro-blasting method), by indicating the cleaning method's abrasive levels or its selectivity [60]. The first row of images presents a black–grey crust, which is mainly consisted of gypsum, reprecipitated calcite, and soot. This thin rather cohesive layer that was removed by the cleaning intervention, disclosed a sound fine-grained marble surface, demonstrating acceptable abrasion levels of the cleaning process. The second row of images presents the decay pattern of black organic depositions, mainly consisted of reprecipitated calcite, organic compounds, soot and small amounts of silico–alluminates (dust-fall). Most of the superficial depositions were removed by cleaning, but the revealed surface presented intense intergranular fissures whose boundaries emerged because of the remaining adsorbed organic depositions. This observation indicates that marble fatigue due to cyclic compression and expansion (environmental conditions), was enhanced due to the acid attack of air pollutants, and led to adsorption mainly of organic compounds. Moreover, it is obvious that the used cleaning method is not a selective one, since an additional application of a selective cleaning method is required.

Fig. 15 depicts the microstructure of a porous stone after a consolidation treatment, providing information concerning microstructural modifications in porous materials, as well as the deposition mechanism of the applied materials [55]. Fig. 16 demonstrates the use of FOM to study the preservation state of mosaics of Hagia Sophia, Istanbul [64]. In the examined mosaic area of a south gallery–north east bracing arch, the major decay patterns presented on the glass tesserae (metallic and coloured) of the investigated mosaic surface, can be summarised as follows: pitting (Fig. 16.1 and 16.8), dulling (Fig. 16.3 and 16.6), lamination and iridescence (Fig. 16.7 and 16.8), salt efflorescence (Fig. 16.4 and 16.5), grey crusts and fibrils of biogenic origin (Fig. 16.7), off-white coloured crusts (Fig. 16.2) and micro-cracking and crizzling (Fig. 16.3). Moreover, gold leaves in the gold tesserae presented in most of the examined cases extended fracturing (Fig. 16.3 and 16.6). Finally, the FOM examination of setting bed demonstrated that straws were used for its construction, as well as that a projected part of straw is biodeteriorated (Fig. 16.9).

¹ For interpretation of color in Figs. 12, 18, and 22, the reader is referred to the web version of this article.



Fig. 18. CAD Mapping of decay patterns at the Mela Palace (north façade) [67].

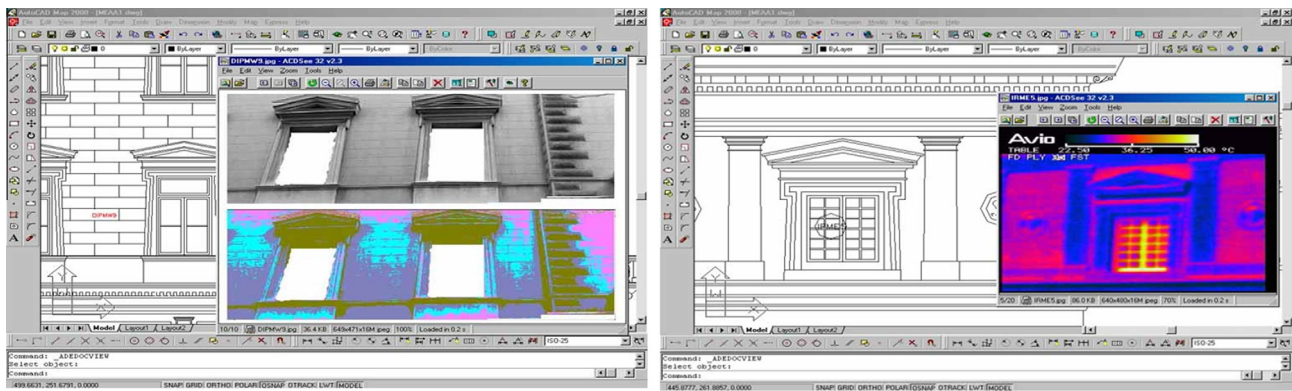


Fig. 19. Decay mapping through NDT data management at the Mela Palace. (Left) Environmental impact assessment through management of DIP images, west façade; (Right) environmental impact assessment through management of infrared thermographs, east façade [67].

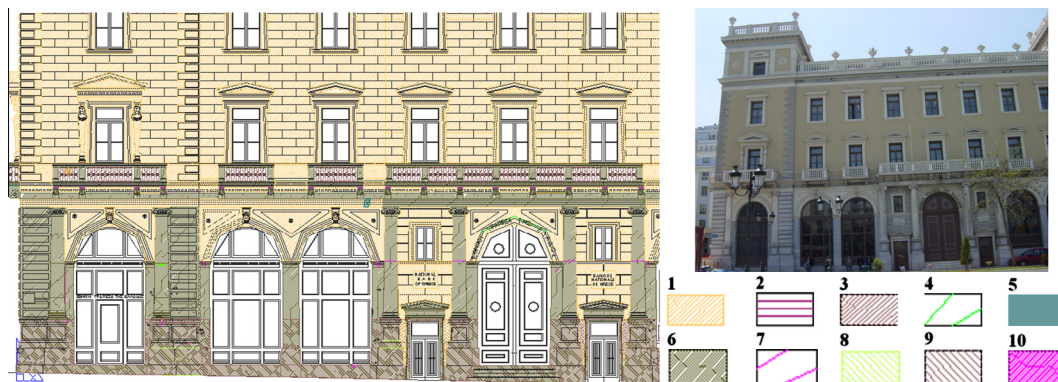


Fig. 20. CAD Mapping of conservation interventions at the Mela Palace (north façade) [67].

3. Planning of conservation interventions, using integrated information systems

Historic buildings and sites of high cultural significance can be environmentally managed, conserved, maintained and reassigned into urban planning when innovative planning tools like integrated information systems are supplied with advanced scientific results, like NDT data. In this framework, materials data, data regarding environmental impact and damage assessment, as well as data of conservation materials and interventions assessment, are interrelated with architectural and land use data. The combined use of the above tools and methodology on buildings' scale and on com-

plexes' scale, can perform conservation interventions planning and environmental management of historic cities for their preservation and sustainable development.

3.1. Planning of conservation interventions on building scale

The architectural drawings of the façades of the Mela Palace historic building were created in CAD [67]. These drawings function as the base map, where mapping of building materials and mapping of decay patterns take place, based on all the acquired NDT and analytical techniques results, as well as on architectural data. Therefore, the materials of the façades (see Table 1) can be dis-

Table 3
Conservation interventions at the north façade of the Mela Palace [67].

Legend	Description
<i>Plastered surfaces</i>	
1	Removal of plaster's external paint: wet micro-blasting method of 2.5 bar max pressure, spherical particles of CaCO ₃ 70 < d < 200 μm, proportion of CaCO ₃ /water: 1/2; repainting: siloxane-based paint
2	Filling cracks: injection of acrylic–methacrylic emulsion
3	Anti-graffiti protection up to 2.00 m height: co-polymer of vinylidene fluoride and hexafluoropropene in volatile organic solver – four applications
4	Placing bird spikes
5	Placing water scuppers
<i>Marble surfaces</i>	
6	Cleaning: water blasting method of 2 bar max pressure
7	Cleaning: wet micro-blasting method of 1.5 bar max pressure, spherical particles of CaCO ₃ , d < 80 μm, proportion of CaCO ₃ /water: 1/3
8	Graffiti cleaning: paper-pulp and acetone
9	Anti-graffiti protection up to 2.00 m height: co-polymer of vinylidene fluoride and hexafluoropropene in volatile organic solver – two applications
10	Filling cracks: injection of acrylic–methacrylic emulsion and finish application using elastomer with calcareous aggregates of d < 250 μm

played on screen with different colours, classified according to their architectural description and physical–chemical characteristics (Fig. 17). Similarly, each decay pattern (see Table 2) is represented by a different layer and displayed by a different colour (Fig. 18) [27,67].

The advantage of the use of integrated information systems is that environmental impact assessment can be achieved more efficiently through the management of NDT data. These drawings function as the base map, where all the acquired non-destructive data can be recalled, since they are stored in a database. This integrated information system can be activated presenting all the available data of the investigated areas on screen [28]. For example, several pseudo colours (in a colour mode) or shades of grey (in black and white format) through DIP images attribute the displayed decay patterns, whereas the IR Thermo images record the temperature distribution of the investigated surfaces (Fig. 19) [27]. In particular, the DIP image presents the painted plaster surfaces of the west façade, displaying with different shades of grey the dust fall and black depositions area, the washed out surfaces, the blackish depositions and the firm painting [28].

Accordingly, the IR Thermo image (Fig. 19) shows two distinct areas, one with lower temperatures varying from 22.5 °C to approximately 30 °C (corresponding to the areas of decorative plasters) and a second one from 30 °C to approximately 36 °C (corresponding to the areas of the masonry plasters); the temperature range from approximately 36 °C to 50 °C corresponds to the window panel. This temperature difference can be attributed to the different chemical composition (higher cement proportion in the binder) of the decorative plasters as compared to that of the masonry plaster, and possibly to different moisture contents [28].

Finally, management of the mapping results can support decisively the planning of conservation interventions on building scale in real terms, through the calculation of each layer area (m²) which represent a particular building material and/or a decay pattern. This results in the environmental impact assessment in terms of quantification, as the comparison of each building material and decay pattern extent with the orientation of the building façades is possible. Additionally, mapping of the suggested conservation interventions on CAD (a process which is based on the materials and decay data), can lead to efficient cost analysis and specifications for the application of the proposed conservation interventions. Fig. 20 presents the exact areas of the conservation interventions that are to be applied at the north façade of the building, (see Table 3) [67].

3.2. Preservation planning as a tool for a sustainable historic city

A Geographical Information System (GIS) can be used to manage a multidisciplinary database, including environmental, functional, materials and structural data [56]. Integrated environmental planning and management can be accomplished by the analysis of all the relevant data with the objective of eliminating the negative impact of the natural and artificial (man-made) environment on historic fortifications, with the purpose of preventing additional damage and preserving an appropriate conservation level, whilst the historic site is revitalised in the course of further treatments – uses and its role is reinforced. Finally, integrated management in terms of preservation of historic sites is realised as intervention on materials and structures, urban planning and environmental management to eliminate environmental loads, as well as development and rehabilitation of sites and buildings by introducing new uses (cultural and recreational activities and tourism) [56].

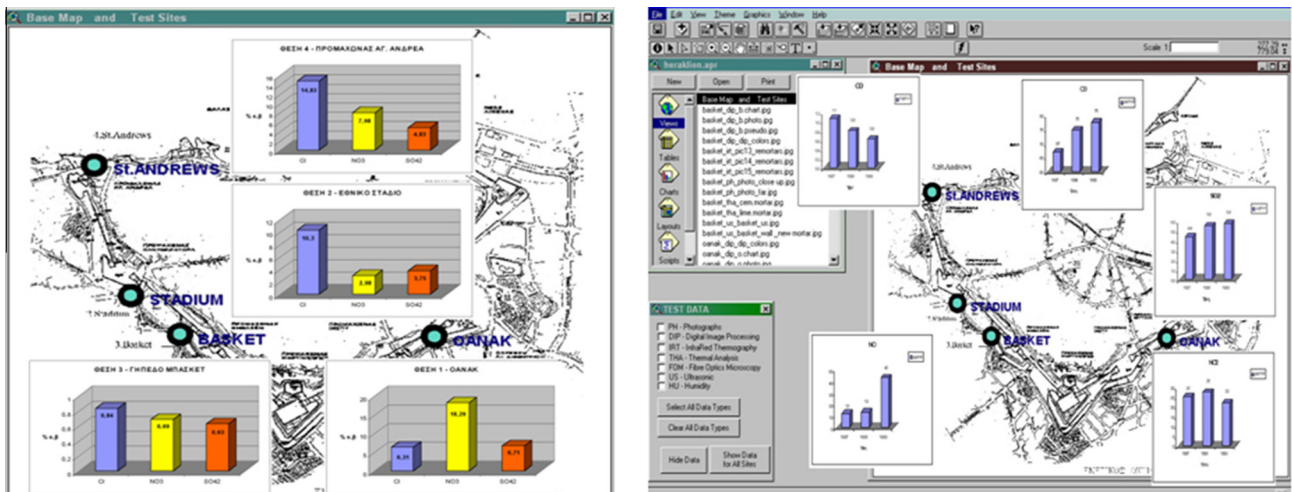


Fig. 21. (Left) Environmental impact assessment of the main air pollutants on Venetian Fortifications of Heraklion using GIS. (Right) Environmental impact assessment regarding soluble anions concentrations (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻), on Venetian Fortifications of Heraklion using GIS.

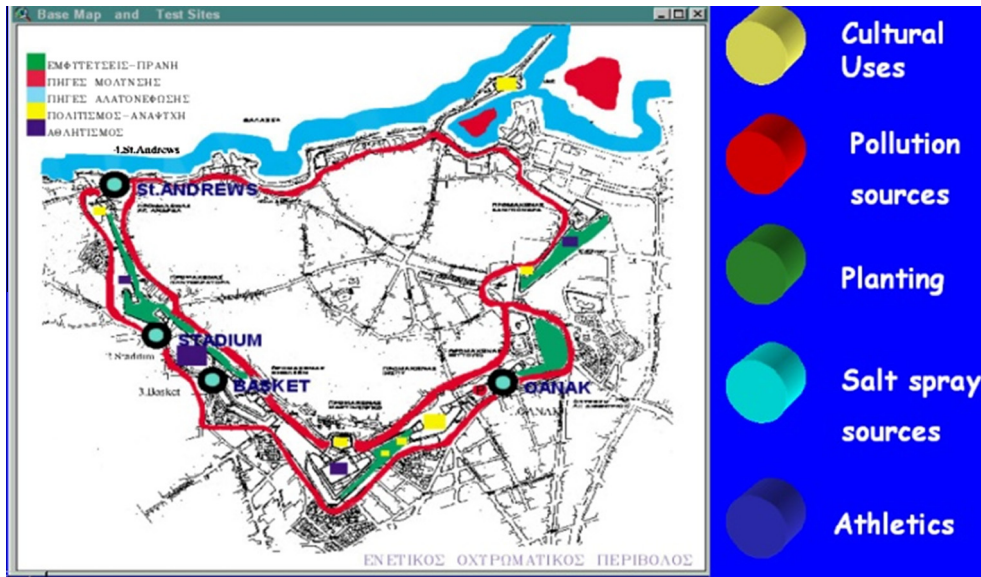


Fig. 22. Environmental impact assessment and environmental management and valuation of uses by GIS for the Venetian Fortifications of Heraklion.

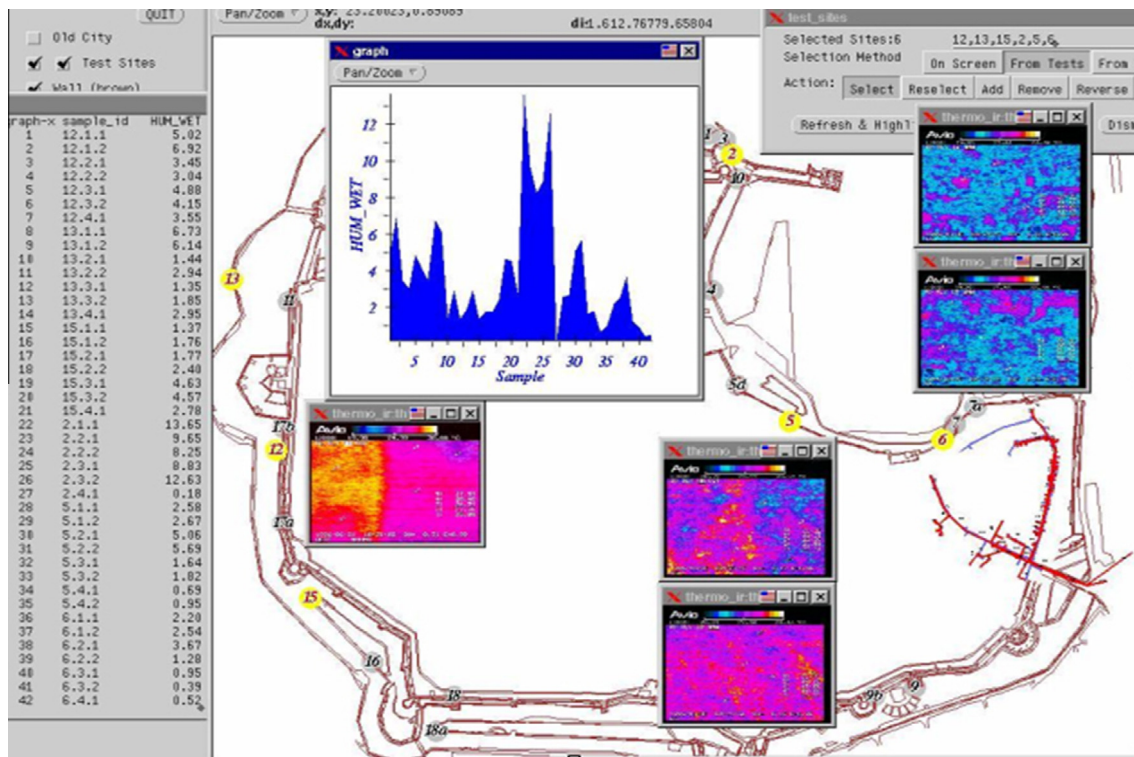


Fig. 23. Infrared thermographs managed by GIS for the environmental impact assessment and related management regarding the planning of underground networks in the medieval city of Rhodes [8,56,70,71].

3.2.1. Historic city centre of Heraklion within the Venetian Fortifications

The GIS management of main air pollutants concentrations (CO, O₃, NO, NO₂, SO₂, Fig. 21), on Venetian Fortifications of Heraklion for the years of 1997–1999, along with the results of soluble anions concentrations (Cl⁻, NO³⁻, SO₄²⁻, Fig. 21) in monument samples allows the environmental impact assessment, as well as contributing to the environmental management and evaluation of uses for the historic centre of Heraklion city, (Fig. 22) [68,69].

More specifically, comparison among anions' concentrations along the fortifications' investigation sites, shows that the higher concentration values of Cl⁻, are located at sea view areas, as well as at areas which are subjected to northwest winds (i.e. St. Andrews investigation area), indicating that the main source of this environmental load is salt spray (designated by light blue coloured spatial entities in GIS map, Fig. 22). Accordingly, high concentration values of NO³⁻ and SO₄²⁻, are located to high traffic areas like the OANAK investigation area, demonstrating that the urban road

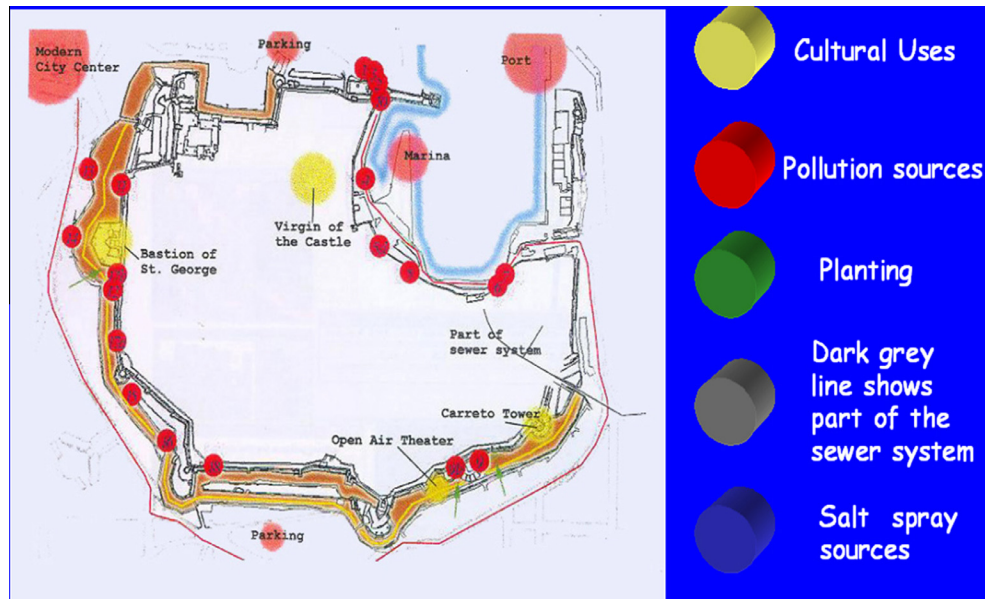


Fig. 24. Environmental impact assessment and environmental management and valuation of uses by GIS for the medieval city of Rhodes [8,56,70,71].

network is the main pollution source (designated by the red coloured spatial entities in GIS map, Fig. 22).

Therefore, the historic centre of Heraklion within the Venetian Fortifications, require for its preservation, integrated environmental management within urban and land use planning of the city, as Fig. 22 demonstrate.

3.2.2. Medieval city intra muros of Rhodes

In the case of the medieval city intra muros of Rhodes, infrared thermography investigation mapped the moisture distribution among the masonry surfaces. At areas presenting lower temperatures, as indicated by the thermal images, samples were taken in various heights and depths and moisture and salt content was determined (gravimetric method, AAS, IC, were used). The results of the above measurements contributed to the identification of particular areas with high moisture and salt content of this extended dimension monument. The GIS platform was used, to correlate the spatial entities of the main environmental loads, (moisture and salt sources like sea salt spray, possible linkages of sewage and water supply infrastructure), to the investigated areas with high moisture and salt content [70].

It was assessed that the underground networks did not have an adverse impact on the medieval fortifications of Rhodes regarding the moisture content. Therefore, GIS analysis procedures along with the management of measurements demonstrated that the planning of underground networks is acceptable (Fig. 23) [56].

Furthermore, the integrated management of other analytical and NDT results (Figs. 1, 4, 11, 15) in the GIS achieve the identification of the main environmental loads and correlated them to the damage they provoke to the monument, contributing to set the strategic policies for environmental management, re-evaluation of land uses and finally urban planning for the preservation of Rhodes medieval city (Fig. 24) [8,56].

4. Conclusions

Non-destructive testing and evaluation techniques, such as Digital Image Processing (DIP), Infrared Thermography (IR-Thermo), Ground Penetrating Radar (GPR), Ultrasonic (US) measurements and Fibre Optic Microscopy (FOM) are applied on architectural sur-

faces of built cultural heritage for (a) materials quality control, (b) environmental impact assessment – materials and weathering mapping, (c) evaluation of conservation materials compatibility and conservation interventions effectiveness on the scale of architectural surfaces and historic masonries, (d) strategic planning for the conservation interventions, and (e) environmental management for the protection of built cultural heritage. The use of innovative non-destructive techniques, validated in lab, and the acquired advanced scientific results, when integrated into tools like CAD and GIS have a major contribution to the preservation and management of built cultural heritage, leading to its sustainable development.

References

- [1] Moropoulou A, Delegou ET, Avdelidis NP, Athanasiadou A. Integrated diagnostics using advanced in situ measuring technology. In: Proceedings of the 10th international conference on durability of building materials and components, Lyon, France; 2005. p. 1116–23.
- [2] Weaver ME. Conserving building. Guide to techniques and materials. NY: Wiley; 1997.
- [3] Moropoulou A, Kouli M, Theoulakis P, Kourtelis Ch, Zezza F. Digital image processing for the environmental impact assessment on architectural surfaces. *J Environ Chem Technol* 1995;1:23–32.
- [4] Kapsalas P, Maravelaki-Kalaitzaki P, Zervakis M, Delegou ET, Moropoulou A. A morphological fusion algorithm for optical detection and quantification of decay patterns on stone surfaces. *Constr Build Mater* 2008;22(3):228–38.
- [5] Kapsalas P, Maravelaki-Kalaitzaki P, Zervakis M, Delegou ET, Moropoulou A. Optical inspection for quantification of decay on stone surfaces. *NDT E Int* 2007;40(1):2–11.
- [6] Moropoulou A, Delegou ET, Vlahakis V, Karaviti E. Digital processing of SEM images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on Pentelic marble surfaces. *Mater Charact* 2007;58(11–12):1063–9.
- [7] Moropoulou A, Bisbikou K, Torfs K, Van Grieken R, Zezza F, Macri F. Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere. *Atmos Environ* 1998;32(6):967–82.
- [8] Scientific Project. Environmental impact assessment and redesign of underground networks (infrastructure) in order to protect the historical masonry of the Medieval City of Rhodes. Scientific responsible: Moropoulou A, NTUA, financed by Ministry of Urban Planning and Environment; 1995–1997.
- [9] Moropoulou A, Kouli M, Tsiourva Th, Kourtelis Ch, Pappasotiriou D. Macro- and micro non destructive tests for environmental impact assessment on architectural surfaces. In: Vandiver PB, Druzik JR, Merkel JF, Stewart J, editors. *Materials issues in art and archaeology V*, vol. 462. Pittsburgh: Publ. Materials Research Society; 1997. p. 343–9.
- [10] Maldague XPV, Technical editor, Moore PO, editor. *ASNT Nondestructive Testing Handbook*, 3rd ed., vol. 3. Infrared and Thermal Testing; 2001.
- [11] Maldague XPV. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley, John & Sons; 2001.

- [12] Avdelidis NP, Moropoulou A. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *J Cult Heritage* 2004;5(1):119–27.
- [13] Avdelidis NP. Applications of infrared thermography for the investigation of materials and structures. Ph.D. thesis, supervisor: Moropoulou A, National Technical University of Athens, Greece; 2002.
- [14] Avdelidis NP, Moropoulou A, Almond DP. Passive and active thermal non-destructive imaging of material. In: Driggers RG, Huckridge DA, editors. *Electro-optical and infrared systems: technology and applications*, vol. 5612. SPIE Publ.; 2004. p. 126–40.
- [15] Ibarra-Castanedo C, Piau J-M, Guilbert S, Avdelidis NP, Genest M, Bendada A, et al. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures. *Res Nondestr Eval* 2009;20(1):1–31.
- [16] Grinzato E, Bison PG, Marinetti S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *J Cult Heritage* 2002;3:21–9.
- [17] Avdelidis NP, Moropoulou A, Theoulakis P. Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging. *J Infrared Phys Technol* 2003;44(3):183–90.
- [18] Avdelidis NP, Moropoulou A. Emissivity considerations in building thermography. *Energy Build* 2003;35(7):663–7.
- [19] Moropoulou A, Avdelidis NP. In: Maldague XP, Rozlosnik AE, editors. *Role of emissivity in infrared thermographic imaging and testing of building and structural materials*. Orlando: SPIE; 2002. p. 281–7.
- [20] Moropoulou A, Avdelidis NP, Theoulakis P. Outdoor thermographic survey of historic structures. In: Cramer KE, Maldague XP, editors. *Thermosense XXV*, vol. 5073. SPIE Publ.; 2003. p. 117–21.
- [21] Moropoulou A, Avdelidis NP, Kouli M. Compatibility assessment of building materials using infrared thermography. In: *Proceedings of the 15th world conference on NDT; 2000*, [proceedings in CD-ROM].
- [22] Moropoulou A, Avdelidis NP, Kouli M, Kanellopoulos NK. Dual band infrared thermography as a NDT tool for the characterization of the building materials and conservation performance in historic structures. In: Matikas T, Meyendorf N, Baaklini G, Gilmore R, editors. *Nondestructive methods for materials characterization*, vol. 591. Pittsburgh: Materials Research Society; 2000. p. 169–74.
- [23] Moropoulou A, Kouli M, Christaras B, Tsiourva T. Non-destructive evaluation of the performance of mortars on historic masonries. *J Eur Study Group Phys Chem Biol Math Tech Appl Archaeol* 1998;55:243–66.
- [24] Moropoulou A, Kouli M, Moundoulas P, Avdelidis NP. In situ non-destructive evaluation of the compatibility of repair mortars to the historic masonries validated by thermal analysis. In: Papanicolaou GC, Parisakis G, editors. *4th Mediterranean conference on calorimetry and thermal analysis*, Patra, Greece; 1999. p. 171–78.
- [25] Moropoulou A, Avdelidis NP, Delegou ET, Kouli M. Infrared thermography in the evaluation of cleaning interventions on architectural surfaces. In: *Proceedings INFRAMATION international conference on infrared thermography*; Orlando, USA; 2001. p. 171–75.
- [26] Moropoulou A, Biscontin G, Tsiourva Th, Bisbikou K, Longega P, Tsantila V, et al. Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the centre of Athens. *Build Environ* 2002;37:753–60.
- [27] Scientific Project. Planning and programming of conservation materials and interventions on the facades of the historic buildings of National Bank of Greece. Scientific responsible: Moropoulou A, NTUA, financed by National Bank of Greece; 2000–2002.
- [28] Moropoulou A, Delegou ET, Avdelidis NP. NDT planning methodology of conservation interventions on historic buildings. In: Van Grieken R, Janssens K, Van't dack L, Meersman G, editors. *Proceedings of the 7th international conference on non-destructive testing and microanalysis for the diagnostics and conservation of the cultural and environmental heritage*; 2002.
- [29] Moropoulou A, Kouli M, Avdelidis NP, Delegou ET, Aggelakopoulou E, Karoglou M, et al. Investigation for the compatibility of conservation interventions on Hagia Sophia mosaics using NDT techniques. *PACT J Eur Study Group Phys Chem Biol Math Tech Appl Archaeol* 2000;59:103–20.
- [30] Moropoulou A, Avdelidis NP, Aggelakopoulou E, Griniezakis S, Kouli M, Aggelopoulos A, et al. Examination of plastered mosaic surfaces using NDT techniques. *J Insight* 2001;43:241–3.
- [31] Moropoulou A, Bakolas A, Karoglou M, Delegou ET, Labropoulos KC, Katsiotis NS. Diagnostics and protection of Hagia Sophia mosaics. *J Cult Heritage*, in press.
- [32] Kordatos EZ, Exarchos DA, Matikas TE, Stavrakos C, Moropoulou AI. Application of IR thermography to damage characterization of structures and the diagnosis of historic monuments. In: *Emerging technologies in non-destructive testing V – proceedings of the 5th conference on emerging technologies in NDT*, Ioannina; 2012. p. 77–81.
- [33] Scientific Project. Conservation of Hagia Sophia and Byzantine Monuments in Konstantinoupoli. Scientific responsible: Moropoulou A, financed by Greek Ministry of Culture; 1998–1999.
- [34] Jol HJ, editor. *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier; 2008.
- [35] Owen TE. Special issue on ground penetrating radar. *J Appl Geophys* 1995;33:1–255.
- [36] Conyers LB, editor. *Ground-penetrating radar for archaeology*. Walnut Creek (CA): Alta Mira Press; 2004.
- [37] Negri S, Leucci G. Geophysical investigation of the Temple of Apollo (Hierapolis, Turkey). *J Archaeol Sci* 2006;33(11):1505–13.
- [38] Vafidis A, Economou N, Ganiatsos Y, Manakou M, Poulioudis G, Sourlas G, et al. Integrated geophysical studies at ancient Itanos (Greece). *J Archaeol Sci* 2005;32(7):1023–36.
- [39] Leucci G. Ground-penetrating radar survey to map the location of buried structures under two churches. *Archaeol Prospect* 2002;9(4):217–28.
- [40] Binda L, Lenzi G, Saisi A. NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterisation of stone masonries. *NDT&E Int* 1998;31(6):411–9.
- [41] Binda L, Zanzi L, Lualdi M, Condoleo P. The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy. *NDT&E Int* 2005;38(3):171–9.
- [42] Arias P, Armesto J, Di-Capua D, González-Drigo R, Lorenzo H, Pérez-Gracia V. Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a medieval bridge. *Eng Fail Anal* 2007;14(8):1444–57.
- [43] Binda L, Saisi A, Tiraboschi C. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Constr Build Mater* 2000;14(4):199–233.
- [44] Moropoulou A, Bakolas A, Spyrakos C, Mouzakis H, Karoglou M, Labropoulos KC, et al. NDT investigation of holy sepulchre complex structures. In: *Proceedings structural faults and repair*, in press.
- [45] Preliminary diagnostic study of the Church of the Holy Sepulchre – Report to the Patriarchate of Jerusalem. Scientific responsible: Moropoulou A; 2011.
- [46] Scientific Project. Greek-Turkish educational cooperation for the earthquake protection and conservation of monuments. Scientific responsible: Moropoulou A, financed by the Greek Ministry of Education and Religion; 2000–2001.
- [47] Moropoulou AI, Labropoulos KC, Katsiotis NS. Application of ground penetrating radar for the assessment of the decay state of Hagia Sophia's mosaics. *J Mater Sci Eng A&B*, in press.
- [48] EN 583 Non-destructive testing – ultrasonic examination, Parts 1–6.
- [49] EN 12504-4:2004. Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.
- [50] Moropoulou A, Bakolas A, Aggelakopoulou E, Pineli T, Prasianakis I. Estimation of elastic constants of stones, used in historic monuments, using ultrasonic technique and correlation to their microstructure parameters. In: *Proceedings of the 3rd international conference on NDT*. Chania: Hellenic Society for NDT; 2003. p. 242–5.
- [51] Moropoulou A, Bakolas A, Aggelakopoulou E, Odatzidou A, Teas Ch, Papageorgiou D. Estimation of elastic constants of restoration mortars, used on historic masonries restoration interventions, via ultrasonic technique and correlation to their mechanical and microstructure parameters. In: Vandiver P, Mass JL, Murray A, editors. *Materials Issues in Art and Archaeology VII*, vol. 852. Pittsburgh: Materials Research Society; 2005. p. 115–20.
- [52] Christaras B, Auger F, Mosse E. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Mater Struct* 1994;27:222–8.
- [53] Moropoulou A, Christaras B, Kouli M, Avdelidis NP, Tsiourva Th, Kourtelis Ch. Integrated Non-destructive evaluation for the protection of cultural heritage. In: *Proceedings of the 2nd international conference on emerging technologies in non destructive testing*, Athens – Greece; 2000. p. 323–33.
- [54] Batis G, Moropoulou A. Non-destructive testing of materials – Ultrasonics. In: *Laboratory notes of the Course 5202 "Building Materials"*. School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens; 2011. p. 69–77.
- [55] Moropoulou A, Tsiourva Th, Theoulakis P, Christaras B, Kouli M. Non destructive evaluation of pilot scale treatments for porous stone consolidation in the Medieval City of Rhodes. *PACT J Eur Study Group Phys Chem Biol Math Tech Appl Archaeol* 1998;56:259–78.
- [56] Moropoulou A, Kouli M, Kourtelis Ch, Zezza F, et al. Techniques and methodology for the preservation and environmental management of historic complexes – the case of the Medieval City of Rhodes. In: Moropoulou A, Zezza F, Kollias E, Papachristodoulou I, editors. *Proceedings of the 4th international symposium on the conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, vol. 4. Rhodes: Technical Chamber of Greece; 1997. p. 603–34.
- [57] Moropoulou A, Avdelidis NP, Delegou ET. NDT and planning on historic buildings and complexes for the protection of cultural heritage. In: Van Grieken R, Janssens K, editors. *Cultural heritage conservation and environmental impact assessment by non-destructive testing and micro-analysis*. Publ. Balkema, Taylor & Francis Group; 2005. p. 67–76.
- [58] Scientific Project. Quality control of building materials of National Technical University of Athens Zografou Campus Athens 2004 Olympic Games Building. Scientific responsible: Karoglou M, Moropoulou A; 2004.
- [59] Moropoulou A, Delegou ET, Avdelidis NP, Kouli M. Non-destructive investigation of architectural surfaces in polluted urban atmosphere. In: *Proceedings of the 39th international conference of the British Institute of NDT*, Buxton, UK; 2000. p. 143–48.
- [60] Moropoulou A, Delegou ET, Avdelidis NP, Kouli M. Assessment of cleaning conservation interventions on architectural surfaces using an intergraded methodology. In: Vandiver P, Goodway M, Druzik JR, Mass JL, editors. *Materials issues in art and archaeology VI*, vol. 712. Pittsburgh: Publ. Materials Research Society; 2002. p. 69–76.
- [61] Moropoulou A, Theoulakis P, Tsiourva Th, Haralampopoulos G. Compatibility evaluation of consolidation treatments in monuments scale. *PACT J Eur Study Group Phys Chem Biol Math Tech Appl Archaeol* 2000;59:209–30.
- [62] Moropoulou A, Haralampopoulos G, Tsiourva Th, Theoulakis P, Kouli M. Long term performance evaluation of consolidation treatments in situ. In: Biscontin G, Driussi G, editors. *Scienza e Beni Culturali XVI*. Publ. Arcadia Ricerche S.r.l.; 2000. p. 239–25.

- [63] Moropoulou A, Avdelidis NP, Delegou ET, Gill CH, Smith J. Study of deterioration mechanisms of vitreous tesserae mosaics. In: Biscontin G, Driussi G, editors. *Scienza e Beni Culturali XVIII*. Publ. Arcadia Ricerche S.r.l.; 2002. p. 843–51.
- [64] Moropoulou A, Karoglou M, Labropoulos KC, Delegou ET, Katsiotis NK, Karagiannis-Bakolas A. Application of non-destructive techniques to assess the state of Hagia Sophia's mosaics. In: Matikas T, editor. *SmartStructures/NDE*, vol. 8346. SPIE, in press.
- [65] Kapsalas P, Maravelaki-Kalaitzaki P, Zervakis M, Delegou ET, Moropoulou A. Optical inspection for quantification of decay on stone surfaces. *NDT&E Int* 2007;40(1):2–11.
- [66] Labropoulos KC, Katsiotis N, Xinopoulou E, Delegou ET, Bakolas A, Moropoulou A. Diagnostic study at the acropolis of Sarantapicho and the acropolis of Erimokastro, Rhodes. In: *Proceedings of the 8th international symposium on the conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, Patra, May 31–June 2, 2010.
- [67] Moropoulou A, Delegou ET, Geraveli M, Michael S, Bacolas A. Strategic planning of compatible conservation materials and interventions. The case study of mela place and ex hotel excelsior in Athens. In: Trakosopoulou K, Dousi M, Hajitriton NK, editors. *Interventions for the protection of historic constructions*, Proceedings of national conference, Thessalonik, 2004. p. 341–52, (1).
- [68] Moropoulou A, Delegou ET. Innovative technologies and strategic planning methodology for assessing and decision making concerning preservation and management of historic cities. In: Moropoulou A, Kollias E, Papatheodorou G, editors. *Proceedings of the 7th international symposium of the organization of world heritage, Cities*, September, 2004.
- [69] European Project 1996–1998. Environmental Impact assessment on historic centers and complexes using DIP and other NDT and E techniques – management bases. Scientific responsible: Moropoulou A., financed by Regional Enterprising Programmes of Crete, 1996–1998.
- [70] Moropoulou A, Kouli M, Kourteli Ch, Theoulakis P, Avdelidis NP. Integrated methodology for measuring and monitoring salt decay in the Medieval City of Rhodes porous stone. *J Mediterr Archaeol Archaeom* 2001;1(1):57–68.
- [71] Moropoulou A, Kourteli Ch, Achilleopoulos N. Environmental management and preservation of the medieval fortifications of the City of Rhodes. In: *International conference secular medieval architecture in the Balkans, 1300–1500, and its preservation*, AIMOS – Society for the study of medieval architecture in the balkans and its preservation, and organization for the cultural capital of Europe – Thessaloniki 1997, 3–5 November, 1997, [book of abstracts].



Available online at
SciVerse ScienceDirect
 www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
 www.em-consulte.com/en



Original article

The combined use of IRT and LDV for the investigation of historical thin vaults

Enrico Quagliarini^{a,*}, Enrico Esposito^{b,1}, Antonio del Conte^{b,1}

^a Department of Architecture, Building and Structures, Polytechnic University of Marche, via Breccie Bianche, 60131 Ancona, Italy

^b Artemis srl, c/o Polytechnic University of Marche, via Breccie Bianche, 60131 Ancona, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 May 2011

Accepted 9 January 2012

Available online 15 June 2012

Keywords:

Thin vaults

IRT

LDV

Historical plaster

NTD

Diagnostic of cultural heritage

ABSTRACT

Correct interventions on cultural heritage should have as their starting point an accurate diagnosis of its health, in order to design a compatible care. NDTs seem to offer a promising way in this sense. This paper deals with the combined use of IRT and LDV for the investigation of historical thin vaults made by timber arches, reeds, and plaster and it demonstrates that they can effectively support a deeper knowledge of these vaults as it concerns the presence of detached areas among the different mortar layers of the plaster and of detached areas among the mat of reeds and the nailed connection with the wooden bearing elements. This is a very important goal because these ND methodologies can be employed only on the lower surface of these vaults and sufficiently far from it, and they do not have any mechanical interaction with the historical, eventually frescoed or stuccoed, plaster, thus saving money and time.

© 2012 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

During last years, the growing importance of the correct determination of the state of conservation of artworks and monuments has been stated by all personalities in care of Cultural Heritage.

Correct interventions on historical structures should have as their starting point an accurate diagnosis of the various elements, in order to minimize the interference of the intervention with the historical nature of the architectural work [1].

There exist many analytical methodologies and techniques to investigate the state of conservation of artworks and monuments: the infrared thermography (IRT) [2–4] and the laser Doppler vibrometers (LDV) [5–8] seem to be two of the most promising ones, especially due to their non-destructive and non-intrusive performances. Besides, their integrated use has already successfully been employed in different applications [9,10]. In particular, this paper reports for the first time results about the use of both these two techniques for the investigation of historical thin vaults made by timber arches, reeds, and mortar: an ancient construction technique frequently found in many historical and monumental Italian buildings built between the 16th and the 19th century (Fig. 1). These thin vaults, in fact, often carry frescoes, stuccoes, wooden frames and plasters of artistic and historical value on their lower surface and at present are frequently in a hazardous state of conservation

as a result of a lack of maintenance over time [11,12]: many of them have begun to present cracks and sinkings on their precious lower surface, often due to the detachment between the different mortar layers of the plaster or to the detachment of the reeds from their timber arches. These two causes often result very difficult to be evaluated, especially when they are at the beginning phase, and frequently reveal themselves only when it is too late. At present, in fact, the diagnostic process mainly rely on the expertise of the restorer/technician and the typical investigation is accomplished mainly through manual and visual inspection of the structure, that could be very difficult and expensive because this kind of vaults usually:

- stand at significant heights and present a wide precious lower surface;
- are not able to withstand people on their top;
- present a narrow gap between their top and the roof.

It is therefore crucial to improve the investigation process on these historical vaults for the correct determination of their state of conservation, especially as it concerns the safeguard of their precious and historical lower surface. This is the case, for example, when important restoration works must be done on these vaults, which present a worrying degree of diffused lowerings: before any intervention the risk of damaging the historical lower surface must be assessed, in particular the probability of breaking the plaster into pieces when the vault will be lifted back in place.

No applications of the combined use of IRT and LDV on these kinds of vaults are known by the authors till now, and few researches are present in literature on them.

* Corresponding author. Tel.: +39 07 12 20 42 48; fax: +39 07 12 20 43 78.

E-mail addresses: e.quagliarini@univpm.it (E. Quagliarini), info@artemis-srl.it (E. Esposito), info@artemis-srl.it (A. del Conte).

¹ Tel.: +39 07 12 20 44 42, 0719720811; fax: +39 07 12 20 48 01.



Fig. 1. An example of a thin vault made by timber arches, reeds, and mortar.

2. Experimental methods

In order to assess the feasibility of the use of IRT and LDV for the investigation of historical thin vaults made by timber arches, reeds, and mortar, they were directly applied on a case study that had been previously investigated and surveyed by traditional methods [13].

The case study was the historical flat vault of the theatre-hall of the “Filarmonici” Theatre in Ascoli Piceno (Italy), the most ancient theatre of this town, dated 1832. The transversal span of the vault is about 16 m, while the longitudinal span is about 15 m. This vault, hanged by metallic ties from the roof and made by timber arches, reeds and mortar, has the lower surface almost uniformly painted by a pale brown tempera, with only few zones where stucco decorations and gilded wooden frames were placed. Furthermore, it showed a wide pattern of cracks, lowerings and some detachments of the plaster on its lower surface (Fig. 2), because of the differential settlements of the wooden arches caused by the bad working of the hangings as a result of a lack of maintenance over time; and the same upper reeds were locally detached from the nails connecting them with the bearing timber arches.

Thus, it represented a very good example for assessing the possible use of IRT and LDV on these kinds of vaults. The presence of



Fig. 2. The damaged lower surface of the historical thin vault of the “Filarmonici” Theatre-hall in Ascoli Piceno (Italy).

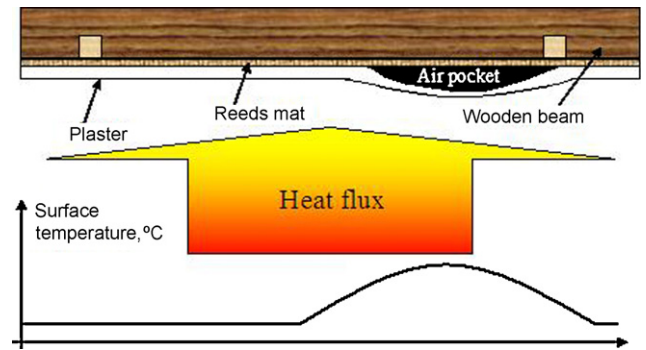


Fig. 3. Effect of detachments on the temperature distribution of an irradiated lower surface of the vault.

diffused different materials with different surface characteristics could give inappropriate IRT results, due to different emissivity values (in our case, only the zones where stucco decorations and gilded wooden frames are placed should be considered with particular care).

2.1. Infrared thermography investigation methodology

IRT has been used on the thin vault of the “Filarmonici” theatre-hall to check the presence of detached areas among the different layers that constitute the plaster. This application is based on the idea of locally heating the plaster surface by a powerful lamp, in order to obtain different temperature gradients due to the presence or absence of detachments. As show in Fig. 3, the air pocket created by the detachment will block the transmission of the heat through the structure and this will cause a localized increase in surface temperature. Surface excitation for IRT by lamps is a common diagnostic practice [3], although it must be done using a high degree of caution to avoid any damage to the artwork and a very skilled operator is needed.

The whole surface of the vault has been divided into small areas of about $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ each. These areas have been checked by using a 2 kW lamp heating for about 2 minutes, at a distance of about 2 m, with a Fresnel lens to focus the light beam on the desired area and an AVIO TVS600 and FLIR ThermoCAM B400 thermal cameras. All of the thermograms have been recorded after 2 minutes of heating, immediately after the lamp had been shut off. During the actual

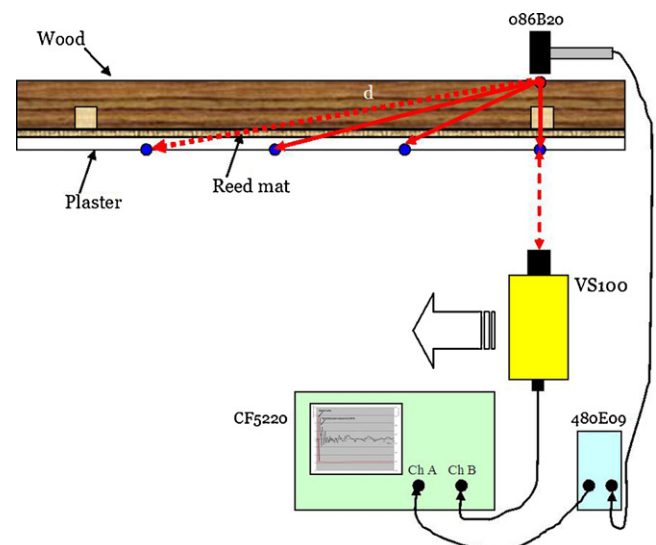


Fig. 4. Schematics of laser Doppler vibrometers (LDV) measurement set-up.

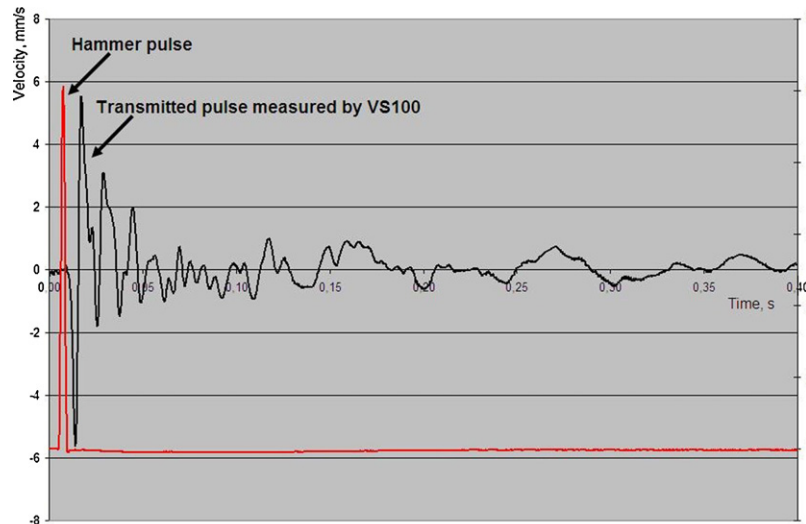


Fig. 5. Sample data recorded by the laser Doppler vibrometers (LDV): hammer pulse and example transmitted pulse.

measurement sessions, different images have been recorded following this first shot, but, only this image is presented in the paper such as to guarantee uniform and comparable results. All recordings, including the mosaic of Fig. 12, use the same temperature scale, ranging from 7.8 °C to 13.8 °C. It is important to underline that thermography allows to see variations in temperature rather than measure temperature directly, but for the scope of this research, this would not be an issue, given that we are not interested in actual temperature values but the main interests is for temperature gradients and differences. That is, we have to look for temperature gradients regarding areas of supposed uniform materials and thicknesses.

2.2. Laser Doppler vibrometers investigation methodology

LDV has been used in the “Filarmonici” theatre-hall vault to assess the possibility of checking the nailed connections

between its timber supporting arches and the reeds that carry the lower plaster. The idea is based on the following statement: when the two components are well linked to each other, a mechanical pulse (a slight hammer blow) on the former will generate a relatively high degree of vibrations in the latter, that can be detected by a LDV aimed at the lower surface. If the connection is weak, mechanical energy will not flow to the second component and small, if any, vibration will be generated. Waves that travel from the impact point to the recording point will attenuate accordingly to a linear relationship with distance. This is called “geometrical” attenuation and it is expressed by the following equation [14]:

$$v_b = v_a (r_a / r_b) e^{\alpha(r_a - r_b)}$$

where:

v_a = peak amplitude of surface vibration (m/s) at point a, at a distance r_a (m) from the source;

v_b = peak amplitude of surface vibration (m/s) at point b, at a distance r_b ($r_b > r_a$, m) from the source;

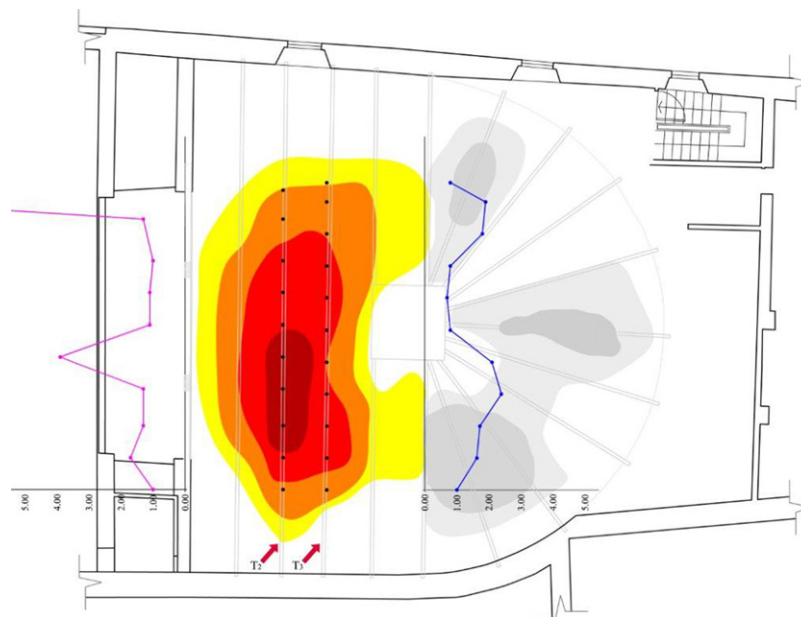


Fig. 6. Comparison of recorded lowerings of the vault and laser Doppler vibrometers (LDV) data. Dark red \cong 30–33 cm, red \cong 26–29 cm, orange \cong 20–25 cm, yellow \cong 15–19 cm.

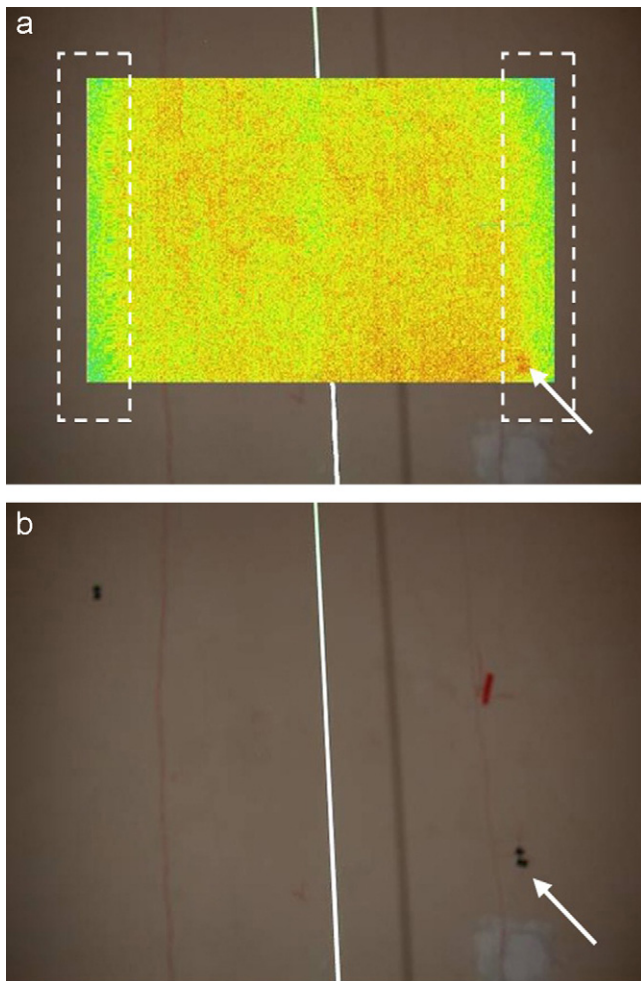


Fig. 7. The thermogram (a) shows a plaster surface with no detachments. The colder temperature of this thermogram (green areas within the dashed rectangular) is only due to an edge effect.

α = material damping attenuation (1/m).

In our case, we assumed $\alpha = 1$, so that any deviation from this simple rule, if the excitation is kept constant, may be related to a defective structural link. In this case the analysis is conducted exclusively in the time domain and the main difficulty resides in the flexibility of the whole vault, that can mask dangerous situations, so that a close scrutiny of data was required.

It is worth to underline that even if mechanical excitation of structures is a well-documented practice, with national norms that describe its use [15] and examples describing the use of impact hammers and other exciters [9,10,16], this must be done using a high degree of caution to avoid any damage to the artwork and, again, a very skilled operator is required.

Set-up was composed by a two-channel ONO-SOKKI CF5220 FFT spectrum analyser, an OMETRON VS100 LDV and a PCB 086B20 impact hammer with a PCB 480E09 preamplifier (see Fig. 4 for a scheme of the set-up and Fig. 5 for an example of recorded data).

Two beams (T2 and T3, see Fig. 6) have been checked and the measurement procedure is described as follows:

- a slight hammer blow is applied on top of a supporting wood beam, always on the same place (red spot in Fig. 6);
- induced vibrations are recorded by the LDV aimed at equally spaced points (about 1 m) on the intrados (black points in Fig. 6); LDV is connected to Channel B of the ONO-SOKKY, the hammer to Channel A and acquisition on both channels is synchronous;

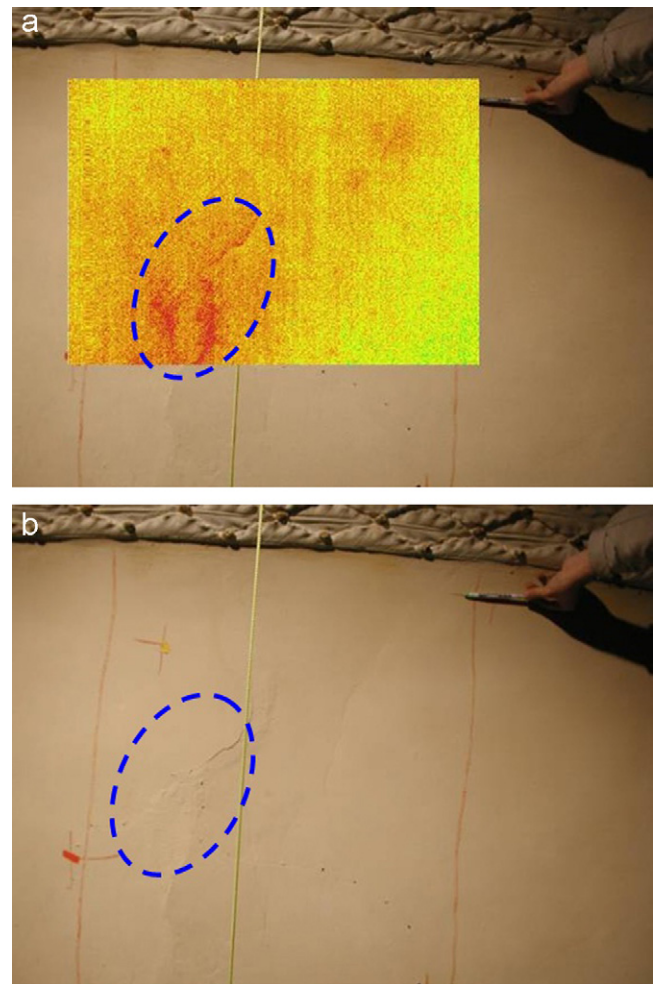


Fig. 8. The warmer zones encircled (the red areas) identifies a delamination of the plaster.

- data are stored in the ONO-SOKKI and then transferred to a PC for normalization by the impressed force; this is necessary due to the not constant value of the impressed force, so that vibration amplitude could randomly vary due to this fact;
- measured vibration decrease with distance (d , in Fig. 4) is compared with theoretical linear one and data plotted: due to data normalization, all values greater than 1 identify a detached area.

3. Results and discussion

3.1. Infrared thermography investigation

The thermogram reported in Fig. 7 shows a plaster surface with no detachments. The colder temperature of this thermogram (green areas within the dashed rectangular) is only due to an edge effect.

Some example thermograms that reveal plaster detachments are reported in Fig. 8. The warmer zones encircled (the red areas) identify a delamination of the plaster. These detached areas are almost always placed close to a crack or around it. This was a common surveyed result: the presence of cracks will almost always generate some detachments aligned along their free edges.

Not all of the thermal anomalies can be always assigned to the presence of plaster detachments. A particular situation is reported in Fig. 9. The framed area, placed close to a crack, has a higher temperature, but this anomaly does not depend on a plaster

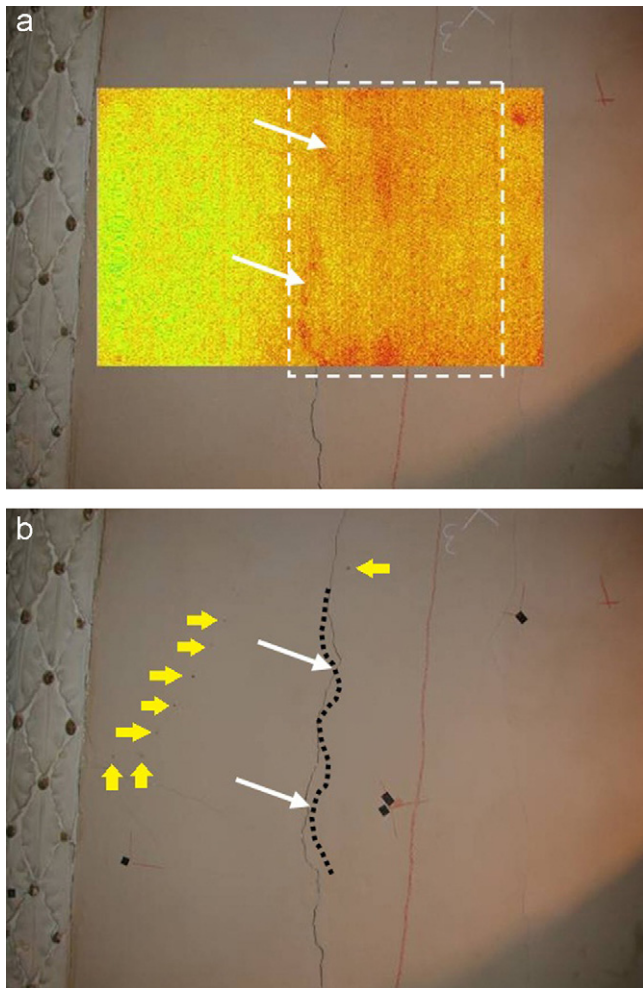


Fig. 9. The framed area, placed close to a crack, has a higher temperature, but this anomaly must not be assigned to the presence of plaster detachments. This anomaly depends on a thinner thickness of the plaster due to a plaster lack that was then recovered, as some small nails (yellow arrows) used for increasing the grip between the new plaster layer and the oldest one prove and as documented by means of some samples taken from the dashed rectangular area and from some dashed circular areas of Fig. 13 [13].

detachment, but rather on a thinner thickness of the plaster² [13]. Plaster thickness could in fact influence recorded thermograms, because heat mass changes and, given a constant heat flux, this results in differing surface temperatures. This situation is well evident in Fig. 10, where it is possible to recognise the presence of a detachment and two cracks, both identified by the local temperature raise. It is also possible to observe that the thermal image presents an average temperature difference between its right and left parts, this fact is due to different local plaster thicknesses, measured across these cracks.

As a general rule, only the warmer areas (deep red areas) can be associated with plaster delamination.

Finally, Fig. 11 reports a thermogram where thermal anomalies due to the presence of a stucco decoration and a wooden gilded frame can be observed: none of them related to any type of defect.

² Different plaster thicknesses can be very common due to the intrinsic non-homogeneity of the construction technology of this system. In this case, the thinner thickness of the plaster depends on a plaster lack that was then recovered, as some small nails used for increasing the grip between the new plaster layer and the oldest one prove and as documented by means of some samples taken from the dashed rectangular area and from some dashed circular areas of Fig. 12 [13]. Thermogram of Fig. 9, in fact, belongs to the dashed rectangular area of Fig. 13. This area perfectly agrees with the above-mentioned plaster lack size.

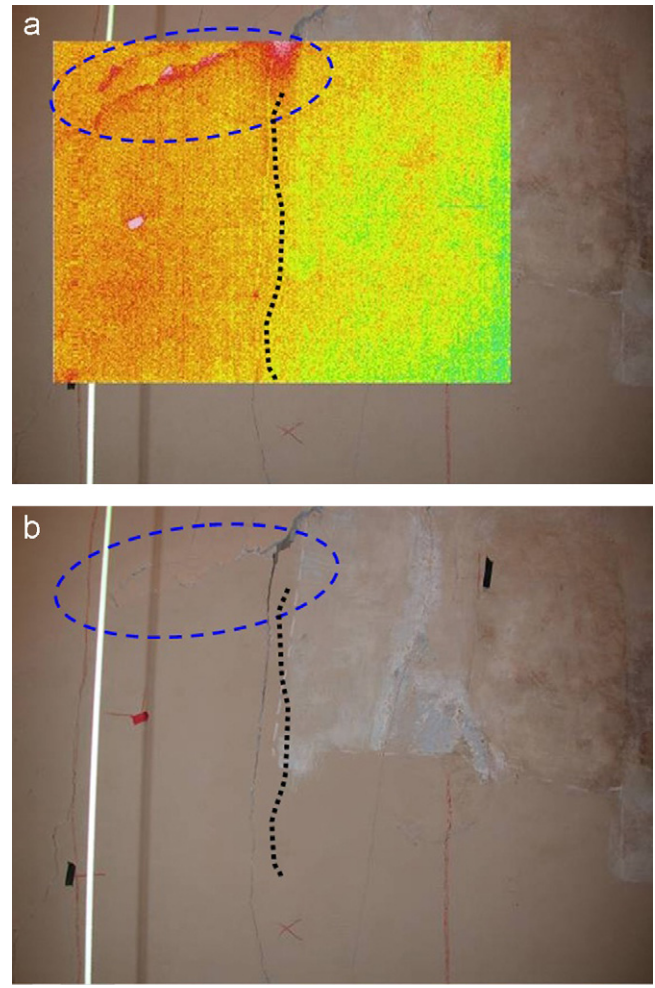


Fig. 10. It is possible to recognise the presence of a detachment and two cracks, both identified by the local temperature raise. The temperature difference between its right and left parts is due to differing local plaster thicknesses, measured across these cracks.

However, another remark is due. A mosaic composed of about 200 thermal images (Fig. 12) has been prepared and identified detachments superimposed on it (encircled areas in Fig. 12). Data indicated by “A” do not identify a large detached area although they show an average higher temperature: this fact is due to the geometry of the vault, that is not perfectly flat, but has an increasing curvature towards the bearing walls, so that, when heating proceeding from the center of the vault towards its edges, especially moving from the stage area to the back of the theatre hall, the lamp is closer to it and we have a stronger heating effect.

3.2. Laser Doppler vibrometers investigation

Normalized vibration data are compared with the lowering diagram of the vault (Fig. 6), where the black spots identify the LDV measurement points, and a clear correspondence between the two measurement series is evident. The largest lowering of the vault coincides with the areas where the reed mat is detached from the supporting wooden beams. Not all detached areas among the reeds and the nailed connection with the wooden bearing elements coincide with lowering maxima and vice versa, allowing to distinguish between areas where the reed mat is detached from those where the whole structure is deformed.

Comparing results between IRT and LDV measurements (Figs. 6 and 12), a remarkable superposition of them is possible

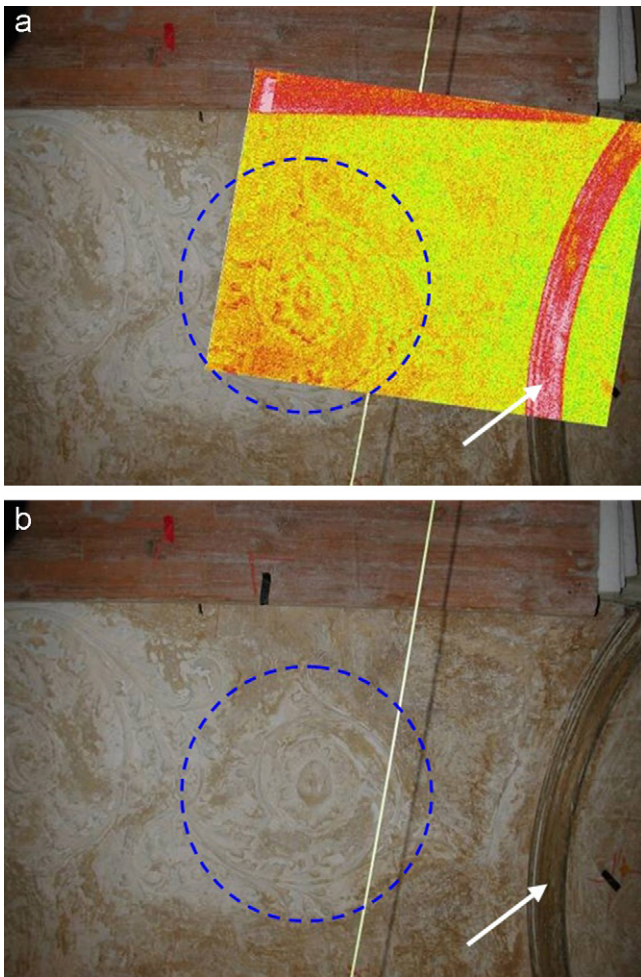


Fig. 11. The thermal anomalies are due to the presence of a stucco decoration and a wooden gilded frame.

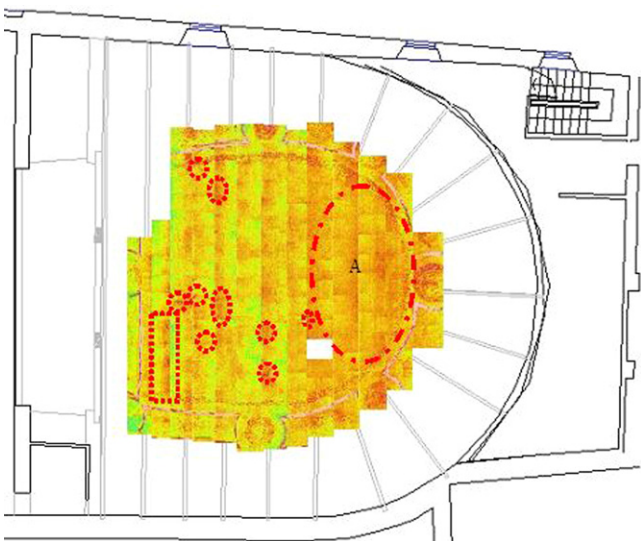


Fig. 12. A full mosaic composed of about 200 thermal images. Data indicated by "A" do not identify a large detached area although they show an average higher temperature: this fact is due to the geometry of the vault, that is not perfectly flat, but has an increasing curvature towards the bearing walls, so that, when heating proceeding from the middle of the vault towards its edges, especially moving from the stage area to the back of the theatre hall, the lamp is closer to it and we have a stronger heating effect. The warmer zones (the red areas) encircled identify a delamination of the plaster. These detached areas are almost always placed close to a crack or around it. The dashed rectangular area identifies a thinner thickness of the plaster.

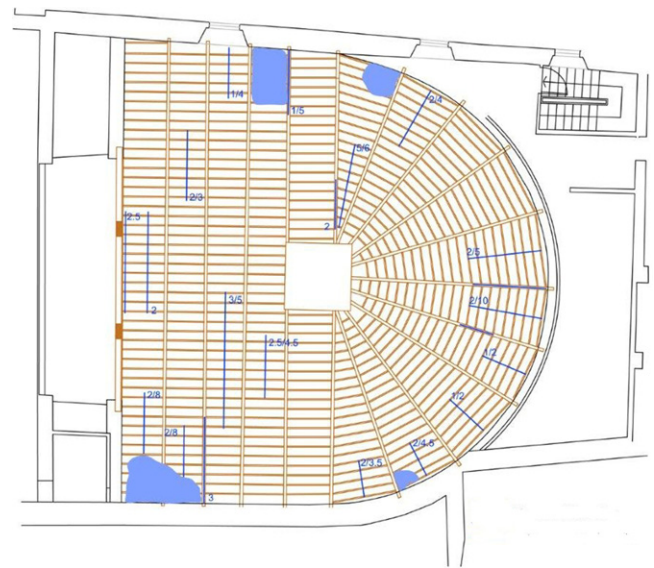


Fig. 13. Recorded detachments between the reeds and the upper bearing wooden arches and laser Doppler vibrometers (LDV) data (measurers are in cm).

to note. That is, where the reeds are detached from their bearing wooden arches (peaks in Fig. 6), we commonly find delaminations in the plaster (encircled areas in Fig. 12). This is quite reasonably considering that lowerings of the mat of reeds usually produce tensile stress on the lower surface, making it crack. Cracks in their turn could easily generate some detachments aligned along their free edges, as stated and detected before.

Moreover, comparing the results from LVD and the detachment diagram of the reeds from the upper timber structures there is a very good agreement (Fig. 13).

4. Conclusions

Correct interventions on cultural heritage should have as their starting point an accurate diagnosis of its health, in order to design a compatible care. NDTs seem to be a promise way in this sense. In particular, the results of this research clearly demonstrate that IRT and LDV can support effective analysis on thin vaults made by timber arches, reeds, and mortar, thus achieving a deeper level of knowledge as it concerns the presence of detached areas among the different mortar layers of the plaster and of detached areas among the mat of reeds and the nailed connection with the wooden bearing elements, respectively.

This is a very important issue because these ND methodologies can be employed only on the lower surface of these kinds of vaults and sufficiently far from it, and they do not have any mechanical interaction with the historical, eventually frescoed or stuccoed, intrados, thus saving money and time.

Anyway, it is important to underline that to correctly identify the previously cited detachments a great deal of experience and a close scrutiny of thermograms and vibrometric data are required.

A further deal of research is still necessary for the correct interpretation of IRT and LDV results applied on more elaborate thin vaults (i.e. when the intrados has diffused different materials).

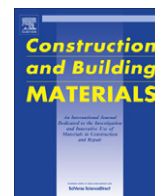
Acknowledgements

The authors wish to gratefully acknowledge the valuable assistance given by: Eng. M. Curzi, Arch. R. Terpolilli and Arch. Enrica

Petrucci, P.A. of Ascoli Piceno. The authors acknowledge the financial supports from the Municipality of Ascoli Piceno (Italy).

References

- [1] V. Bosiljkov, M. Uranjek, R. Zarnic, V. Bokan-Bosiljkova, An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures, *J. Cultur. Herit.* 11 (2010) 239–249.
- [2] X.P.V. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2001.
- [3] Grinzato E., *Temperature Monitors Works Of Art Health As Human Beings*, Proceedings of WCNDT 2004, 16th World Conference on NDT, Montreal, Canadian Institute for NDE, Hamilton Canada, 2004. (http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/thermography_thermal_techniques/34_grinzato.pdf).
- [4] S. Imposa, Infrared thermography and georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy), *J. Cultur. Herit.* 11 (2010) 259–264.
- [5] Esposito E., *Laser Doppler Vibrometry*, in *Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science*, in: M. Schreiner, M. Strlič, R. Salimbeni, COST office (Eds), Brussels, Belgium, 2008.
- [6] P. Castellini, E. Esposito, V. Legoux, N. Paone, M. Stefanaggi, E.P. Tomasini, On field validation of non-invasive laser scanning vibrometer measurement of damaged frescoes: experiments on large walls artificially aged, *J. Cultur. Herit.* 4 (Supplement 1) (2000) S349–S356.
- [7] P. Castellini, E. Esposito, B. Marchetti, N. Paone, E.P. Tomasini, New applications of scanning laser Doppler vibrometry (SLDV) to non-destructive diagnostics of artworks: mosaics, ceramics, inlaid wood and easel painting, *J. Cultur. Herit.* 4 (2003) 321s–329s.
- [8] P. Castellini, E. Esposito, N. Paone, E.P. Tomasini, Non-invasive measurements of damage of frescoes paintings and icon by laser scanning vibrometer: experimental results on artificial samples and real works of art, *Measurement* 28 (2000) 33–45.
- [9] A. del Conte, M. Feligiotti, A. Agnani, E. Esposito, S. Goncalves Tavares, An SLDV/GPR/IR-T integrated approach for structural and frescoes investigation in the medieval monasteries of Moldavia, Proceedings of the International Conference Lasers in the Conservation of Artworks - Lacona VII, Edited by J. Ruiz, R. Radvan, M. Oujja, M. Castillejo, P. Moreno, CRC Press, London, 2008, 419–25.
- [10] A. Agnani, R. De Andrade, E. Esposito, M. Feligiotti, S. Tavares, Frescoes diagnostic using laser Doppler vibrometry and infrared thermography: experimental and numerical approaches, Proceedings of 7th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, SPIE Vol. 6345, Bellingham, USA, 2006.
- [11] E. Quagliarini, M. D'Orazio, A. Stazi, Rehabilitation and consolidation of high-value “camorcanna” vaults with FRP, *J. of Cultur. Herit.* 7 (2006) 13–22.
- [12] E. Quagliarini, M. D'Orazio, Light vaults with frescoes or stuccoes strengthened by GFRP, the role of the reinforcement on intrados strains: first experimental data, *Int. J. Cultur. Herit.* 4 (2010) 320–336.
- [13] Quagliarini E., Lenci S., *Il plafone del Teatro dei Filarmonici di Ascoli Piceno*. Conoscenza, Conservazione e Valorizzazione, Ed. Alinea, Firenze, 2010. (in Italian).
- [14] H. Amick, M. Gendreau, Construction vibrations and their impact on vibration-sensitive facilities, Proceedings of ASCE Construction Congress 6, Kenneth D. Walsh (Ed.), American Society of Civil Engineers, Baltimore, 2000.
- [15] Italian Recommendation CNR-ICR NorMaL 22/86, Measure of the speed of sound propagation, 1986.
- [16] F. Vignola, J. Bucaro, B. Lemon, G.W. Adams, A.J. Kurdila, B. Marchetti, E. Esposito, E.P. Tomasini, H.J. Simpson, B.H. Houston, Locating faults in wall paintings at the US Capitol by Shaker-Based Laser Vibrometry, *APT Bulletin* 1, vol. XXXVI, 25–33. APT International, Lisle, IL, USA, 2005.



Characterization of historical lime plasters by combined non-destructive and destructive tests: The case of the sgraffito in Bożnów (SW Poland)

Wojciech Bartz^{a,*}, Jaroslaw Rogóż^b, Robert Rogal^b, Adam Cupa^b, Pawel Szroeder^c

^a Institute of Geological Sciences, University of Wrocław, ul. Cybulskiego 30, 50-205 Wrocław, Poland

^b Institute for the Study, Restoration and Conservation of Culture Heritage, Nicolaus Copernicus University, ul. Sienkiewicza 30/32, 87-100 Toruń, Poland

^c Institute of Physics, Nicolaus Copernicus University, ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń, Poland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 September 2011

Received in revised form 16 November 2011

Accepted 2 December 2011

Available online 3 January 2012

Keywords:

Historic plaster

Sgraffito

Characterization

Non-destructive tests

Destructive tests

ABSTRACT

Mortars used in the two-color sgraffito, dated back to 17th century, have been investigated in order to fully characterize the material and to evaluate the state of its preservation. The non-destructive tests carried out “in situ”, comprising thermal imaging and ground penetrating radar, revealed the inner structure of the decoration, which was exfoliated from the wall in ca. 90%. The obtained thermograms and the GPR scans allowed to choose sampling areas for subsequent destructive-tests, performed by means of optical microscopy, chemical analysis, granulometric analysis, X-ray diffractometry, scanning electron microscopy, infrared spectroscopy and differential thermal/thermogravimetric analysis. The results reveal the decoration is composed of two separate coats of lime plasters: (1) the primer plaster and (2) the sgraffito plaster. Both the coats appeared to be a mixture of lime binder (aerial lime) and fine- to medium-grained sand, with addition of small amounts of brick chunks and charcoal. The latter is abundant in the sgraffito plaster, serving as a coloring agent. For elimination of plasters exfoliation, a calcareous PLM-A product of C.T.S. Italy was applied by injection. The non-destructive studies performed after this conservation demonstrates that the rehabilitation work has reestablished homogeneous structure of the sgraffito decoration.

Our study indicates that full characterization and proper reconstruction of ancient mortars could be attained by complementary employment of destructive and non-destructive test methods. Moreover, repetition of the non-destructive tests after the rehabilitation works provide valuable insights into their effectiveness.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The analytical characterization of the historical sgraffito decorations can provide a set of data that is vital when defining conservation strategies, as it provides information about the technology of historical mortars, their composition and the degree of weathering. From the recently developed scheme of examinations, the information about filler, binder, and porosity of mortars can be revealed, as well as materials introduced during the conservation treatments and atmospheric pollutants condensed inside the pores. Changes in mineralogical composition of mortars can highlight the proper consolidation methods during the planned conservation treatment.

The aim of this work is to study and to characterize the ancient mortars used in the two-color sgraffito decoration (Fig. 1). It is located on the northern wall of the western tower of the church in Bożnów, a small village situated in SW Poland. The sgraffito was completed by Christoph Rutsch and his two assistants in 1609.

White lime plaster (the primer plaster) was covered with a layer of a lime colored gray with charcoal (the sgraffito plaster), where the ornaments were scraped off.

In the 19th century the sgraffito was covered with a layer of plaster. In 1931 the decoration was uncovered by German scholars. However, due to the poor state of preservation the decoration was plastered up. In 1972 the sgraffito was uncovered again and subjected to restoration treatment (Fig. 1a and b). For over 30 years the object was exposed to rainwater that trickling from the tower roof, washed out the lime paint and brought about delamination and huge plaster losses (Fig. 1c). The capillary rise of water as well as the change of temperature and humidity conditions were also responsible for the deterioration.

For elimination of plasters exfoliation, in 2008 after detailed examination a calcareous PLM-A product of C.T.S. Italy was applied by injection. This material provides joints permeable for gas and vapor and shows porosity, water absorption and hygroscopic properties similar to those of the original sgraffito from Bożnów. It is resistant to temperature and humidity changes characteristic of the climate in Poland. The current condition of the sgraffito, after complete restoration in 2008, is shown in Fig. 1d.

* Corresponding author. Tel.: +48 71 3759205; fax: +48 71 3759371.

E-mail address: wojciech.bartz@ing.uni.wroc.pl (W. Bartz).

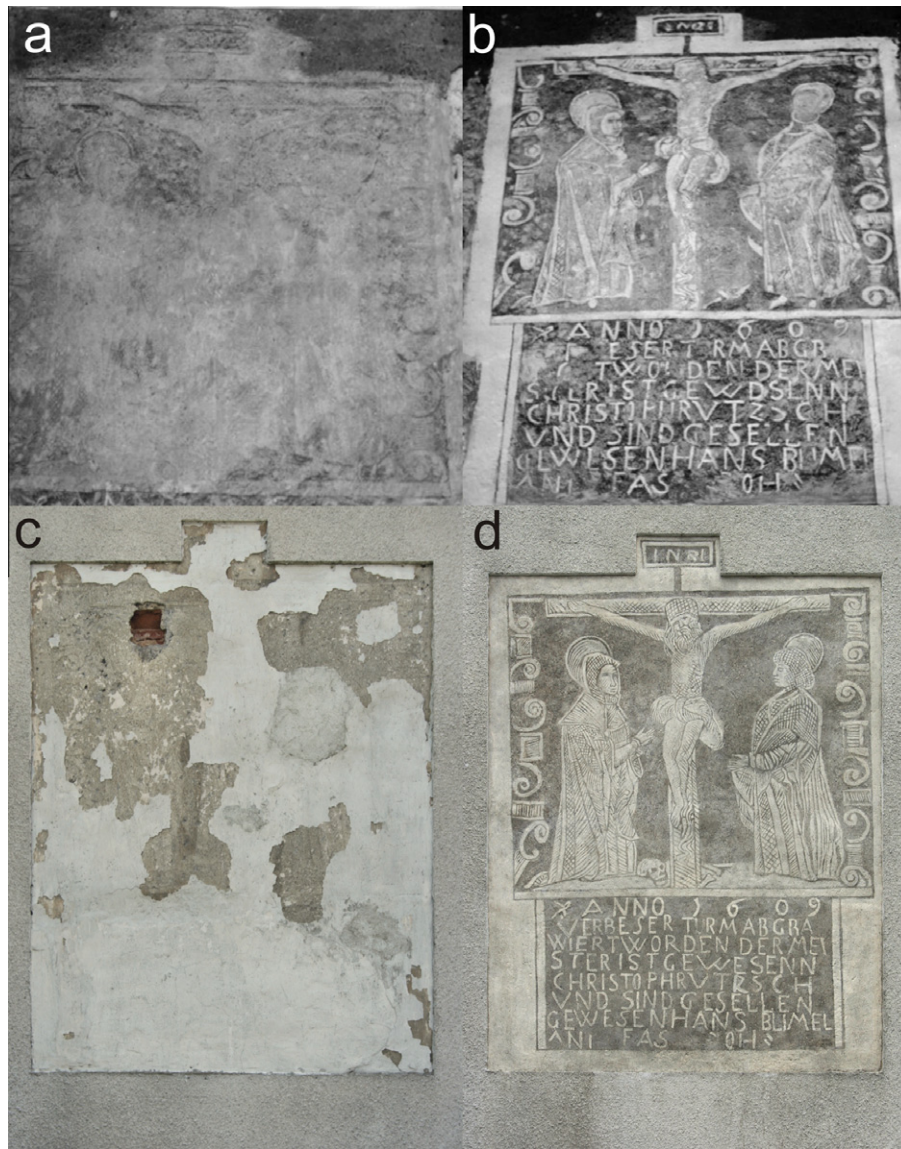


Fig. 1. The 17th century sgraffito decoration from the church in Bożnów (SW Poland). State of preservation before (a) and after conservation treatment in 1972 (b). State of preservation before (c) and after conservation treatment in 2008 (d).

In order to sufficiently characterize the sgraffito decoration and subsequently to design the repair mortar, a basic schema of the experimental methods proposed by Arioglu and Acun [1] was applied. Destructive test methods (requiring sampling of the object i.e. petrographical and mineralogical analyses) were preceded by non-destructive test methods, carried out “in situ”. In our particular case, the non-destructive tests comprised Infrared Thermography (IT), and ground penetrating radar (GPR). The former has been widely used for the non-destructive analysis of historic art and architecture, where it has been applied to identify and to map structural defects and the presence or movement of moisture through bulk historical materials (walls, plasters, masonry). Recent advances in infrared technology have led to the development of new applications which facilitate monitoring of the art conservator treatment of wall decorations such as frescos [2,3]. David and Daniels [4] have shown that GPR can be employed successfully in near surface studies, therefore the infrared imaging was supplemented by the three-dimensional ground penetrating radar (3D GPR) which was applied for prospecting voids.

2. Experimental methods

Thermal imaging (IT) was performed using infrared camera Thermo-CAM™P65. The images were recorded in the range of wavelength 7.5–14.0 μm. The emissivity of the object was fitted to 0.90. The images were performed at relative humidity of 40% and at ambient temperature 25 °C and 20 °C before and after conservation treatment, respectively. The distance between the camera and the object was fitted to 7 m. GPR profiles were recorded using IDS RIS 2K “ALADDIN SK2” system equipped with 2 GHz bipolar antenna.

The area of sampling was chosen on the basis of non-destructive examinations, that fully revealed inner structure of decoration. Representative samples of the primer plaster and the sgraffito plaster, weighing ca. 60–80 g, were taken with the use of hammer and chisel for subsequent investigations. For spectroscopic analyses the samples of the mass of several mg were carefully scratched off directly from the decoration.

Following the scheme of analytical procedure for destructive tests proposed by Middendorf et al. [5], optical microscopy (OM) a preliminary approach for the qualitative characterization of the examined mortars. First, samples were dried to remove moisture at the temperature below 40 °C to avoid forming microcracks and to restrict dehydration of possible hydrous minerals [6]. After impregnation with low-viscous resin under vacuum, thin sections were prepared by grinding and polishing with paraffin/silicon-carbide suspension, to attain thickness of 30 μm. Optical observation of thin sections was done using a polarizing microscope.

For the chemical analysis, two representative samples were crushed in an agate mortar and dried until constant weight. Subsequently, 1 g of the sample was digested with hot HCl (2 M), following the procedure proposed by Alvarez and co-authors [7] and the soluble fraction was analyzed. According to RILEM procedure [5] the contents of Al, Mg, Fe, Na, K, and Ca were determined by Atomic Absorption Spectroscopy (Avanta Sigma GBC, in the Laboratory of Soil, at the Institute of Geography and Regional Development of the University of Wrocław, Poland). The content of acid soluble SiO_2 was determined using Atomic Emission Spectroscopy (Varian 700 ES, in DM Laboratory of Environmental Analyses in Siechnice, Poland).

Microstructures, crystals morphology and their composition were studied by means of scanning electron microscopy (SEM), with energy dispersive X-ray analysis (EDX). Freshly broken samples were covered with a thin carbon layer under vacuum conditions and studied with HITACHI S-4700 microscope at accelerating voltage of 20 kV, in Laboratory of Field Emission Scanning Electron Microscopy and Microanalysis at the Institute of Geological Sciences of the Jagiellonian University.

Next step in our approach was sieve analysis, carried out in order to evaluate grain size distribution, as well as to obtain separated material for subsequent instrumental analysis. Samples were ground in an ultrasonic cleaner for ca. 1.5 h, dried at 40 °C and carefully weighted. Afterwards the granulometric analysis of the samples was performed by mechanical sieving with ISO 565 series sieves, and sieve interval of 1 Φ , starting with sieve size of 0 Φ (1.0 mm) and end sieve size of 4 Φ (0.063 mm). According to numerous authors [8–10] the finest fraction <0.063 mm should be considered as strongly enriched in binder, however insignificant quantities of the filler could be found within this particle size range [9]. Next, separated samples on binder and filler were analyzed independently.

For mineralogical characterization of binder as well as filler, X-ray powder diffraction method (XRD) was applied using Siemens D 5005 powder diffractometer (at the Institute of Geological Sciences, University of Wrocław, Poland), $\text{CoK}\alpha$ radiation, scanning speed $2\theta = 2.0$ deg./min (fraction >0.063 mm) and $2\theta = 1.0$ deg./min (fraction <0.063 mm), 30 kV and 20 mA current, and Diffract-EVA software.

Infrared spectroscopy (IR) was used for gathering qualitative information on some main compounds contained in mortars and for determining the presence of organic compounds as well as colorants. Infrared spectra were recorded at the Institute of Physics, Nicolaus Copernicus University in Toruń, using a Specord M-80 apparatus with a spectral resolution of 2 cm^{-1} . Powdered samples of plaster were run as pressed KBr pellets. The identification of the organic components was achieved using databases found in literature [11].

Apart from optical microscopy, X-ray powder diffraction and IR, thermal studies are complementary techniques, providing a complete characterization of phases constituting mortars [12]. This method allows to identify phases of low crystallinity, which could not be analyzed by means of X-ray diffraction methods. Additionally, results obtained can provide information on the degree of hydration and carbonation for lime based mortars [12]. Therefore, thermal transformation of powdered fraction <0.063 mm, separated from each sample, weighting approximately 300 mg, was recorded with a Derivatograph MOM Q-1500D (at the Institute of Geological Sciences, University of Wrocław). For differential thermal/thermogravimetric analysis (DTA/TG/DTG) samples contained in ceramic crucible were heated at the constant rate of 10 °C/min in static air atmosphere, from room temperature up to 1000 °C.

3. Results and discussion

3.1. Thermal imaging and ground penetrating radar

Thermal images taken from the sgraffito decoration before and after conservation are shown in Fig. 2. A diversified temperature distribution in areas with near surface anomalies is observed (Fig. 2a). The dark area reflects the presence of cement-calcareous screeds, whereas the primer plasters are distinguished by slightly higher temperature. A vast area of plaster exfoliation characterized by higher temperature is recognized as bright fields. Such anomalies are recorded within ca. 80–90% of the plaster preserved. The images obtained after completion of the planned non-destructive and destructive tests and the conservation treatment with PLM-A product (Fig. 2b) are thermally homogeneous proving the efficiency of plaster consolidation during the conservation phase.

The GPR examination (Fig. 3) shows the intersections of pseudo 3D display obtained merging scan acquired with the bipolar 2 GHz antenna. The light fields reflect the area characterized by high amplitude of the radar echo on the anomaly surface. The nearly black areas, in turn, are characterized by small echo amplitude present inside anomalies. The most common anomalies in the examined plaster are voids which result from plaster exfoliation processes. Exfoliation between the wall and the primer plaster, between the

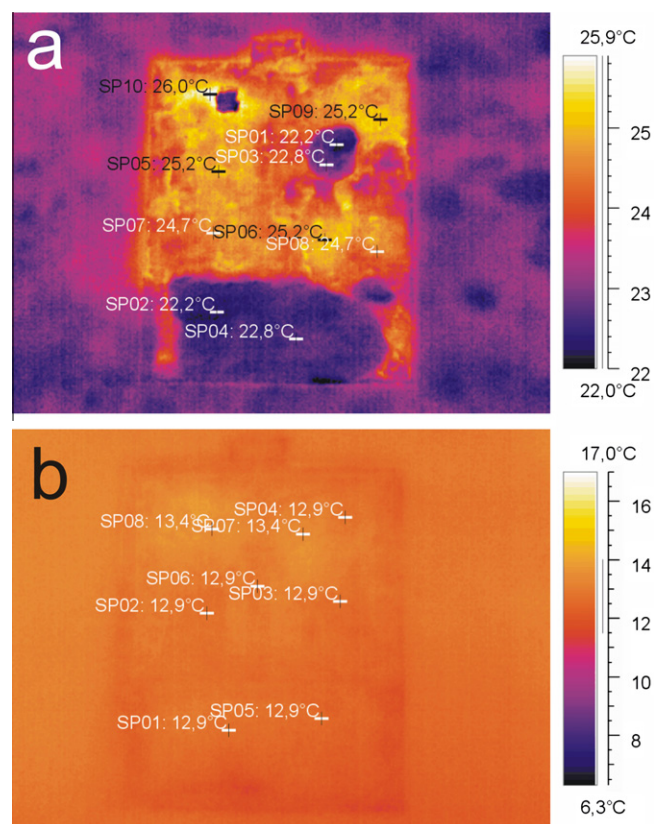


Fig. 2. Infrared images of the decoration before (a) and after conservation treatment (b).

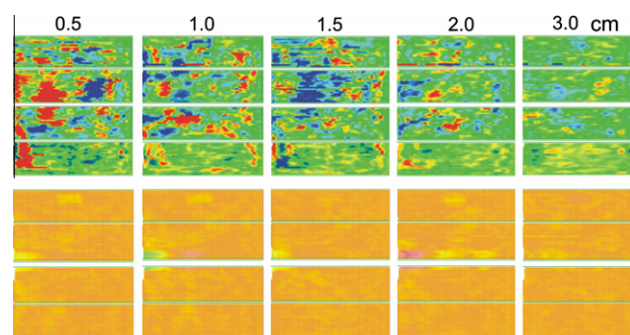


Fig. 3. Intersections of pseudo 3D GPR display of the sgraffito decoration before (upper series of images) and after conservation treatment (bottom series). Above, the depth of intersection is depicted.

primer plaster and the sgraffito plaster and within the inner parts of plasters itself is noticed. As in case of thermal imaging, one of the aims of the GPR study was to assess the efficiency of plaster consolidation. The 3D display shows no anomalies proving the proper plaster consolidation (Fig. 3).

3.2. Optical and electron microscopy

All mortars observed by optical microscopy consist of fine- to medium-grained inert filler, composed of rounded, subrounded to less common subangular grains, generally varied in size and mineralogy, embedded in the very fine-grained matrix (Fig. 4). Quartz plus feldspars (alkali feldspar as well as plagioclases) dominate, whereas uncommon lithic grains (magmatic rocks: granitoids and rhyolites) accompany them. The accessory minerals are

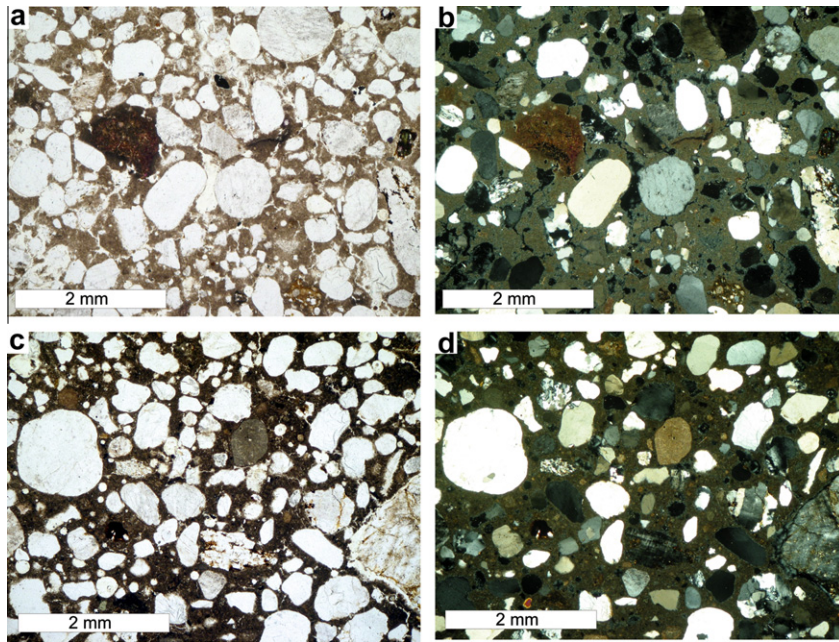


Fig. 4. Microphotograph of the primer plaster (a and b) and the sgraffito plaster (c and d) taken in plane-polarized light (a and c) and cross-polarized light (b and d).

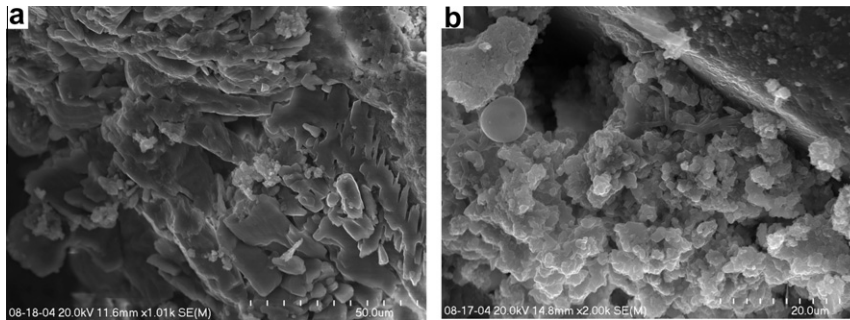


Fig. 5. SEM images of investigated mortars. (a) Large, porous chunk of charcoal (in the center) and micritic binder (upper-right corner), the sgraffito plaster and (b) porous micritic binder (in the center) and grain of the quartz (upper-right corner), the primer plaster.

represented by biotite, amphibole, zircon, with very sparse pyroxene and staurolite. They are associated with sporadic brick and charcoal (chunks as well as superfine dust). The plasters differ by the abundance of the latter. Regarding the primer plaster, there are only traces of the charcoal chunks, which presumably represent remnants of the kiln fuel, whereas the sgraffito plaster contains large quantities: chunks, as well as the charcoal dust (Figs. 4c and d and 5a), serving as a coloring agent [6].

Calcitic matrix is observed at the polarizing microscope (Fig. 4), thus categorizing both mortars as typical lime mortars. It appears as brown micrite in plane-polarized light, medium-coherent with numerous randomly oriented cracks, usually considered as the effect of shrinkage [6]. SEM observations (Fig. 5b) revealed its good adherence to grains of the filler, as well as calcite crystals with different morphologies. Fig. 6a shows coexistence of porous micrite, composed mainly of calcium carbonate with traces of Si and Mg, and locally newly formed euhedral and almost pure crystals of sparry calcite. Moreover, sparse pores are coated with microcrystals of calcite, oriented perpendicularly to the surface. These phenomena indicate solution and re-precipitation of carbonates (so-called autogeneous healing, [6]). Very sparse irregular aggregates of gypsum plates, identified by means of SEM/EDAX (Fig. 6b) occur within the sgraffito plaster only. It is well known that gypsum is the main weathering product of carbonate-based materials, result-

ing from chemical reaction between calcite and atmospheric sulfur dioxide [13,14]. Its presence is presumably connected to weathering of the outer layer of the sgraffito, exposed to pollution, rather than original binder constituent.

Typically, calcitic matrix of both samples contains sparse, rounded lime-lumps, reaching up to 4.0 mm in diameter. These binder related particles are composed of dark brown micrite (Fig. 4a), free from grains of the filler. SEM/EDX investigations showed they are composed mainly of calcium, with traces of magnesium and silicon. According to the literature data [15–18], the type of lime could be identified on the basis of lime-lumps composition. Apart from the fact that their origin is still under debate [6], we presume that they represent burnt lime chunks, not fully slaked due to water deficiency [19,20]. This suggests that relatively low water/burnt lime ratios were used during slaking, or excess of the water was rapidly added to the lime-pit, generating the impermeable hydrated surface, leaving its interior not fully reacted [21]. The lime-lumps could also come from very short seasoning of slaking lime.

3.3. Chemical analysis

Calcium oxide is the main component of this fraction, whereas the concentration of magnesium oxide as well as R_2O_3 oxides and acid soluble silica are relatively low (Table 1). These compounds

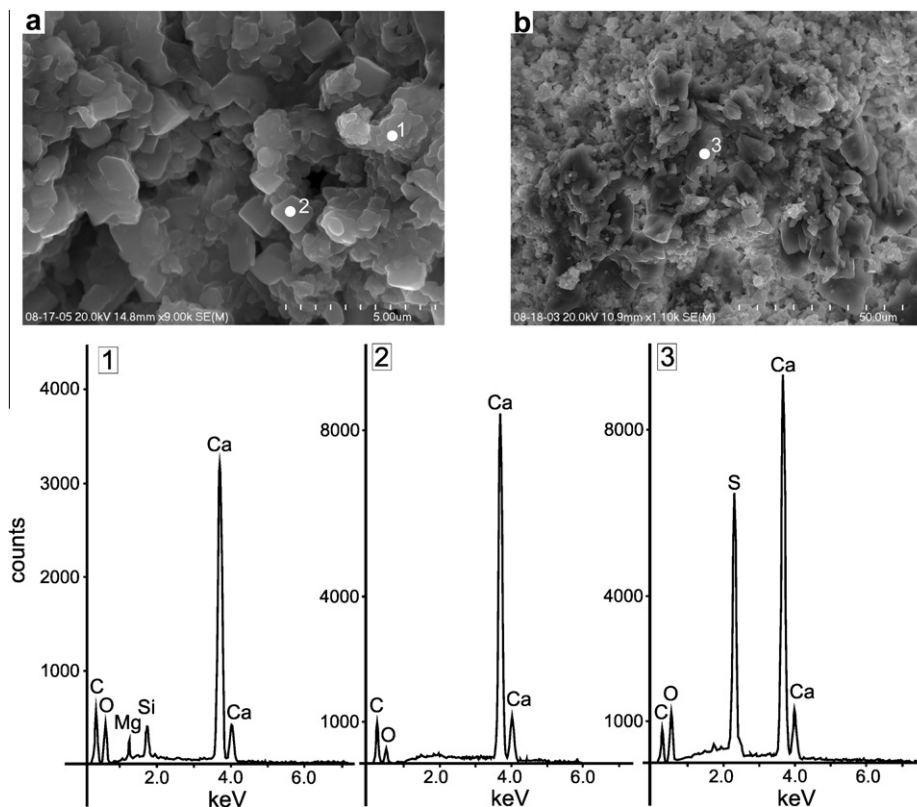


Fig. 6. SEM images of investigated mortars and representative EDS spectra. (a) Neoformed sparry calcite embedded within micritic calcite (the primer plaster) and (b) gypsum aggregate (in the center, the sgraffito plaster).

determine the hydraulic properties of mortar, particularly the acid soluble silica. On the basis of the oxides concentration the Cementsation Index (CI) was calculated (Table 1, [22]). Since the values are less than 0.3, mortar from the primer plaster and from the sgraffito plaster is non-hydraulic (Table 1), containing aerial lime as binder. Low concentrations of potassium and sodium (Table 1) indicate low amount of soluble salts.

3.4. Grain size distribution

The granulometric analysis shows that both samples exhibit similar bimodal grain size trends (Fig. 7). The most abundant fraction is below 0.063 mm, with the content of 35 and 39 wt.% for the primer plaster (sample ZW0817) and the sgraffito plaster (sample ZW0818), respectively. Contrarily, the next fraction range (0.125–0.063 mm) shows the lowest value, not exceeding 1 wt.%. Grains with size between 0.250 and 0.125 mm make 5 or 7 wt.% of the total sample. A maximum is defined for coarser grained fraction, i.e. 0.50–0.25 mm, representing up to 22–23% of the total weight. Subsequently, the distributions tend to lesser values, with fraction 1.0–0.5 mm making up 20–18% of the total weight. The coarse-grained material retained by the 1.000 mm sieve exhibits relatively low percentages, ranging between 13 and 17 wt.%.

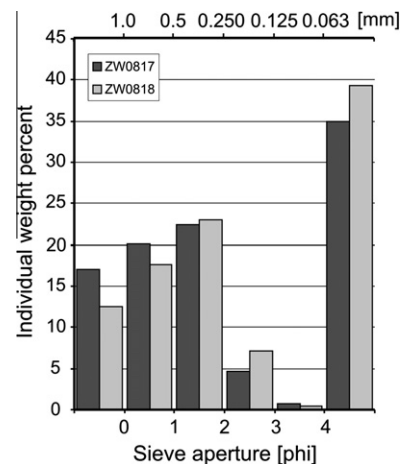


Fig. 7. Grain size distribution of analyzed samples. Sample ZW0817 – the primer plaster, sample ZW0818 – the sgraffito plaster.

On the basis of grain size distribution, the binder/filler ratio per weight was calculated by dividing the mass of sample passing through the sieve 0.063 mm, considered as a binder, and retained

Table 1
Chemical analysis of the acid soluble fraction. Sample ZW0817 – the primer layer, ZW0818 – the sgraffito layer.

Sample	SiO ₂ ^a (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	CI
ZW0817	0.480	0.101	1.084	1.524	0.038	0.014	21.486	0.110
ZW0818	0.354	0.186	1.731	0.582	0.030	0.026	20.925	0.069

CI = Cementsation Index (0.3 < CI < 0.5 = weakly hydraulic, 0.5 < CI < 0.7 = moderately hydraulic, 0.7 < CI < 1.1 = highly hydraulic).

^a The percentage refers to acid soluble silica.

Table 2
TG-DTG weight losses as a function of the temperature ranges (wt.%).

Sample	<120 °C	120–200 °C	200–600 °C	>600 °C	Total
ZW0817	0.9	1.1	6.3	29.2	37.5
ZW0818	1.1	1.0	5.0	32.0	39.1

The TG/DTG/DTA patterns of both samples exhibit significant endothermic peak occurring in the region of 900 °C, associated with a major weight loss with well visible effect starting from approximately 700 °C, marked on TG/DTG curve (Figs. 11 and 12). This effect is related to dissociation of calcium carbonate, whose amount is estimated to be ca. 67% and 73% of the total weight of samples ZW0817 (the primer plaster) and ZW0818 (the sgraffito plaster), respectively. Marques et al. [24] suggest that such wide temperature decomposition interval, extended up to 950 °C, is indicative of the presence of recarbonated lime, additionally containing calcareous aggregate. However, the OM observations do not confirm the presence of the latter one, nor do they confirm the presence of the underburnt relics of limestone, used for the production of lime. Since the temperature of decomposition of calcium carbonate depends on crystal size, this suggests that at least part of the binder is perfectly crystallized. However, continuous decomposition of carbonates without steps suggests absence of sharply defined different degrees of crystallinity in the micrite [25].

DTA analysis shows a broad exothermic peak, connected with a relatively small weight loss from about 200 to 550 °C (Figs. 11 and 12), which could be attributed to combustion of organic substances [26]. Typically, hydraulic water is also released within this temperature range, but occurrence of hydraulic phases is doubtful since chemical analysis revealed the non-hydraulic character of the investigated mortars. Moreover, despite abundant organic substance (charcoal) detected within sample ZW0818 by means of OM and SEM, both layers of graffito were subjected to preservation with the use of starch, detected by means of infrared spectroscopy. Combination of these two factors provides observed exothermic effect.

The DTA analysis of both samples shows an additional endothermic peak approximately marked at 570 °C, with no corresponding weight changes, which corresponds to the $\alpha \rightarrow \beta$ quartz transformation (Figs. 11 and 12). Although the sieve fraction below 0.063 mm is considered as a binder, finest filler grains, in this particular case quartz, could be detected [10].

A weak endothermic peak occurs at 690 °C (sample ZW0817, the primer plaster). This peak also occurs with sample ZW0818

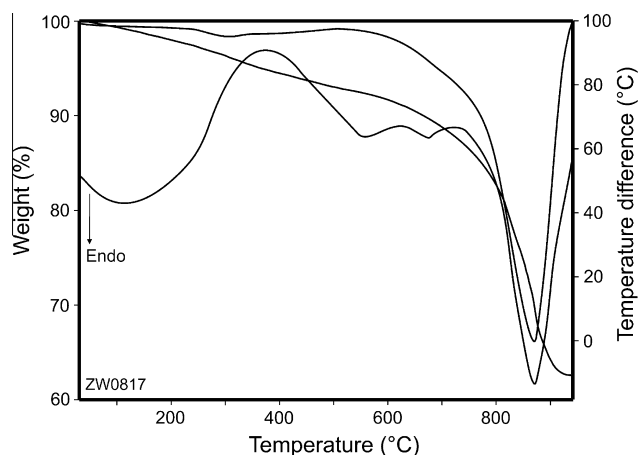


Fig. 11. DTA/TG/DTG curves of particle size fraction <0.063 mm from the primer plaster (sample ZW0817).

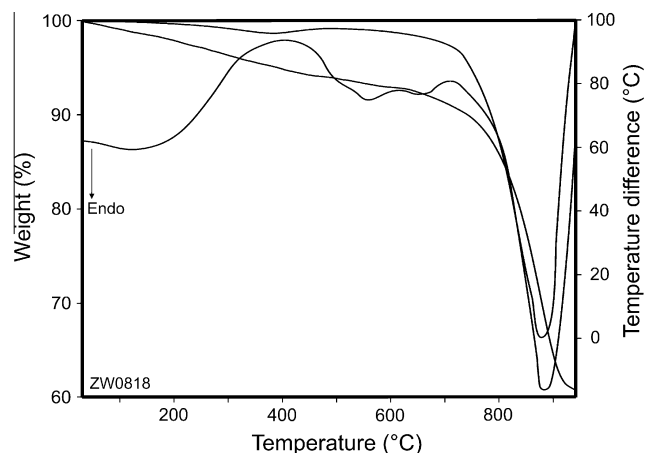


Fig. 12. DTA/TG/DTG curves of particle size fraction <0.063 mm from the sgraffito plaster (sample ZW0818).

(the sgraffito plaster), but to a lesser extent (Figs. 11 and 12). It could correspond to first endotherm for dolomite, which occurs at ca. 740 °C, however dolomite has not been detected by XRD. On the other hand, small amount of dolomite, and its poor crystallinity could restrain its recognition by means of XRD analysis. This thermal effect could result from the presence of magnesian calcite, which decomposes at around 700 °C [26]. This interpretation is consistent with chemical data, which revealed presence of MgO in acid soluble fraction of the samples.

Biotite or most likely hydrobiotite, whose presence is confirmed by OM observation as well as XRD analysis, is considered responsible for minor thermal effect, displayed as a small endothermic peak in the region of 200 °C (Figs. 11 and 12). Particularly hydrobiotite tends to loss zeolitic water and bonded water, process which undergoes in the temperature range 180–240 °C. Gypsum also decomposes below 200 °C, however no doublet at about 160 °C and 180 °C was observed, as well as significant weight loss. Although the SEM/EDAX analysis confirmed the presence of gypsum plates, this phase occurs in small quantity, below detection limit of TG/DTG/DTA as well as XRD, within samples dominated with carbonates.

4. Conclusions

A thorough study on mineralogy and the physical and mechanical properties of materials taken from historic masonry buildings is of primary importance for their future restoration. It defines the necessity to assure complete compatibility between original material and restoration mortars. In the case of the sgraffito decoration from Bożnów, we successively combined the “in situ” non-destructive examinations with successive destructive tests, to fulfill this demand. The non-destructive tests revealed that before the conservation treatment, the sgraffito decoration was exfoliated from the wall in ca. 90%. Original plasters were very fragile and extremely cracked. Most of the micrite was removed out by rainwater originated from damaged roof gutter, which mostly contributed to plasters disintegration. The shape of decoration could only be identified by differentiation between the rough surface of the scratched areas in contrast with relatively smooth parts once covered with lime paint. The acquired information, that fully documents the inner structure of the sgraffito decoration, allowed us to select the most adequate sampling areas for destructive tests.

The results of the mineralogical studies concerning the primer plaster and the sgraffito plaster lead to the conclusions that both layers results from similar production technologies. It is evidenced by comparable siliceous aggregate, showing related bimodal grain-size

distribution, and similar binder type. The primer plaster as well as the sgraffito plaster were a mixture of lime binder (aerial lime) and ordinary sand, compatible with local deposits of a material left by Pleistocene glacial meltwater streams. Additionally, the primer plaster contained small amount of brick chunks and charcoal, while the sgraffito plaster was strongly enriched in the latter. The role of charcoal was not limited to coloring agent. Porous charcoal chunks improved the permeability of the sgraffito plaster, which considerably contributed to a higher carbonation rate. The existence of hydraulic compounds was not evidenced, despite the presence of brick chunks. It is well known that the use of powdered bricks and tiles (i.e. artificial pozzolana) increases the hydraulicity of the lime mortars. However, pozzolanic effect is limited only to very finely powdered material, since it exclusively provides a large surface contact between the artificial pozzolana and lime, allowing for extensive reaction. Therefore, relatively large chunks observed within investigated mortars presumably served as aggregate, contrarily to the pozzolanic contribution. Small amounts of gypsum occur within the sgraffito plaster only. It should be regarded as a result of the reaction of atmospheric SO_x pollutant with carbonates from the top-most part of the decoration, which was directly exposed to the atmosphere. This phase also might contribute the degradation of the decoration due to the expansion during its crystallization.

The mineralogical analysis has revealed the composition, porosity, water absorption and hygroscopic properties of original plasters as well as the contents of water soluble salts. The results allow to choose the materials similar to the original ones, adequate for elimination of plaster exfoliation and resistant to the temperature and humidity changes characteristic for the climate in Poland. The non-destructive studies performed after conservation allowed to assess the efficiency of plaster consolidation as well as they prove that the rehabilitation work serves for the high efficiency of consolidation treatment by reestablishing the homogeneous structure of plasters.

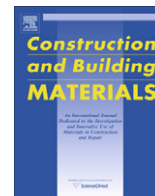
The methodology described in this paper, involving non-destructive tests combined with destructive tests, demonstrates good accuracy in renovation practices of historic masonry.

Acknowledgements

The present study was supported by Grant no. 2022/W/ING/07-4. The authors wish to thank Prof. Jacek Puziewicz (University of Wrocław) for his valuable comments.

References

- [1] Arioglu N, Acun S. A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: a staging system approach. *Build Environ* 2006;41:1223–30.
- [2] Grinzato E, Bison P, Marinetti S, Vavilov V. Nondestructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography. *Res Nondestruct Eval* 1994;5:257–74.
- [3] Rosina E, Ludwig N, Torre SD, D'Ascola S, Sotgia C, Cornale P. Thermal and hygroscopic characteristics of restored plasters with different surface textures. *Mater Eval* 1994;66:1271–8.
- [4] Daniels David J, editor. *Ground penetrating radar*. London: The Institution of Electrical Engineers; 2004.
- [5] Middendorf B, Baronio G, Callebaut K, Hughes JJ. Chemical-mineralogical and physical-mechanical investigations of old mortars. In: *Proceedings of the international RILEM-workshop "Historic mortars: characteristics and tests"*, Paisley; 2000. p. 53–61.
- [6] Elsen J. Microscopy of historic mortars—a review. *Cem Concr Res* 2006;36:1416–24.
- [7] Alvarez JI, Martín A, García Casado PJ, Navarro I, Zornoza A. Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars. *Cem Concr Res* 1999;29:1061–5.
- [8] Bakolas A, Biscontin G, Contardi V, Franceschi E, Moropoulou A, Palazzi D, et al. Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice. *Thermochim Acta* 1995;269(270):817–28.
- [9] Moropoulou A, Bakolas A, Bisbikou K. Investigation of the technology of historic mortars. *J Cult Herit* 2000;1:45–58.
- [10] Maravelaki-Kalaitzaki Bakolas A, Moropoulou A. Physico-chemical study of cretan ancient mortars. *Cem Concr Res* 2003;33:651–61.
- [11] Derric MR, Stulik D, Landry JM. *Infrared spectroscopy in conservation science*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute; 1999.
- [12] Moropoulou A, Bakolas A, Bisbikou K. Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *Thermochim Acta* 1995;269(270):779–95.
- [13] Zappia G, Sabbioni C, Pauri MG, Gobbi G. Mortar damage due to airborne sulfur compounds in a simulation chamber. *Mater Struct* 1994;27:469–73.
- [14] Martínez-Ramírez S, Puertas F, Blanco-Varela MT, Thompson GE. Studies on degradation of lime mortars in atmospheric simulation chambers. *Cem Concr Res* 1997;27:777–84.
- [15] Franzini M, Leoni L, Lezzerini M, Sartoti F. On the binder of some ancient mortars. *Mineral Petrol* 1999;67:59–69.
- [16] Zamba IC, Stamatakis MG, Cooper FA, Themelis PG, Zambas CG. Characterization of mortars used for the construction of Saithidai Heroon Podium (1st century AD) in ancient Messene, Peloponnesus, Greece. *Mater Charact* 2007;58:1229–39.
- [17] Elsen J, Brutsaert A, Deckers M, Brulet R. Microscopical study of ancient mortars from Tournai (Belgium). *Mater Charact* 2004;53:289–94.
- [18] Böke H, Çizera Ö, İpekoğlu B, Uğurlua E, Şerifakia K, Toprak G. Characteristics of lime produced from limestone containing diatoms. *Constr Build Mater* 2007;22:866–74.
- [19] Degryse P, Elsen J, Waelkens M. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation. *Cem Concr Res* 2002;32:1457–63.
- [20] Sánchez-Moral S, Luque L, Cañaveras JC, Soler V, García-Guinea J, Aparicio A. Lime pozzolana mortars in Roman catacombs: composition, structures and restoration. *Cem Concr Res* 2005;35:1555–65.
- [21] Pavia S, Caro S. An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. *Constr Build Mater* 2008;22:1807–11.
- [22] Boynton RS. *Chemistry and technology of lime and limestone*. New York: Wiley; 1980.
- [23] Mertens G, Elsen J, Brutsaert A, Deckers M, Brulet R. Physical and chemical evolution of lime mortars from Tournai (Belgium). In: *International building lime symposium*, Orlando, Florida; 2005.
- [24] Marques SF, Ribeiro RA, Silva LM, Ferreira VM, Labrincha JA. Study of rehabilitation mortars: construction of a knowledge correlation matrix. *Cem Concr Res* 2006;36:1894–902.
- [25] Alvarez JI, Navarro I, García Casado PJ. Thermal, mineralogical and chemical studies of the mortars used in the cathedral of Pamplona (Spain). *Thermochim Acta* 2000;365:177–87.
- [26] Bruno P, Calabrese D, Di Piero M, Genga A, Laganara C, Manigrassi DAP, et al. Chemical–physical and mineralogical investigation on ancient mortars from the archaeological site of Monte Sannace (Bari–Southern Italy). *Thermochim Acta* 2004;418:131–41.



Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade

José L. Lerma^{*}, Miriam Cabrelles, Cristina Portalés

Photogrammetry & Laser Scanning Research Group (GIFLE). Universidad Politécnica de Valencia. C^o de Vera s/n, Building 7i, 46022 Valencia, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 February 2009

Received in revised form 14 September 2010

Accepted 23 October 2010

Available online 31 December 2010

Keywords:

Thermography

Moisture

Principal components analysis

ABSTRACT

It is well known that the content of water does affect materials behaviour and may cause important damages to buildings, including structural deterioration. Thermography is a non-intrusive imaging technique that allows the inspection of different materials based on their surface temperatures. Within an appropriate thermal analysis, moisture and other structural damages can be detected. The present research work deals with multitemporal thermal analysis to detect moisture on buildings, as well as other alterations. Two different approaches are tested to determine the effectiveness on the moisture surveys, one simple based on image differences, and another more sophisticated based on principal components analysis (PCA). The results are tested at the front door of the Arenberg Castle (Leuven, Belgium). Some moisture maps are derived and used to determine the reliability of either the computation of image differences or the PCA to carry out semi-automatically moisture surveys on architectural façades. The latter method is proven to be superior when using thermal imagery acquired at different times.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Thermography has long been used to detect faults on electrical equipment as well as alterations on different building features such as roofs, ceilings and walls. The damages that moisture can cause to buildings are not trivial. In fact, water content in a structure and its changes of state (solid–liquid–vapour) are highly responsible for the damage of materials, supplies inside the buildings and even for the health of their occupants. According to [7], the need to repair moisture damage is secondary only to structural damage when preserving ancient building. This fact sums up the importance to detect and repair moisture.

In this sense, infrared thermography is a remote sensing non-destructive imaging technique, and represents a powerful tool for quick periodic inspections to detect moisture and other features related to temperature, including heat losses, missing or damaged thermal insulation in walls and roofs, thermal bridges or air leakage [9,2]. Much literature can be found making use of thermal imaging to perform different analysis based on buildings. There are studies focused on monitoring and conservation of ancient buildings [7,1,11], assessment of drainage systems [19], studies of thermal fluxes [6], building diagnostics and material inspection [2,4,3], thermal documentation of masonry structures [15,17], or material characterization [8,3].

^{*} Corresponding author. Address: Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, C^o de Vera s/n, Building 7i, 46022 Valencia, Spain. Tel.: +34 963877007x75532; fax: +34 963877559.

E-mail address: jlerma@cgf.upv.es (J.L. Lerma).

This study is applied to the portrait of Arenberg Castel (Fig. 1), in Heverlee, Leuven (Belgium), which forms part of the Katholieke Universiteit. This is a historical building dating back to the XV century and of great value to cultural heritage. The monitoring of its conservation state is thus necessary. The main goal of this work is to derive a map of surface moisture based on a multitemporal thermal analysis. Two digital image processing approaches based on multitemporal thermograms are introduced to detect moisture on building façades. The approaches are simple, fast and direct to map qualitatively the moisture distribution on building façades.

In Section 2, thermal principles are introduced. In Section 3, image acquisition procedure is explained, and selected thermal images are depicted. In Section 4, image processing and analysis is explained, where two methods are used in order to detect wet masses: computation of thermal image differences and derivation of principal components of multiple imagery. Finally, results of both methods are compared and discussed, and a moisture map is derived.

2. Thermal principles

There are some physical properties that need to be considered in thermographic surveys of buildings composed of different materials or structures. On the one hand, thermal properties such as conductivity, specific heat, diffusivity and effusivity. On the other hand, spectral properties such as emissivity, absorption, reflection and transmission as well as other characteristics such as porosity, volumetric mass and physiological water content [1]. These properties do condition the material behaviour and response to temperature and its change. For example, materials with low thermal

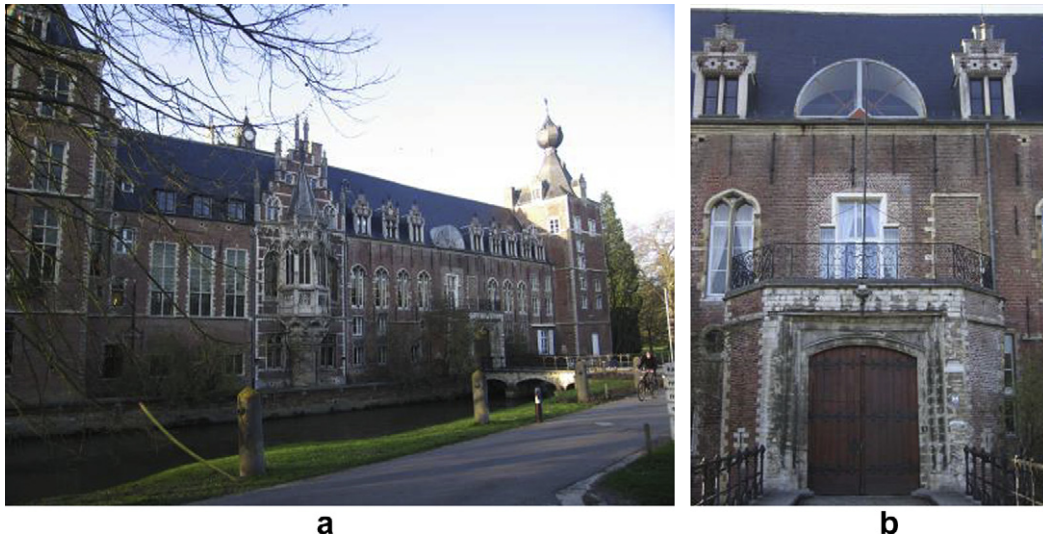


Fig. 1. Arenberg Castle, where: (a) General view and (b) Study area.

Table 1

Thermal properties of materials depicted in Fig. 1. Selected items from [1,3,10]

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)	Thermal conductivity (W/m K)	Thermal diffusivity ($\times 10^{-9}$ m ² /s)	Thermal effusivity (W s ^{1/2} /m ² K)
Red brick (RB)	2025	800	0.60	370.37	985.90
Sandstone (SS)	2150	745	2.90	1810.51	2155.24
Shale (SH)	1600	840	0.79	587.79	1030.42
Wood (WD)	500	1500	0.14	186.66	324.04
Water	1000	4193	0.59	139.76	1567.51

effusivity values increase their temperature rapidly. Substances with high thermal diffusivity adjust their temperature to that of their surroundings. Some of these properties relevant to our study area are listed in Table 1; glass and metals are not considered. Special attention will be given in this study to both thermal effusivity and thermal diffusivity, as indicators of the speed in the increase of temperature.

It is worth noticing that temperature changes are much slower in moist areas [2,1]. For example, a wet mass retains the absorbed heat for a longer period of time than a dry mass, i.e., it takes longer to radiate this heat. A wet mass needs more energy than a dry mass to raise its temperature. In fact, the density, the specific heat capacity and the thermal conductivity are altered in presence of moisture.

The study of moisture based on thermography is usually not straightforward and requires detailed analysis. Some possible error sources need to be considered [4]:

- Reflections caused by incident solar rays.
- Angle between the infrared camera and the inspected object.
- Different emissivity value of materials.
- Shading areas.
- Different material behaviour related to the colour and type of finish (bright, smooth or rough surfaces).

3. Image acquisition

To acquire the infrared thermal images, the FLIR ThermaCAM B4 camera was used. According to [4], long wave length (8–14 μ m) cameras are commonly used in thermal surveys of buildings because they are more sensitive to low temperatures (ambient and above), can detect small temperature changes and are less affected by reflections caused by solar rays. Our camera works in the

spectral electromagnetic domain of 7.5–13 μ m, has a high thermal sensitivity of 0.10 °C and produces clear noise-free infrared images with a resolution of 320 \times 240 pixels. For the purpose of measurement, its wide angle lens (field of view 41° \times 31°) was used. Although outdoor Eastern images of the Castle were acquired, in this paper focus is given to the main front door. The selected thermal images are shown in Fig. 2.

All these thermal images were acquired the same day, within air humidity around 70%. Information about temperature, acquisition time and other observations is depicted in Table 2. It has to be remarked that both thermal images 3 and 4 were acquired at night.

The multitemporal thermal analysis is based on the different thermal behaviour of wet masses compared to dry masses over time due to temperature fluctuations. Special attention was given to shading areas. Furthermore, the multitemporal pictures were acquired as orthogonally as possible to the façade in order to optimize measurements, minimize reflections and shadows.

4. Image processing and analysis

In this study, analysis of thermal imagery follows several geometric and radiometric processing in order to extract meaningful moisture plots. The steps are summarized in Fig. 3 and described in more detail in the following sections.

4.1. Preprocessing

Preprocessing of imagery was carried out in Matlab to perform both the camera calibration and the registration of different images from different cameras. First, the inner orientation parameters of the visible and the thermal cameras were derived by means of plumb-line calibration [13]. For that purpose, some straight lines

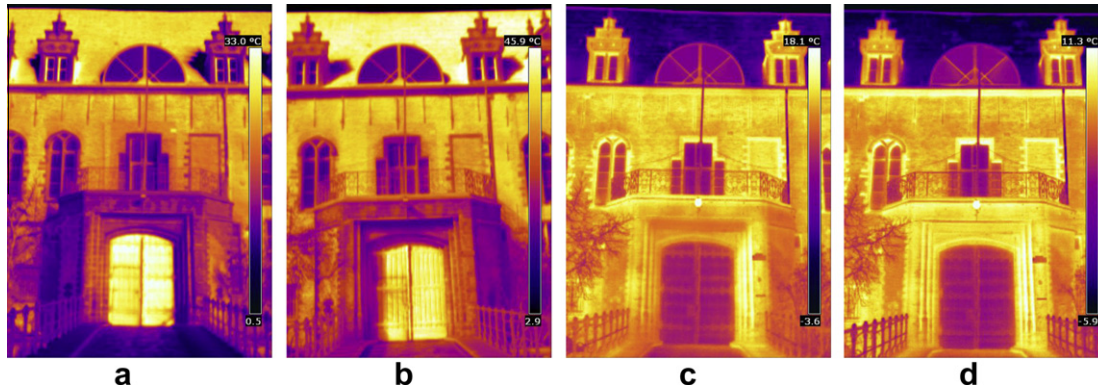


Fig. 2. Input thermal images; where: (a) IRT1, (b) IRT2, (c) IRT3 and (d) IRT4.

Table 2
Time and temperature of shots.

Thermal image	Time	Outside temp. (°C)	Observations
IRT1	09:15	8	Clear day
IRT2	13:55	14	Clear day, sunshine
IRT3	19:45	9	Dark night
IRT4	23:15	6	Dark night

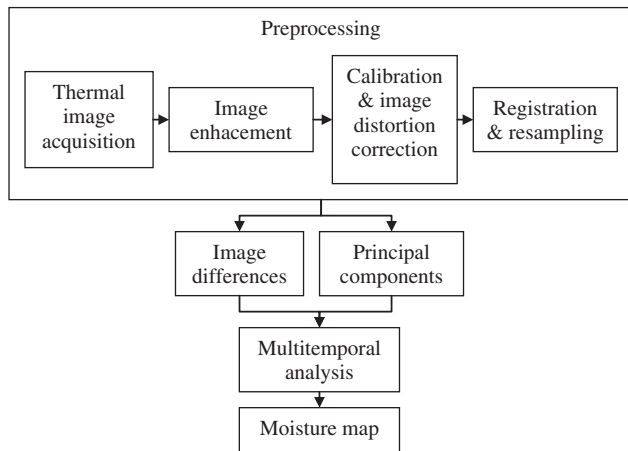


Fig. 3. Steps followed to perform the multitemporal analysis with thermal imagery.

on the images were measured to determine the radial lens distortion parameters for each camera, the visible and the thermal infrared [14]. In second place, the set of visible and thermal images

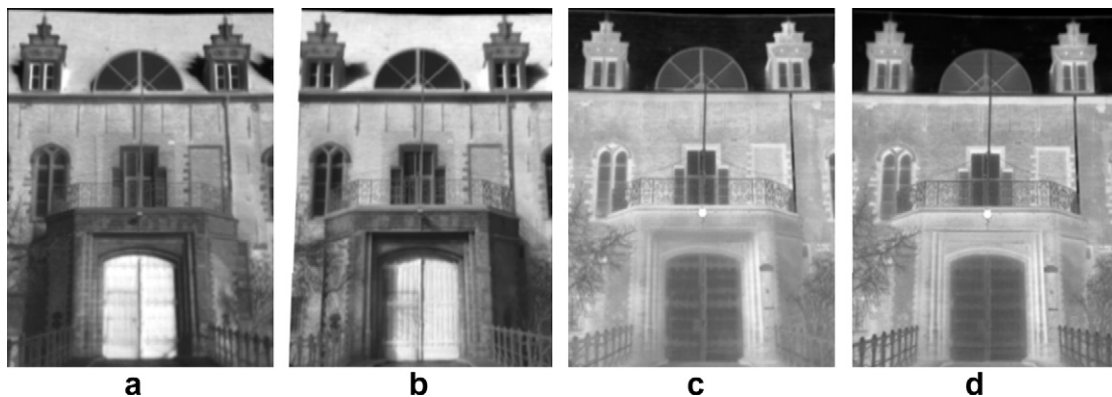


Fig. 4. Output thermal images after lens distortion correction and registration.

were registered together, the thermal images over the high resolution visible image, in order to correct the different perspective image geometries originated from the close positions and orientations of the two cameras during the image acquisition on site. For the registration process, we used a two-dimensional projective transformation with nearest neighbourhood resampling to preserve the purity of the digital levels. The process of correcting both the radial lens distortion effect and the perspective distortion effect on flat surfaces allows users to get distortion-free imagery, ready to be merged together.

Finally, after registration, the five images -one visible (Fig. 1-b) and four thermal (Fig. 2) were merged into one single image with seven bands, three visible and four thermal infrared. However, for the purpose of this study, moisture analysis was only performed with the four thermal bands (Fig. 4). Additionally, it has to be pointed that most of the image processing software offers the possibility to create mosaics. Thus, this technique can also be extended and applied to texture high and large buildings, whether they are situated in narrow streets or not. The only restriction would be to acquire enough images that cover the whole façade.

In the following sections the two different techniques used to find out moisture presence on the façade are presented: on the one hand, a simple method based on the computation of image differences (Section 4.2) and, on the other hand, a method based on principal component analysis (Section 4.3). Additionally, an analysis on closed-up details is presented (Section 4.4) with the consideration of both methods.

4.2. Computation of image differences

Image differences are achieved via a simple procedure computing the temperature differences of two images pixel by pixel.

In Fig. 5 an example is shown, considering thermal image 2 minus thermal image 4. As depicted in Table 2, these images correspond to the maximum and minimum temperatures, respectively, of the four shots. Therefore, the resulting image can be interpreted as a cooling map of the study area. Considering the distinct materials, we can observe that inside each material different temperature differences are registered, i.e., a single material shows different cooling velocities. This can be due to different sources, as for instance shadows in image 2 (as image 4 was acquired at night), heat sources, moisture, etc. Generally speaking, we can say that moisture would be located on those

areas that represent lower temperature increments inside each material, which are:

- Sandstone: black or violet colour.
- Red brick: green or yellow colour.
- Shale: pink colour.

Making a closer inspection, we can discern shadow areas (which are marked in Fig. 5b) and other possible error sources (as vegetation). Moisture analysis should be carried out after elimination of those areas.

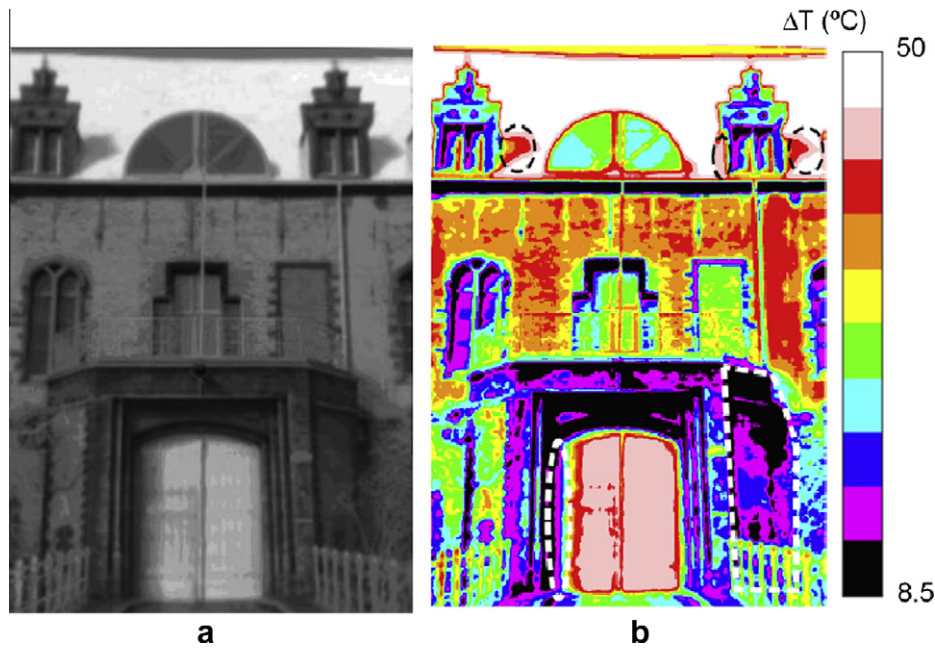


Fig. 5. Image differences, where: (a) thermal image 2 minus thermal image 4 and (b) image 5-a equalized and indexed in 10 levels, representing a temperature increment of 4.15 °C per level. Five noise areas are marked in case 5-b due to shadows, three on the roof (marked in black) and two to both sides of the door (marked in white). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

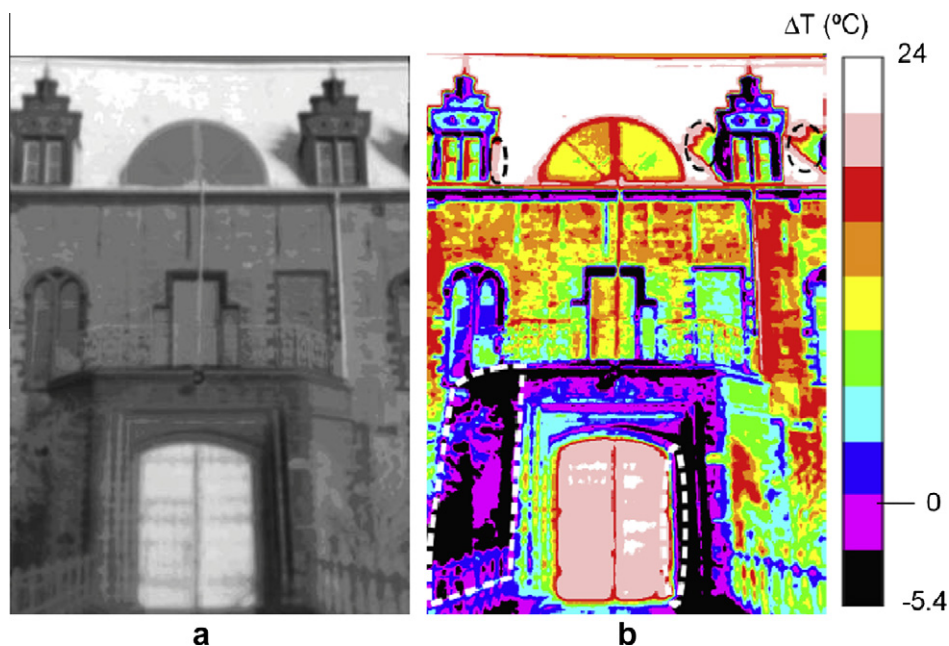


Fig. 6. Image differences, where: (a) thermal image 1 minus thermal image 3 and (b) image 6a equalized and indexed in 10 levels, representing a temperature increment of 2.94 °C per level. Five noise areas due to shadows are marked in case 6b, three on the roof (marked in black) and two to both sides of the door (marked in white). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

On the other hand, it is relevant to analyse the hours at which the input images are taken. For example, in Fig. 6 the considered thermal images to calculate the temperature differences are thermal images 1 and 3 (thermal image 1 minus thermal image 3). As it can be seen, some areas are cooled (temperature increments above zero) whereas others are warmed up (temperature increments below zero). This is due to the fact that between images 1 and 3 there has been an increment and decrement of ambient temperature, and thus materials are first warmed up and after cooled down. Some of them are cooled faster than others, resulting in a more confusing map. Despite this inconvenience, this resulting map (Fig. 6b) could be used to inspect areas that were affected by shadows in Fig. 5b. In fact, error areas in Fig. 6b due to shadows are to the opposite side with respect to Fig. 5b (see for instance the left and right sides of the door in both figures).

4.3. Principal components analysis (PCA)

In order to corroborate and/or compare the outcomes delivered by the computation of image differences, a more sophisticated method was performed based on PCA. This method is commonly used in the field of remote sensing, and many works can be found related to its use, as in [12,16]. It consists in transforming an original set of variables in another set of orthogonal variables or components uncorrelated with each other, obtained by linear combination of the above, so that the first generated component explains the maximum of the total variability, while the rest of the resulting orthogonal components are ordered based on the variation in the data set. In general terms, principal components of an image are obtained according to [18,5]:

$$PC_j = \sum_{i=1,p} a_{ij} DL_i + R_j \quad (1)$$

where PC_j indicate the DL (digital level of each pixel) correspondent to the j principal component, a_{ij} the coefficient applied to the DL correspondent to the band i to generate the j component, and R_j is a constant introduced to avoid negative values.

In our study, a total of four components are considered (Fig. 7). The first principal component (PC1) represents the set of features that evolve regularly with the time of acquisition, which can be indicative of dry masses, areas with high insolation values and/or materials with low effusivity values. As it can be seen, the features that suffer the greatest temperature variations (the roof and the door) appear in white colour. The PC2 and PC3 show features with uneven evolution over time but with smaller temperature differences among images, which can be indicative of areas that have moisture, areas in shade or materials with low emissivity such as

metals. Last but not least, the PC4 shows noisy areas due to different factors, such as sensor noise, different atmospheric conditions during acquisition, image compression artefacts and inaccuracies in the registration of the image set. Additionally, PC4 reflects different plasters, features, hidden cracks and discontinuities as well as other alterations of the state of the building that are out of the scope of this paper. Particularly interesting is the variety of response across the roof where individual slates and/or alterations are visible.

After an analysis of the information given by the computed PCs, the PC2 was selected for two reasons: first, it stands out areas with less temperature variability, indicating possible moisture areas; secondly, it is not so much affected by shading areas which are considered as source errors (recall Section 2). Therefore, this image was equalized and further indexed in 10 levels (Fig. 8) in order to better identify the interest areas. In general terms, moist areas could be identified as those that appear within purple to red colours (Fig. 8b), which are indicative of less temperature variability, thus being candidates to contain a certain amount of water. Nevertheless, in some cases, it is indicative of a change of material.

4.4. Analysis on closed-up details

In this section, a closer visual inspection is made into two small areas of the front door (Fig. 9). Intentionally, both selected areas do show moisture in the visible image in order to inspect how good the methods might be able to detect them. Figs. 10–12 show the obtained results after applying both methods.

Computation of image differences IRT2-IRT4 is displayed in Fig. 10. The lower temperature increments (corresponding to black and violet colours, in this order) are not well fitted to moisture. Instead, moisture seems to be represented better by blue colours in some areas, and even with violet or black colours in others. Therefore, the computation of image differences might mislead interpretations. This fact can be observed for both D1 and D2.

In Fig. 11 similar unsatisfactory results are obtained computing the differences between IRT1-IRT3. In the case of D1, blue colour seems to fit quite well to the moisture areas, though is not able to represent all moist areas. In the case of D2, moisture areas are better detected by black colour.

On the other hand, after PCA (Fig. 12), moisture is well represented by lower to mean values, corresponding in this case to violet and pink colours. This is true for both D1 and D2.

Comparing both methods, it can be stated that:

- In the method based on the computation of image differences, the selected input images should have significant temperature

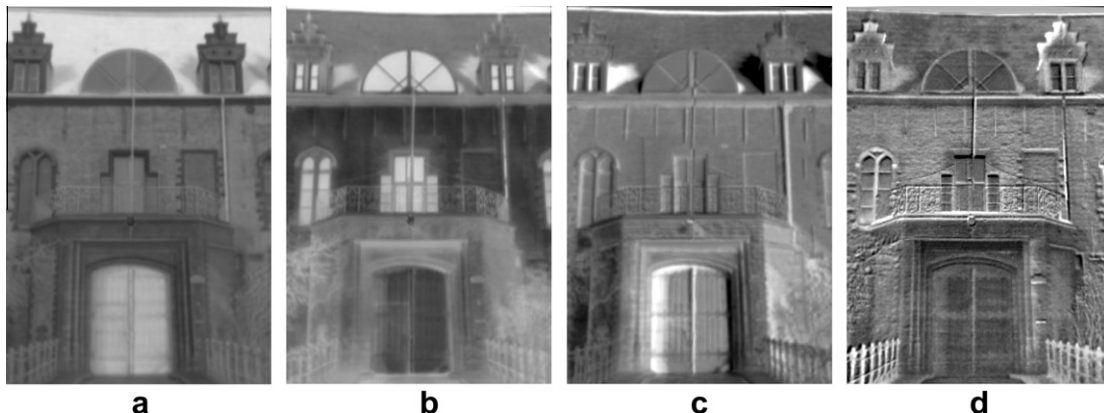


Fig. 7. Principal components, where: (a) first principal component (PC1), (b) second principal component (PC2), (c) third principal component (PC3) and (d) fourth principal component (PC4).

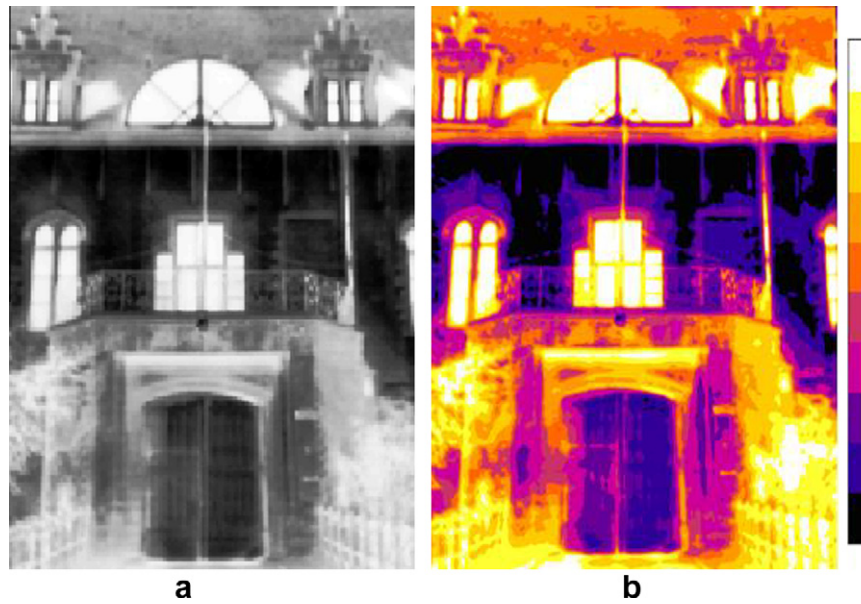


Fig. 8. Second PC, where: (a) equalized image and (b) image equalized and indexed in 10 levels.



Fig. 9. Details of the study area, where: (a) Detail 1 (D1), corresponding to the left upper side of the front door and (b) Detail 2 (D2), corresponding to the middle right side of the front door.

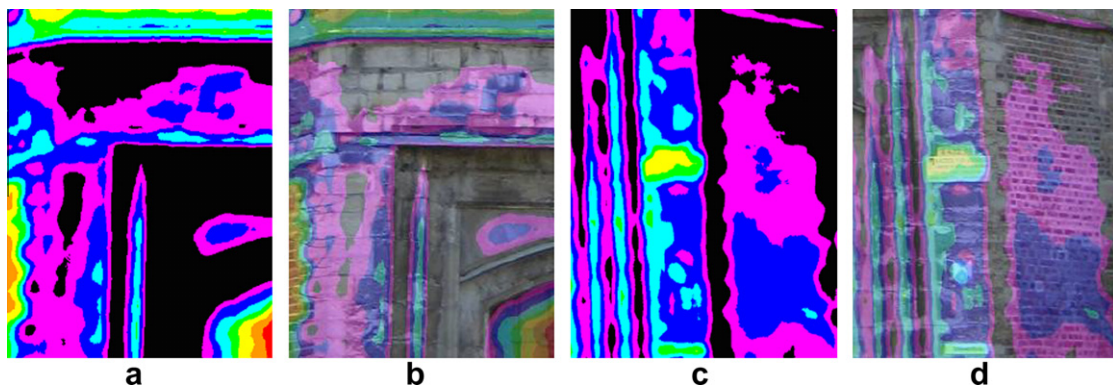


Fig. 10. Details of the image differences IRT2-IRT4, where: (a) and (c) show the computed differences in D1 and D2, respectively, (b) and (d) show the differences blended with the visible image.

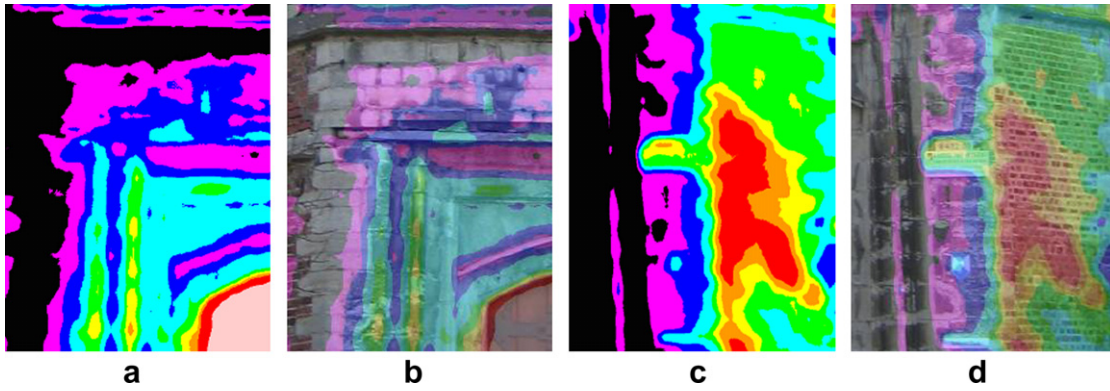


Fig. 11. Details of image differences (IRT1-IRT3), where: (a) and (c) show the computed differences in D1 and D2, respectively, (b) and (d) show the differences blended with the visible image.

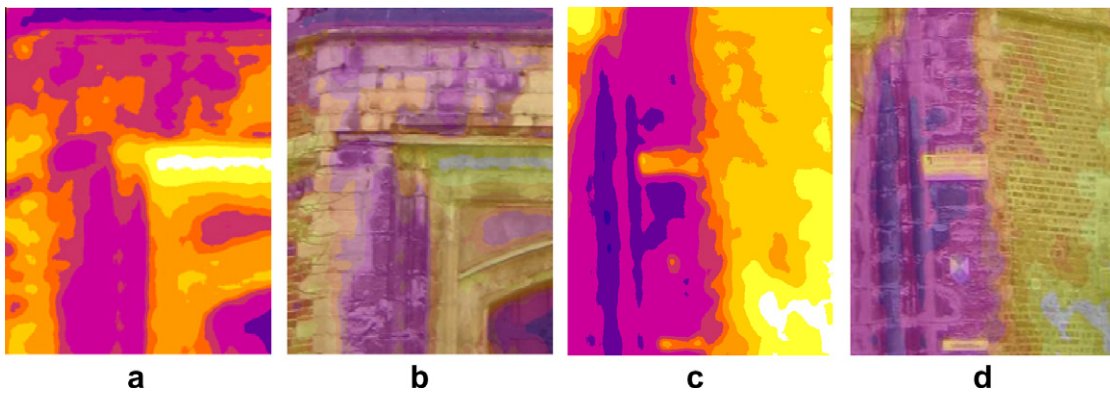


Fig. 12. Details of PCA, where: (a) and (c) show a map of PC2 in D1 and D2, respectively, (b) and (d) show the map of PC2 blended with the visible image.

differences in order to reflect satisfactory increments or decrements of temperature. Otherwise, interpretation and analysis are difficult.

- Shadows disturb the computation of image differences, whereas are filtered in the PCA method.
- Moisture on roof is only detected by the PCA method.

Thus, PCA was selected in order to build up a moisture map of the front door area. After having in consideration the results achieved and taking away non-interesting areas such as windows or iron rails, a map of moisture has been derived, which is shown superimposed to the original RGB image in Fig. 13.

Once the moist areas are identified, lectures at selected sample points (depicted in Fig. 13) can be made onto the original thermal images, in order to discern temperatures between dry and moist masses, considering the different materials. This step is essential to corroborate the reliability of the methods. The lectures are shown in Table 3. The most important temperature fluctuations are observed for slate ($\Delta T = 44.1^\circ\text{C}$ in moist areas and $\Delta T = 48.4^\circ\text{C}$ in dry areas) corresponding to the roof, and for wood ($\Delta T = 33.9^\circ\text{C}$ in moist areas and $\Delta T = 39.8^\circ\text{C}$ in dry areas), corresponding to the door. On the other hand, the less temperature differences are observed for red brick ($\Delta T = 20.3^\circ\text{C}$ in moist areas and $\Delta T = 28.3^\circ\text{C}$ in dry areas) and sandstone ($\Delta T = 13.0^\circ\text{C}$ in moist



Fig. 13. Identified moist areas superimposed to the RGB image. Sample points are depicted as squared (dry areas) or crossed circles (moist areas). Naming corresponds to the considered material.

Table 3
Temperature values ($^\circ\text{C}$) registered on each thermal image.

Material	IRT1		IRT2		IRT3		IRT4	
	Dry	Moist	Dry	Moist	Dry	Moist	Dry	Moist
RB	25.0	19.8	35.4	28.5	12.8	13.0	7.1	8.2
SS	15.7	12.5	26.8	22.5	13.4	14.3	8.0	9.5
SH	27.3	26.4	44.0	42.6	1.7	3.5	-4.4	-1.5
WD	30.8	27.9	43.3	37.4	9.4	9.4	3.5	3.5

areas and $\Delta T = 18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ in dry areas). Recalling Table 1, we can see that sandstone has higher effusivity value than red brick, thus its thermal variability is lower. Although shale has similar effusivity value than red brick, its registered temperatures increments are quite different. This fact can be explained due to reflections over the roof. The following general lines are corroborated:

- Moist masses are cooler than dry masses in the morning (image 1).
- During the day, moist masses increment their temperature, but slower than dry masses (compare image 1 with image 2).
- In the evening, moist masses are slower cooled down than dry masses (compare image 2 with image 3).
- Moist masses are warmer or have similar temperature values than dry masses at night (image 4).
- Temperature fluctuations are more exaggerated in dry areas.

5. Conclusions

This paper presents an approach based on multitemporal thermal imagery to detect moisture on building façades owing the special behaviour of wet masses. Two digital image processing approaches based on multitemporal thermograms are analysed. The reliability of the PCA is proven to be superior to the computation of image differences mainly because it is less sensitive to shadows and image noise. Indeed, moisture areas were only detected by the PCA despite is longer processing time. Furthermore, PCA eases the extraction of information on different targets based on thermal and spectral features hard to determine beforehand, keeping the integrity of the data set. It guarantees that the data set will have enough thermal variance to successfully determine alterations, mainly with two principal components, namely the second and the last one.

The presented approach with multitemporal images can be successfully used to help building technicians to determine areas affected by moisture. Despite the need of taking multiple pictures distributed preferably over a period of 24 h, it allows technicians to yield detailed moisture maps with reliable data on large building façades. However, this semi-automatic processing requires knowledge of the building materials and structures to avoid false analysis. This building diagnosis technique does not replace any other additional tools such as moisture meters but complements and helps to survey large areas applying remote sensing techniques.

6. Further work

The idea of working with a bunch of thermal imagery acquired at different times could also be very valuable to deep thermographic analysis not only to detect moisture but to study other kind of alterations such as detachments, leaks and replacements. In this sense, it will be interesting to check the performance of the presented approach to identify in general building pathologies in collaboration with architects and building experts.

For certain works, it could also be valuable to have an indication of the amount of water retained in certain materials. Further research will follow to check correlations with known moisture contents.


Acknowledgement

Authors would like to thank Dr. Mario Santana, coordinator of the Leonardo da Vinci 3DRiskMapping Project, for the invitation to give a lecture on thermography at the Raymond Lemaire International Center for Conservation, Arenberg Castle, Heverlee, Belgium.

References

- [1] Avdelidis NP, Moropoulou A. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *J Cultural Heritage* 2004;5(1):119–27.
- [2] Balaras CA, Argiriou AA. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy Build* 2002;34(2):171–83.
- [3] Barreira E, de Freitas VP. Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construct Build Mater* 2007;21(1):218–24.
- [4] Cañas Guerrero I, Martín Ocaña S, González Requena I. Thermal–physical aspects of materials used for the construction of rural buildings in Soria (Spain). *Construct Build Mater* 2005;19(3):197–211.
- [5] Chuvieco Salinero E. *Teledetección ambiental*. Barcelona: Ariel; 2002. 586 p.
- [6] Datcu S, Ibos L, Candau Y, Mattei S. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography. *Infrared Phys Technol* 2005;46(6):451–67.
- [7] Grinzato E, Bison PG, Marinetti S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *J Cultural Heritage* 2002;3(1):21–9.
- [8] Grinzato E, Marinetti S, Bison PG, Concas M, Fais S. Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones. *Infrared Phys Technol* 2004;46(1–2):63–8.
- [9] Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy Build* 1998;29(1):1–9.
- [10] Incropera FP, De Witt DP. *Fundamentos de transferencia de calor*. 4th ed. México: Prentice Hall; 1999. p. 912.
- [11] Kandemir-Yucel A, Tavukcuoglu A, Caner-Saltik EN. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. *Infrared Phys Technol* 2007;49(3):243–8.
- [12] Koutsias N, Mallinis G, Karteris M. A forward/backward principal component analysis of Landsat-7 ETM+ data to enhance the spectral signal of burnt surfaces. *ISPRS J Photogrammetry Remote Sensing* 2009;64(1):37–46.
- [13] Lerma JL, Cabrelles M. A review and analyses of plumb-line calibration. *Photogrammetric Record* 2007;22(118):135–50.
- [14] Lerma JL, Cabrelles M, García-Asenjo L, Hernández D. Lens distortion correction and registration of visible and thermal infrared imagery. In: *InfraMation 2007 proceedings*, vol. 8, ITC 121A 2007-05-24; 2007. p. 479–83.
- [15] Lerma JL, Mileto C, Vegas F, Cabrelles M. Visible and thermal 405 IR documentation of a masonry brickwork building. In: *CIPA XXI international symposium, international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Athens, Greece*, vol. XXXVI-5/C53; 2007. p. 456–9.
- [16] Meng Q, Cieszewski C, Madden M. Large area forest inventory using Landsat ETM+: A geostatistical approach. *ISPRS J Photogrammetry Remote Sensing* 2009;64(1):27–36.
- [17] Meola C. Infrared thermography of masonry structures. *Infrared Phys Technol* 2007;49(3):228–33.
- [18] Schowengerdt R. *Remote sensing: models and methods for image processing*. San Diego: Academic Press; 1997. p. 522.
- [19] Tavukcuoglu A, Duzgunes A, Demirci S, Caner-Saltik EN. The assessment of a roof drainage system for an historical building. *Build Environ* 2007;42(7):2699–709.



Available online at

 www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

 www.em-consulte.com



Original article

Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy)

Sebastiano Imposa*

Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi di Catania, Corso Italia, 57, 95129 Catania, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 February 2009

Accepted 16 April 2009

Available online 19 March 2010

Keywords:

Infrared thermography

Georadar

Pitti Palace

Florence

Italy

ABSTRACT

Two noninvasive geophysical techniques, infrared thermography and georadar, were used in this study to investigate the internal walls of the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Pitti Palace, in Florence. The aim of this work was to verify that the original architectonic setting of this Hall was as reported in a planimetry of anonymous author dated late 1700. This document shows that the “Sala delle Nicchie” was characterized at that time by 10 niches instead of the six that are visible today. Both the infrared thermography and georadar surveys confirmed the presence and location of the niches as indicated in the planimetry. This study results prove the importance and benefit of using nondestructive techniques in sites of artistic and historical interest.

© 2010 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

The Pitti Palace sits south of the Arno River and is the most monumental among the Renaissance buildings of Florence (Fig. 1). This palace, designed by Filippo Brunelleschi around 1440, was begun in 1458 by order of Luca Pitti, a merchant friend of the Medici's. In 1549 it was purchased by Cosimo I de' Medici, the Duke of Tuscany, and thereafter became property of the rulers of the city of Florence that collected here paintings, jewellery and their valuable possessions. The central part of the Pitti Palace was formerly used as a residence of the Italian royal family. The palace with its content was donated to the Italian people by Vittorio Emanuele III in 1919 and opened to the public as one of Florence's largest art galleries. Today it houses the famous Pitti Gallery, which contains many of the masterpieces of Raphael, and the Palatine Gallery, with more than 1000 paintings by the Europe's greatest artists, the Royal Apartments and the Porcelain Museum.

The aim of the present work was to reconstruct the original setting of the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall), the most ancient room of the Palace (Fig. 1), as it was realized by the architect Bartolomeo Ammannati between 1561 and 1562. In particular, this work was focused on locating four niches that were presumably walled and covered with decorated wooden hangings after a partial remaking by Giuseppe Terreni in 1793 and several following interventions.

Historical notes refer that 10 niches were initially present in the Hall, but no indication is given about their position. The finding of a planimetry dated late 1700, of anonymous author, has confirmed the original presence of 10 niches located as in Fig. 2. However, the niches position is different from that currently hypothesized. The present paper reports the results of a geophysical survey performed in February 2002 to test the reliability of the planimetry. Since the “Sala delle Nicchie” is part of the Palatine Gallery, and valuable paintings are permanently exposed, it was necessary to use nondestructive techniques, such as infrared thermography and georadar. Moreover, these techniques are the only ones that could be applied to investigate decorated walls where it is not possible to make direct sampling or contact tests.

2. Infrared thermography survey

Among the nondestructive techniques, the infrared (IR) thermography represents a valuable tool for the investigation of architectonic structures and has had a wide application in the field of cultural heritage also for the possibility of investigating large areas in short times [1–6].

This technique is based on the property that each body spontaneously emits infrared electromagnetic radiation when it reaches a given temperature. Measurements are carried out by heating the target and recording the infrared radiation emitted during its cooling [4].

The IR thermographic technique can be also used to investigate the structure and composition of walls, by detecting the different inertial thermal behavior of materials within the first centimetre. The surface temperature of a wall is influenced by the internal heat propagation, that in turn is influenced by

* Tel.: +33 39 95 71 95 70 1.

E-mail address: imposa@unict.it.



Fig. 1. Map showing the location of the Pitti Palace, in Florence, and the “Sala delle Nicchie”.

environmental conditions. A variation of such conditions, either natural or artificially induced, causes a thermal disequilibrium that can be easily visualized through the infrared thermography.

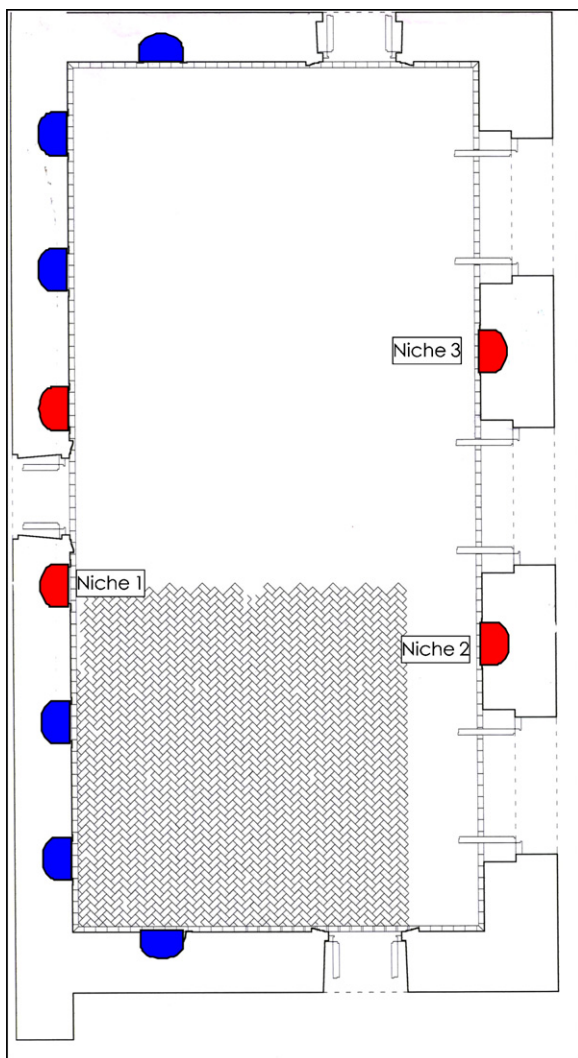


Fig. 2. Planimetry of the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall). In this document, dated late 1700, the hypothesized walled niches are shown in red.

In the present study a digital IR thermocamera was used to detect and quantify any variation of temperature between different portions of the study surface under the same conditions (radiation properties, environmental conditions), in terms of relative and absolute values. Inside the “Sala delle Nicchie” temperature ($T_{\text{average}} = 16.3^{\circ}\text{C}$) and relative humidity ($RU_{\text{average}} = 58.9\%$) were continuously monitored during the survey using a digital thermohygrometer [7]. Both temperature and RH resulted to be optimal and quite stable, as shown in Fig. 3.

The thermocamera was placed on a tripod to limit as much as possible distortions or overlapping effects that could be difficult to filter out during the processing. Thermographic data were acquired along parallel tracks using photograms with a fixed size, digitized in a 12-bit mode and stored in a removable internal hard-disk. Measurements were referred to the same temperature scale. A videocamera was mounted over the thermocamera (Fig. 4) to record the same images in the visible field. Particular attention was paid to match the field of observation of the two cameras.

Data analysis and processing was done using a software that reconstructs the 2D distribution of temperature and produces in real time a thermic map of the surface. To reduce as much as possible the drawback caused by our presence and intervention inside the “Sala delle Nicchie”, the IR thermographic survey was limited to niches # 1, 2 and 3 of Fig. 2 that were more easily accessible.

The heating of the target walls was achieved using two halogen lamps located at about 1.5 m from the target. The amount of heating was limited to prevent the damaging of the paintings exposed nearby (Fig. 4). Nevertheless, the thermograms of Figs. 5–7 show clearly a marked variation in the texture of the wall due to the different emission property of the materials. These observations made possible to unambiguously detect and locate the three niches beyond the wooden hangings.

3. Georadar survey

As a support and test of the infrared thermography results, the wall hosting the niche # 1 was also investigated using the georadar technique.

The georadar (also called GPR) is one of the most suitable geophysical methodologies in the field of nondestructive investigations. This method has been developed for shallow and high-resolution investigations and is commonly used for archaeological prospecting [8–10].

It uses high-frequency electromagnetic waves (generally 25 MHz to 2.0 GHz) transmitted into the investigated medium through an antenna that is moved over the studied area along lines.

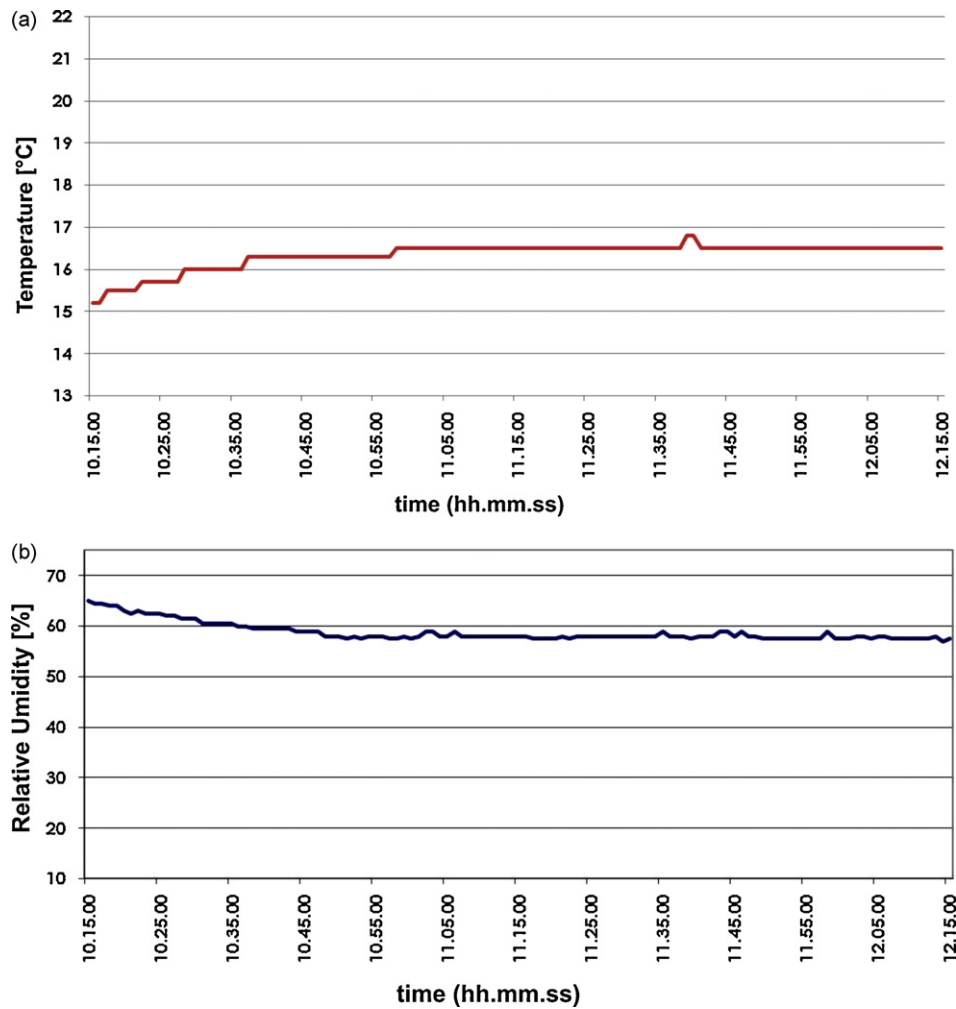


Fig. 3. Trend of (a) temperature and (b) relative humidity (RU) monitored inside the Sala delle Nicchie during the infrared thermography survey.

A receiving antenna records the energy partially reflected back to surface by any discontinuity between materials with different electric properties. The highest the frequency of the transmitted energy/antenna, the highest the resolution (lowest penetration depth) of the survey [11,12].

The output of a georadar survey is a section underlying the acquisition direction, called radargram, where the GPR data are displayed as a series of waveforms. The radargram shows the distance

travelled by the antenna along the x-axis and the two-way travel time along the y-axis.

In this work we used the GPR system High Resolution Radar array Equipment for Structural Surveys (HIRESS) composed of an array of four antennas working at 1.6 Ghz. The array has a length of 45 cm (Fig. 8) and was configured to acquire simultaneously seven radar channels, four monostatic and three bistatic. This improves the quality and amount of information and can provide additional



Fig. 4. Pictures of the infrared thermographic survey inside the "Sala delle Nicchie".

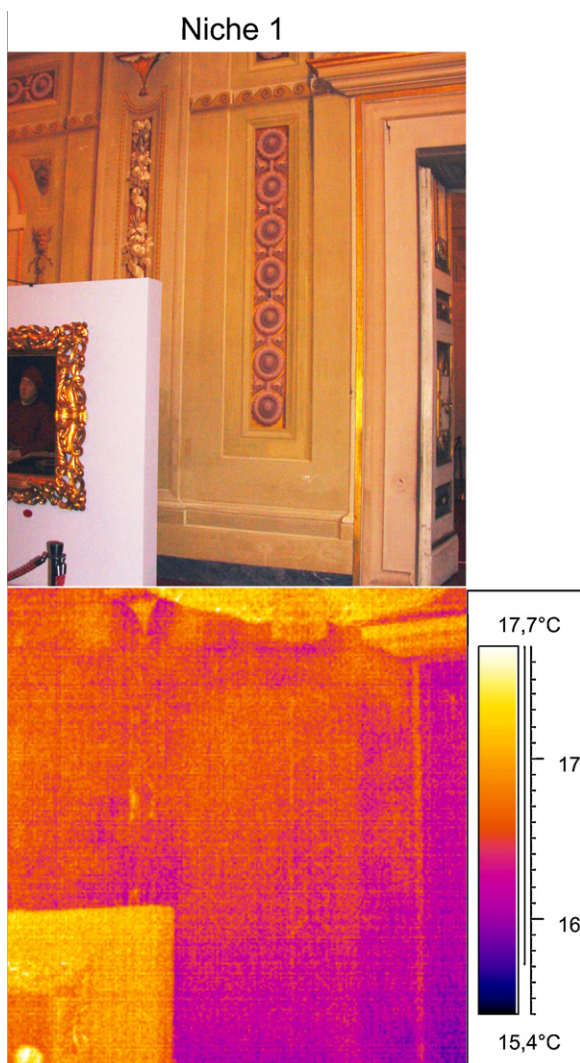


Fig. 5. Hypothesized location of Niche 1 (top) and corresponding infrared thermographic image (bottom).

performances, not used here, such as the tomographic imaging of the subsurface.

The array is connected to the acquisition system RIS2K/MF, composed by a processing unit (HP Workstation, software IDSGRED V.5.2) and a CAD unit (PC Pentium III, software Autocad 2000) for the graphic display of the data. The two units work interactively in real time.

A major aspect in the application of the GPR technique concerns the calibration of the signal that allows the time-to-depth conversion of the radargram, necessary to spatially locate the target object/surface. With multi-antenna instruments like the one used in this work it is possible to calibrate the GPR signal starting from the travel time due to a vertical reflection within the medium (when the antenna is steady) and the travel times recorded when the antenna is moved along a given direction. This procedure makes possible to compute an average propagation velocity within the medium through the relation:

$$v = \frac{x}{\sqrt{(t_x^2 - t_d^2)}}$$

where x is the distance between the antennas, that is constant in the multi-antenna configuration, and d is the depth of the reflector.

With respect to an ideal grid of longitudinal and transversal tracks with the origin point located near the doorpost, ~ 60 cm

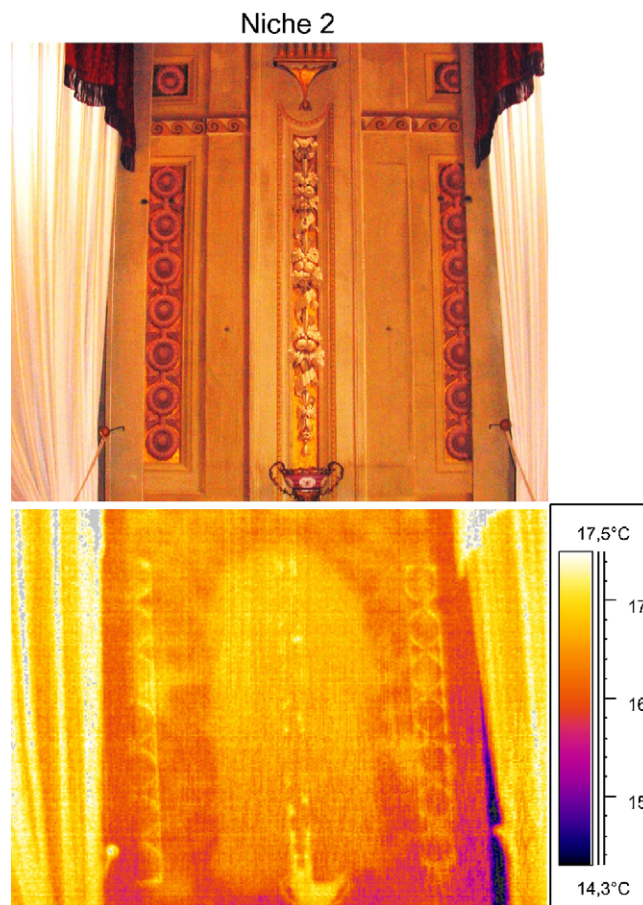


Fig. 6. Hypothesized location of Niche 2 (top) and corresponding infrared thermographic image (bottom).

above the floor (Fig. 9a), our survey was limited to the acquisition of the lowermost transversal profile. A plastic panel was applied over the wall to protect the hanging decorations from the passing of the antenna. The related radargram, shown in Fig. 9b, has confirmed the location of the niche # 1 that is evidenced by a sharp variation of dielectric properties between the different portions of the wall. In this specific case, it is due to the infilling of the niche with a material that is different from that of the perimetral walls. The depth of the interface between the niche's infilling and the pre-existing wall with respect to the present-day wooden covering, is about 45 cm (Fig. 9b).

4. Conclusions

The application of two nondestructive techniques, infrared thermography and georadar, inside the "Sala delle Nicchie" of the Pitti Palace allowed to confirm the presence of niches dating back to the second half of 1500, walled and covered during following interventions. The aim of the present work was to verify the niches location as indicated in a planimetry dated late 1700.

The extent of the survey was limited by the presence of precious paintings exposed in the Hall, as part of the Palatine Gallery, and of the valuable wooden decorations of its internal walls. Nonetheless, the infrared thermograms unambiguously show the inhomogeneous distribution of temperature due to the presence of the niches walled beyond the wooden hanging. The thermograms were simultaneously acquired in the visible field and this allowed to precisely locate the niches and confirm their position as indicated in the planimetry.

Niche 3

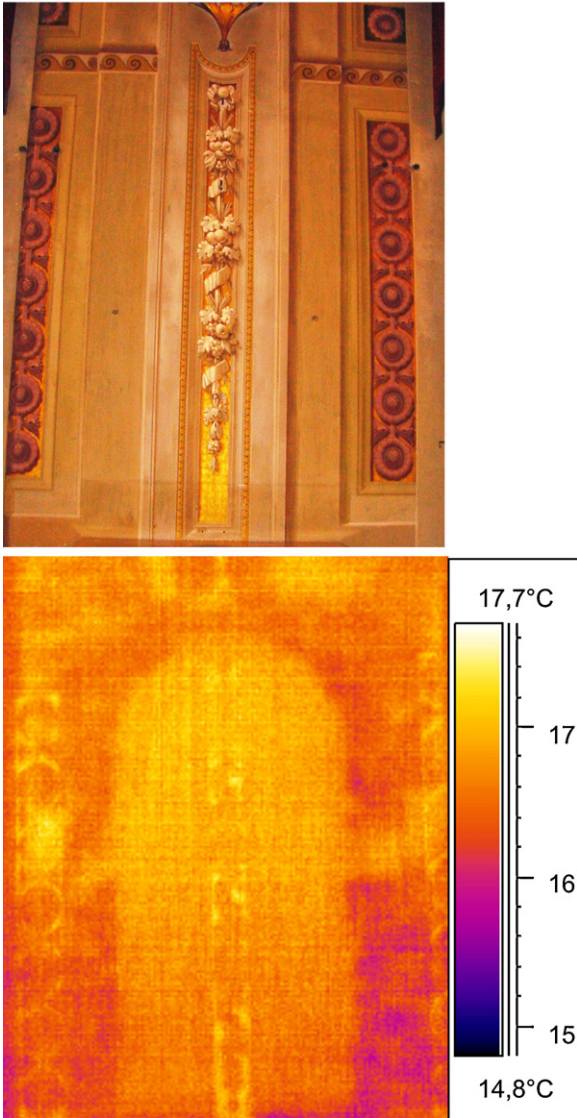


Fig. 7. Hypothesized location of Niche 3 (top) and corresponding infrared thermographic image (bottom).



Fig. 8. Georadar survey performed inside the “Sala delle Nicchie” using the HIRESS system.

The georadar survey performed on one of the walled niches imaged the interface between materials with different dielectric constants that is interpreted as the interface between the infilling of the niche and the preexisting wall hosting the niche itself.

The present results point out the important contribution of the combined use of nondestructive geophysical techniques in this kind of studies, where the faster IR thermography method, that also allows an easier acquisition and interpretation of the data, has provided a first, still effective, mapping of the targets that was tested and completed by an in-depth GPR survey.

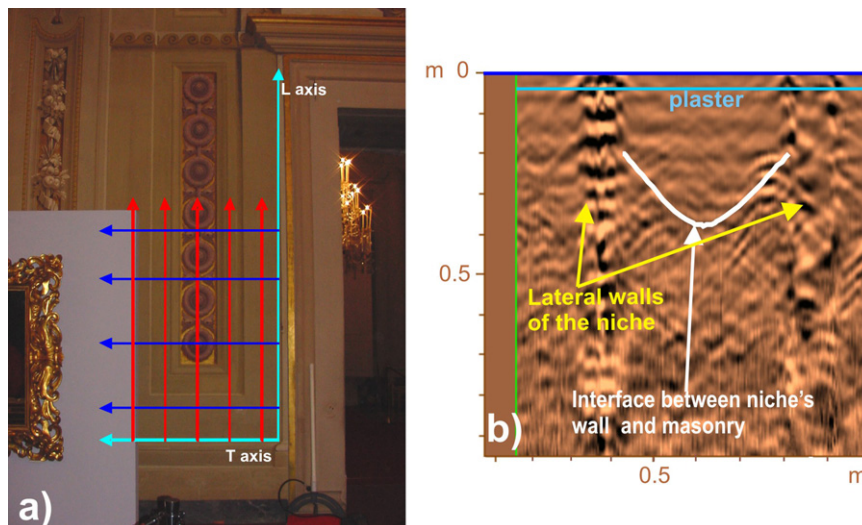


Fig. 9. (a) Virtual grid used for the georadar scanning of the wall containing the niche # 1; (b) radargram of the niche # 1 corresponding to the bottom transversal profile.

Acknowledgements

The author thanks Dr. Fauzia Farneti of the University of Florence for her valuable collaboration during the survey and the reviewers for the helpful comments. This research was performed with the financial support of the University of Catania (PRA-2006, no. 20104001001 - (responsible scientist: S. Imposa).

References

- [1] E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti, Monitoring of ancient buildings by the thermal method, *J. Cult. Herit.* 3 (2002) 21–29.
- [2] G. Mannara, *La termografia computerizzata nell'analisi di strutture di interesse artistico*, 6° Congresso Nazionale delle Prove non Distruttive, Milano, 1990.
- [3] M. Milazzo, N. Ludwig, *La termografia nella diagnostica delle strutture architettoniche*, in "Castra ipsa possunt et debent reparari". Indagini conoscitive e metodologie di restauro delle strutture castellane normanno-sveve. Atti del Convegno Internazionale di Studio, IISF-CNR, I, Roma, De Luca, 1998.
- [4] S. G. Burnay, T. L. Williams, C. H. Jones, *Applications of Thermal Imaging*. Bristol; Philadelphia: Adam Hilger, 1988. xiv, 248 p. ISBN: 0852744218.
- [5] N. Ludwig, M. Milazzo, *La termovisione I.R. nelle indagini su antichi edifici*. In: *L'Archéometrie dans les pays européens de langue latine*. Rev. Archeometr., Suppl. 1996, (1996) 13–17.
- [6] C.A. Balaras, A.A. Argiriou, *Infrared Thermography for building diagnostics*, *J. Energy Build.* 32 (2002) 171–183.
- [7] D. Barilaro, D. Majolino, S. Gresta, S. Imposa, A. Schillaci, A. Leone, *Geophysical and thermographic investigations addressed to the study of the church of "S. Maria del Rosario" in Sicily (Italy)*, *Contrib. Geophysics Geodesy Vol. 36/2* (2006) 239–253.
- [8] C.J. Vaughan, *Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations*, *Geophysics* 51 (1986) 595–604.
- [9] T. Imai, T. Sakayama, T. Kanemori, *Use of ground penetrating radar and resistivity surveys for archaeological investigation*, *Geophysics* 52 (1987) 137–150.
- [10] S. Malagodi, L. Orlando, S. Piro, S. Rosso, *Location of archaeological structures using G.P.R. method 3-D data acquisition and radar signal processing*, *Archaeol. Prospect.* 3 (1996) 13–23.
- [11] S. Imposa, D. Majolino, D. Barilaro, C. Branca, S. Gresta, A. Leone, *Ground Penetrating Radar (G.P.R.) surveys applied to the research of crypts in San Sebastiano's church in Catania (Sicily-Italy)*, *J. Cult. Herit.* 8 (2007) 73–77.
- [12] B. C. Lawrence, D. Goodman, *Ground penetrating radar. Un'introduzione per gli archeologi*. Aracne editrice Roma S.r.L., vol. 1, (2007) 1–206.

APLICABILIDAD DE LA TERMOGRAFÍA PARA LA INSPECCIÓN DE LOS EDIFICIOS RURALES: CASO DE UNA COMARCA ESPAÑOLA

(SUITABILITY OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR THE EXAMINATION OF RURAL BUILDINGS: THE PARTICULAR CASE OF A SPANISH REGION)

Ignacio Cañas Guerrero¹, Silvia Martín Ocaña¹, Ignacio González Requena²

¹ Departamento de Construcción y Vías Rurales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.

² Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha de recepción: 02-XII-03

ESPAÑA

235-1

RESUMEN

En este artículo se pretende verificar la posibilidad de utilización de la termografía infrarroja como técnica de inspección del estado de los edificios rurales. Se reúnen los resultados obtenidos en varios trabajos de campo. Mediante esta técnica se puede analizar: localización de materiales y elementos ocultos, localización de diferentes materiales en fachada, presencia de grietas, localización de estructuras, localización de zonas húmedas y puntos de pérdidas de calor. Esta técnica permite inspeccionar un alto número de edificios en un breve período de tiempo, proporcionando resultados válidos. Los resultados muestran que en función del tipo de edificio las inspecciones se deben realizar en diferentes momentos del día: por la noche en los edificios con muros de carga y al amanecer en edificios con estructuras internas.

SUMMARY

This article is aimed at establishing the chance of applying the infrared thermography technique for the examination of rural buildings. The results from field works are collected. The next issues were determined by thermography: Hidden materials and elements; differences between different materials; location of cracks; location of structures; location of humid areas; points of heat losses and areas where the hot air is accumulated. It is possible to inspect a high number of buildings in a short time and get valuable results. The time where the inspection should be done is dependent on the type of building: in the evening for buildings with bearing walls and at daybreak for buildings with interior structures.

1. INTRODUCCIÓN

En España el número de edificios rurales es elevado y su localización es muy dispersa, no existiendo, en ocasiones, vías de acceso para automóviles. Las técnicas que se empleen para diagnosticar el estado de estos edificios deben ser capaces de proporcionar unos resultados válidos con una sola medición, debido al problema existente de desplazamiento. En la actualidad la termografía está siendo ampliamente utilizada para la inspección de edifi-

cios urbanos, viviendas y oficinas. Se encuentran trabajos centrados en la inspección de instalaciones (1), de acabados (2) y del aislamiento térmico (3); la mayoría de las aplicaciones se emplea para análisis cualitativos pero también aparecen algunos estudios cuantitativos (4). Además de edificios de viviendas, la termografía empieza a emplearse para el estudio de edificios de interés cultural, debido a su carácter de técnica no destructiva y al valor añadido de este tipo de edificios (5,6); así como para el estudio de las estructuras de obras civiles (7,8,9)

Este artículo presenta los resultados de las inspecciones termográficas realizadas sobre los edificios rurales de la comarca Soriana de "Tierras Sorianas del Cid", una comarca típicamente castellana de la zona interior de la península ibérica. Las condiciones de las construcciones rurales hacen de la termografía una técnica factible para la inspección del estado de los mismos. Dado el alto coste de una inspección termográfica comparado con el valor económico de los edificios rurales, se debe preparar un sistema que permita la realización de un alto número de inspecciones por día.

2. BASES FÍSICAS

Todos los materiales tienen la capacidad de absorber radiación infrarroja aumentando su temperatura; asimismo todos los materiales con una temperatura superior al cero absoluto emiten energía infrarroja. La termografía es una técnica que aprovecha la radiación emitida por la superficie de un cuerpo como variable termométrica. Esta radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura superficial del objeto (Ley de Stefan-Boltzmann):

$$W = \mu \cdot \tilde{A} \cdot T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Donde W es la energía radiante de un cuerpo, μ es la emisividad (valor entre 0 y 1), \tilde{A} es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) y T es la temperatura absoluta del objeto.

En la práctica se puede considerar la emisividad como una constante propia de cada material, aunque en realidad es función de la longitud de onda, de la temperatura y del ángulo de incidencia. Por tanto, si se conoce la emisividad del objeto que vamos a inspeccionar, la medida de la radiación nos dará un valor de temperatura. Los materiales típicamente empleados en la construcción tienen emisividades superiores a 0,8, estos valores hacen que la temperatura medida mediante termografía proporcione valores fidedignos. Por el contrario los metales o materiales brillantes tienen emisividades entre 0,05 y 0,2, por lo que resulta difícil medir su temperatura si no se emplean sistemas para aumentar su emisividad.

Mediante la captación de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo, la cámara es capaz de medir diferencias de temperaturas por debajo de 0,08 °C.

El espectro infrarrojo se extiende desde el límite del rango visible hasta llegar a la región de las microondas, sin embargo, existen dos regiones donde la transmisión es más elevada, la zona de 3 a 5 $\frac{1}{2}$ m (sistemas de onda corta) y la zona de 8 a 13 $\frac{1}{2}$ m (sistemas de onda larga). El equipo empleado en nuestro trabajo es un sistema de onda larga, puesto que es más recomendado para el uso en exteriores porque captan con más dificultad las reflexiones solares y son más sensibles a las radiaciones de baja temperatura

del entorno. Se trata de un sistema de captación de imágenes térmicas que representan la distribución superficial de temperaturas del objeto observado, permitiendo la realización de medidas y análisis térmico sobre la propia imagen.

El uso de la termografía infrarroja para la inspección de edificios requiere un conocimiento previo de los fenómenos físicos que tienen lugar entre el exterior y el interior. Durante el día, la radiación solar que incide sobre la superficie exterior es absorbida haciendo que aumente la temperatura. Por la noche el calor es disipado desde la fachada hacia el ambiente exterior a menor temperatura por radiación. La capacidad de acumulación de calor de un cuerpo es función de su volumen, de su densidad y de su calor específico, cuanto mayores sean éstos, el cuerpo acumulará más calor/frío y mantendrá su temperatura durante más tiempo transcurrido el período de calentamiento/enfriamiento. Las diferencias de temperaturas en los elementos de las fachadas estarán determinadas por las distintas cualidades de los materiales.

Con el fin de evitar el conflicto del aumento de temperatura debido a la radiación solar, las inspecciones se deben realizar por la noche o en días nublados, con poco viento, para reducir las pérdidas por convección.

3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto de reutilización de edificios rurales financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Uno de los primeros pasos que hay que dar antes de determinar las posibilidades de reutilización de un edificio es el de conocer el estado de conservación del mismo. El objetivo de este estudio es evaluar las posibilidades de aplicación de la termografía a este tipo de edificios como uno de los primeros pasos que nos ayude en su diagnóstico.

Las inspecciones termográficas se han realizado desde el exterior del edificio, por tanto se han obtenido mapas de temperaturas de las fachadas de los mismos. Con este sistema se pueden diagnosticar los defectos de los edificios que lleven aparejadas variaciones de las temperaturas superficiales, como son: fallos estructurales, problemas de humedades, falta de aislamiento térmico y estructuras ocultas, entre otros. El objetivo es localizar zonas problemáticas para un posterior análisis, los resultados obtenidos se basan en comparación de temperaturas de una superficie y no en valores absolutos, es decir, se trata de un análisis cualitativo.

4. REALIZACIÓN DE LAS INSPECCIONES

Se han inspeccionado 36 edificios pertenecientes a los términos municipales de Valdanzo y Castillejo de Robledo,

en Soria. Las inspecciones termográficas se han realizado en dos jornadas, la tarde-noche del 26 de marzo y el amanecer del 27 de marzo. La hora del día se ha seleccionado de forma que no incida la radiación solar para evitar que se enmascaren algunos fallos constructivos. Para la realización de las inspecciones se han seguido las indicaciones propuestas en la norma europea EN 13187:1998 (10).

La cámara empleada es una ThermaCAM SC 2000 de FLIR SYSTEMS y el software es ThermaCAM Researcher 2001 de la misma firma. La cámara tiene la capacidad de procesar tanto imágenes visuales como térmicas, con salida digital de 14-bits en tiempo real y enfoque automático. La calibración automatizada del sistema de la ThermaCAM SC 2000 usa cuatro referencias de temperatura interna, identificación de lente automático y avanzados algoritmos matemáticos lo cual asegura la fiabilidad en la ejecución de mediciones de temperaturas.

Especificaciones técnicas:

- Campo de visión/Distancia mínima de enfoque: 24°x18°/0,3 m
- Sensibilidad térmica: 0,07 °C a 30 °C
- Resolución espacial: 1,3 mrad

5. RESULTADOS: APLICACIONES

5.1. Determinar materiales y elementos ocultos

Gran parte de los edificios rurales antiguos han sufrido una serie de remodelaciones a lo largo del tiempo. Lo que hoy vemos en el entorno rural es raramente un edificio en su estado original. Antes de decidir las necesidades de rehabilitación para una futura reutilización, es preciso conocer tanto los materiales empleados en su construcción como la existencia de elementos ocultos. La termografía es una herramienta que puede facilitar este proceso.

Uno de los detalles que se pueden observar mediante la termografía es la existencia en la fachada de antiguos huecos ocultos. Esta práctica era muy habitual, debido a cam-

bios de uso o de la unidad familiar, en muchos edificios se hacía necesario cambiar la disposición de puertas o ventanas, abriendo huecos nuevos y tapando otros existentes. En la figura 1 aparece la imagen visual y termográfica de la fachada de una vivienda rural. En la termografía se distingue claramente un hueco de fachada que no aparece en la imagen visual. Se trata de un antiguo hueco que ha sido tapado, el grosor empleado para tapar el hueco es menor que el espesor del muro de cerramiento, por tanto su capacidad para acumular calor también es inferior. La termografía ha sido realizada al anochecer, cuando la temperatura exterior está descendiendo. El hueco oculto aparece a una temperatura similar a la del resto de huecos de fachada y a menor temperatura que el resto del muro.

Otro de los resultados que obtuvimos en las inspecciones fue la determinación del material de construcción oculto tras un enfoscado de cemento. A simple vista no se podría determinar el material de cerramiento del edificio de cara a futuras reparaciones. En la imagen termográfica pudimos observar con claridad que el muro estaba constituido por piezas de pequeño tamaño; por la disposición e irregularidad se pudo afirmar que se trataba de un muro de adobe. Además, la presencia de una zona inferior a mayor temperatura, indicaba la existencia de un zócalo de piedra, que, debido a su mayor espesor, acumuló más calor durante el día y, por tanto, aparecía en la imagen más caliente.

5.2. Distinguir materiales empleados en la construcción

Esta aplicación se debe a la distinta capacidad de almacenar calor que tienen los materiales. Los materiales con mayor densidad (piedra, barro) tienen una capacidad de almacenar calor más elevada que los materiales ligeros (maderas y aislantes). Esto quiere decir que los primeros acumulan calor por el día y lo mantienen durante más tiempo que los ligeros. Al anochecer, los materiales ligeros ya han perdido todo su calor y aparecen a menor temperatura que los pesados, lo contrario ocurre al amanecer.

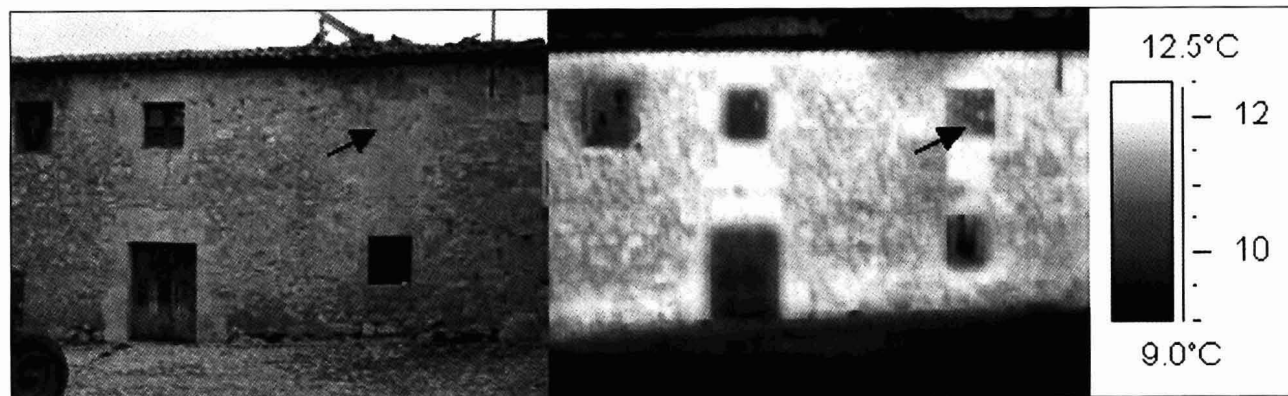


Figura 1.- Fachada de una vivienda rural. La imagen termográfica revela la existencia de un antiguo hueco en la fachada que ha sido tapado. Tomada al anochecer.

Los edificios antiguos encontrados en el entorno rural fueron construidos con distintos materiales, teniendo en cuenta el criterio de economía y la disponibilidad de los mismos. En las inspecciones realizadas se han encontrado fachadas realizadas con diferentes materiales, en la figura 2 aparece un ejemplo de vivienda rural construida con mampostería de piedra y adobe. En la imagen termográfica se observa perfectamente el diferente comportamiento térmico de los mismos. La parte inferior del edificio realizada en mampostería de piedra tiene un espesor mayor que la última planta realizada en adobe debido a las necesidades de capacidad portante, al aumentar el espesor aumenta el volumen que puede almacenar calor, es por esto que al anochecer, cuando las temperaturas han disminuido, la parte del muro realizada con mampostería de piedra está a mayor temperatura que el adobe.

5.3. Identificación de grietas

Una aplicación muy interesante de la termografía es la de determinar fallos en la estructura y en el cerramiento. Para determinar el estado de conservación de un edificio es importante conocer si existen grietas en el mismo, su número y su tamaño. En la figura 3 se muestra la imagen de una nave agrícola, la termografía desvela la localización de una junta que no era apreciable a simple vista. La detección de este tipo de fallos obedece a una diferencia de

emisividad más que a una diferencia de temperaturas. La zona donde se localiza la junta no tiene las mismas características superficiales que la fachada intacta, lo que hace que varíe su capacidad de emitir radiación.

5.4. Identificación de estructuras

La termografía es una herramienta eficaz a la hora de identificar las estructuras de los edificios. A pesar de que la termografía se basa en la medición de la radiación y, por tanto, la temperatura superficial de un cuerpo, se pueden detectar elementos interiores siempre que éstos transmitan por conducción su diferente temperatura hacia el exterior. La estructura interna de los edificios responde a las variaciones de la temperatura interior. Las inspecciones realizadas indican que sólo son visibles las estructuras portantes de los edificios en las termografías tomadas al amanecer. La razón es que el interior del edificio, a veces, al amanecer, está a mayor temperatura que el exterior, además el muro de fachada permanece todavía a baja temperatura lo que resulta en un mayor contraste de temperaturas. Esta identificación permite conocer el estado en el que se encuentra dicha estructura.

Reconocer el lugar exacto en el que se encuentran las vigas y los pilares nos da una información valiosa a la hora de acometer obras de rehabilitación de edificios.

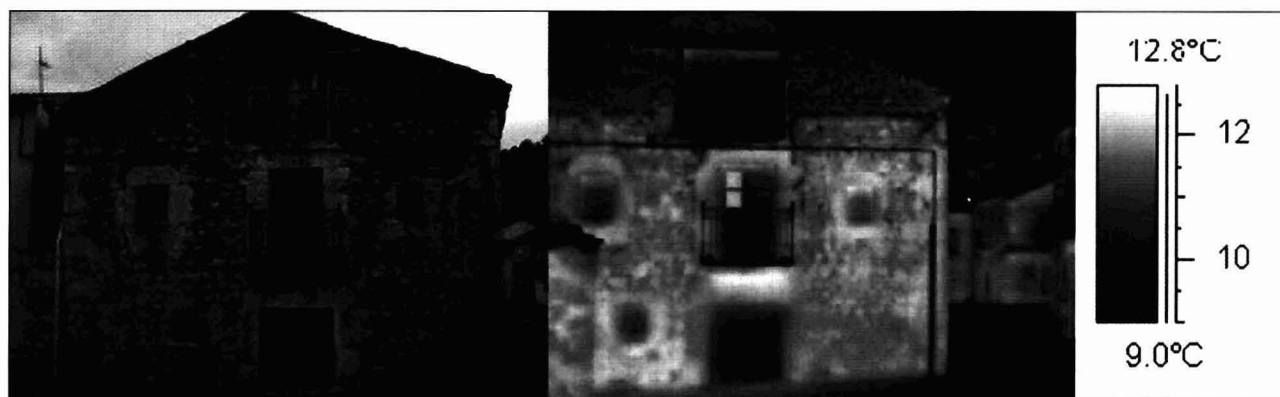


Figura 2.- Fachada de una vivienda rural. Las dos primeras plantas están realizadas en mampostería de piedra y la planta de cubierta en adobe. La termografía muestra el diferente comportamiento de estos materiales. Tomada al anochecer.



Figura 3.- Nave agrícola. La termografía revela la presencia de una junta de importante espesor en el muro. Tomada al amanecer.

En la figura 4 aparece la imagen de una bodega de construcción actual, la termografía realizada muestra perfectamente la ubicación de la estructura portante.

5.5. Identificación de zonas húmedas

La humedad es uno de los agentes atmosféricos que más daño provoca en los edificios. La termografía permite conocer este tipo de defectos de la construcción. El agua es un elemento con un elevado calor específico, es decir, requiere gran cantidad de energía para modificar su temperatura; es por ello que los materiales de construcción cargados de humedad se comportan de forma distinta que los mismos materiales secos. Además de este efecto existe la posibilidad de que el agua se evapore produciendo una disminución de la temperatura de la superficie. Un material húmedo retiene el calor absorbido durante más tiempo que seco, y, por lo tanto, radiará energía durante más tiempo.

En la figura 5 aparece una imagen de una vivienda rural. La rotura del canalón de desagüe ha provocado que las aguas de lluvia caigan directamente por el muro. Este hecho hace que aparezca una zona húmeda en la parte del muro en contacto con el suelo. En la imagen termográfica tomada al amanecer esta zona aparece más fría debido a que su inercia es mayor que la del resto del muro, por tanto tarda más en calentarse que el resto.

5.6. Pérdidas de calor

Dado que la termografía permite reconocer diferencias de temperatura, es posible determinar zonas de pérdidas de calor. Reconocer estos puntos críticos es fundamental a la hora de decidir las intervenciones necesarias para solucionar el problema. Reducir las pérdidas de calor de los edificios conlleva una reducción en el gasto energético así como una mejora del confort interior. Si se pretende reutilizar un edificio rural, habrá que tener este hecho presente, dado que muchos edificios antiguos carecen de un aislamiento efectivo. La falta de aislamiento aparece en la termografía como una zona a mayor temperatura.

La figura 6 muestra una imagen de una vivienda rural en la que aparecen puntos de pérdidas de calor en los tambores de las persianas.

5.7. Reconocer zonas de acumulación de calor

En todas las termografías realizadas al anochecer han aparecido puntos calientes bajo los salientes de la fachada (bajo balcones, bajo alero de cubierta), así como en los remetimientos de la misma (marcos de ventanas y puertas). Éstos son puntos en los que el aire no puede circular libremente. Durante el día la envolvente se va calentando y en estos puntos se acumula aire caliente.

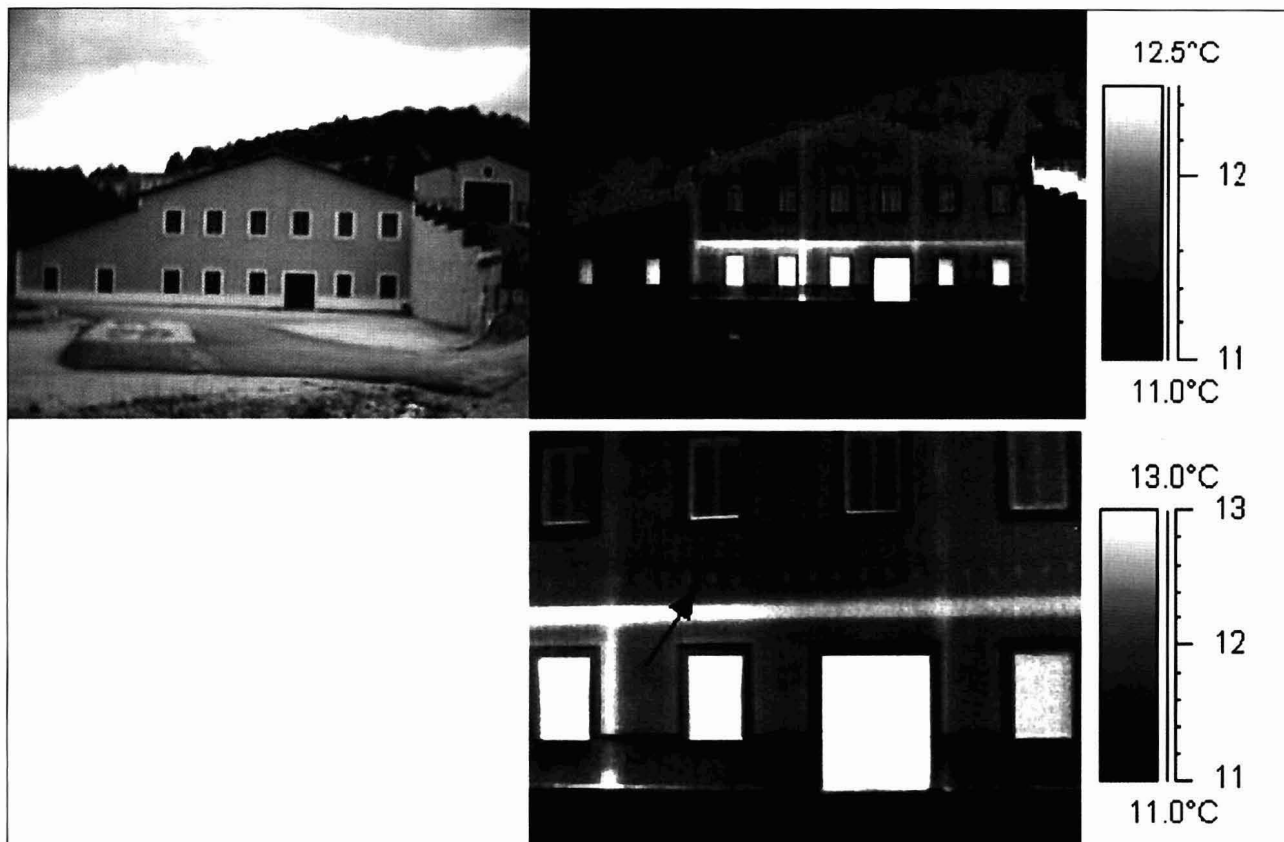


Figura 4.- Bodega de construcción moderna. En la termografía aparece la estructura a una temperatura superior al resto del muro de fachada. En la imagen inferior aparece una termografía de detalle en la que se señala una bovedilla. Tomadas al amanecer.



Figura 5.- Vivienda rural. El canalón de desagüe se ha partido y las aguas de lluvia caen directamente al suelo, se ha formado una zona húmeda en la parte inferior del muro que aparece como una zona fría en la imagen termográfica. Tomada al amanecer.

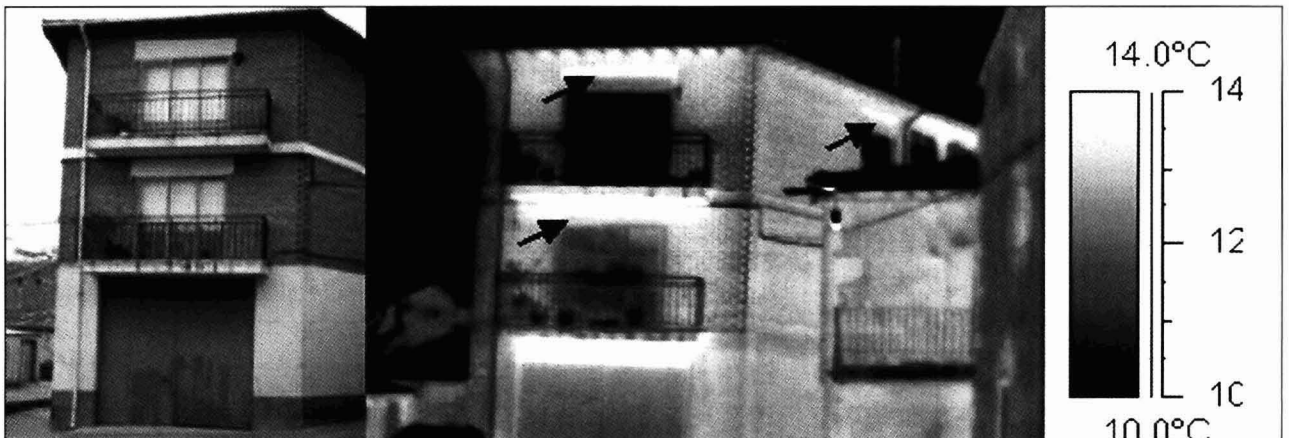


Figura 6.- Vivienda rural. En la imagen termográfica se señalan puntos de pérdidas de calor que corresponden con los tambores de las persianas. En la planta baja también se pierde calor por la ventana del garaje. Termografía tomada al anochecer.

6. VENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA PARA DETERMINAR EL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE EDIFICIOS RURALES

La termografía es una técnica no destructiva que proporciona información amigable y completa sobre diversas características de los edificios. El programa informático que acompaña a la cámara termográfica permite explorar la imagen térmica para obtener la máxima información posible. Entre las posibilidades existentes están:

- **Regulación de la escala de temperaturas:** por defecto normalmente la imagen termográfica viene definida entre unas temperaturas que son la máxima y la mínima encontradas en el entorno que se inspecciona. Sin embargo existe la posibilidad de reducir este intervalo de temperaturas para identificar problemas en zonas concretas del termograma (ver figura 7).

- **Realizar perfiles de temperatura:** esto permite conocer la variación de la temperatura a lo largo de una superficie

determinada. En la figura 8 el perfil de temperaturas permite ver la variación de la temperatura con la altura del edificio.

- **Realizar histogramas de temperaturas:** Esta herramienta es útil para determinar las pérdidas de calor por el cerramiento. Conociendo la temperatura media del exterior y situando esta temperatura en el punto medio del histograma se puede determinar el comportamiento del edificio a diferentes horas del día (ver figura 9 en la página 28) o comparar distintos edificios.

- **Realizar un mosaico de varias termografías.** Las imágenes termográficas tienen la posibilidad de ser tratadas como imágenes de formato JPEG, es por ello que se pueden realizar mosaicos de varias imágenes. La condición indispensable para que no se pierda información es que todas las imágenes estén en la misma escala de temperaturas y se hayan realizado consecutivamente. Esto permite obtener una imagen termográfica de un edificio completo que, por su situación, no permite la realización de la termografía completa "in situ".

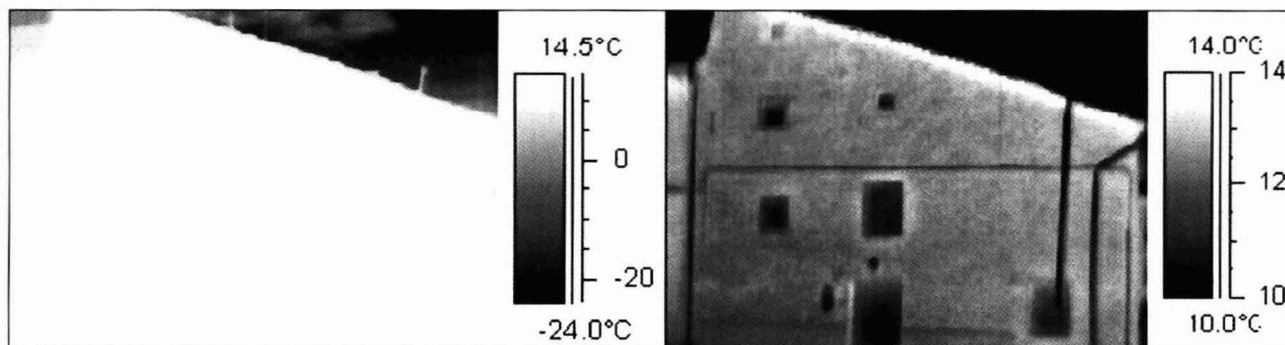


Figura 7.- Imágenes termográficas de una vivienda rural. En la izquierda el rango de temperaturas corresponde a la máxima y a la mínima de toda la imagen. En la derecha se ha reducido el rango a las máximas y las mínimas encontradas en la fachada.

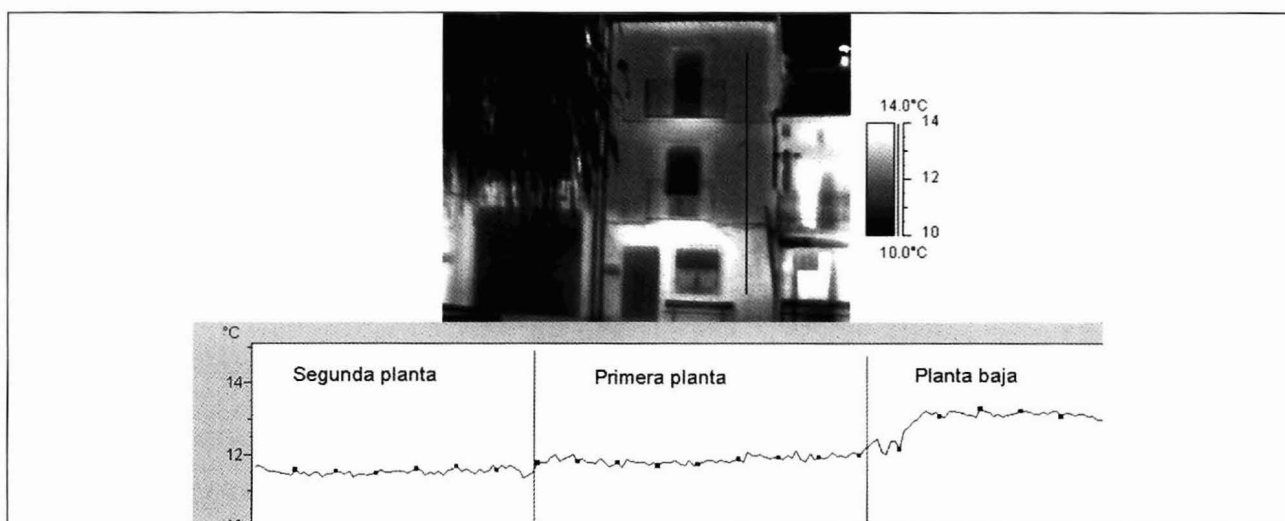


Figura 8.- Imagen termográfica de una vivienda rural. En la parte inferior aparece un perfil de temperaturas que corresponde a la línea marcada en la termografía. Se observa una reducción de la temperatura con la altura del edificio. Termografía tomada al anochecer.

7. CONCLUSIONES

Del estudio realizado se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- La termografía es una técnica que sirve para una localización inicial de posibles puntos con problemas.
- El almacenar imágenes para poderlas tratar con posterioridad nos permite tener documentación gráfica.
- El sistema permite realizar un gran número de inspecciones en un tiempo limitado.
- Tiene la ventaja de proporcionar información a distancia, sin ser necesario el contacto con el edificio, por lo que se pueden inspeccionar puntos inaccesibles.
- Se han podido determinar:

- Materiales y elementos ocultos
- Distintos materiales de construcción
- Localización de grietas
- Localización de estructuras
- Localización de zonas húmedas
- Pérdidas de calor
- Zonas de acumulación de calor

- Con los medios actuales la termografía no permite medir temperaturas absolutas, por tanto se trata de una técnica cualitativa.

- Las diferencias de temperaturas que se producen en el ambiente exterior son de pequeña magnitud (20 °C de amplitud máxima diaria exterior), en estas condiciones se puede admitir que la emisividad de los cuerpos permanece constante y no es necesario realizar medidas adicionales de emisividad o de temperatura.

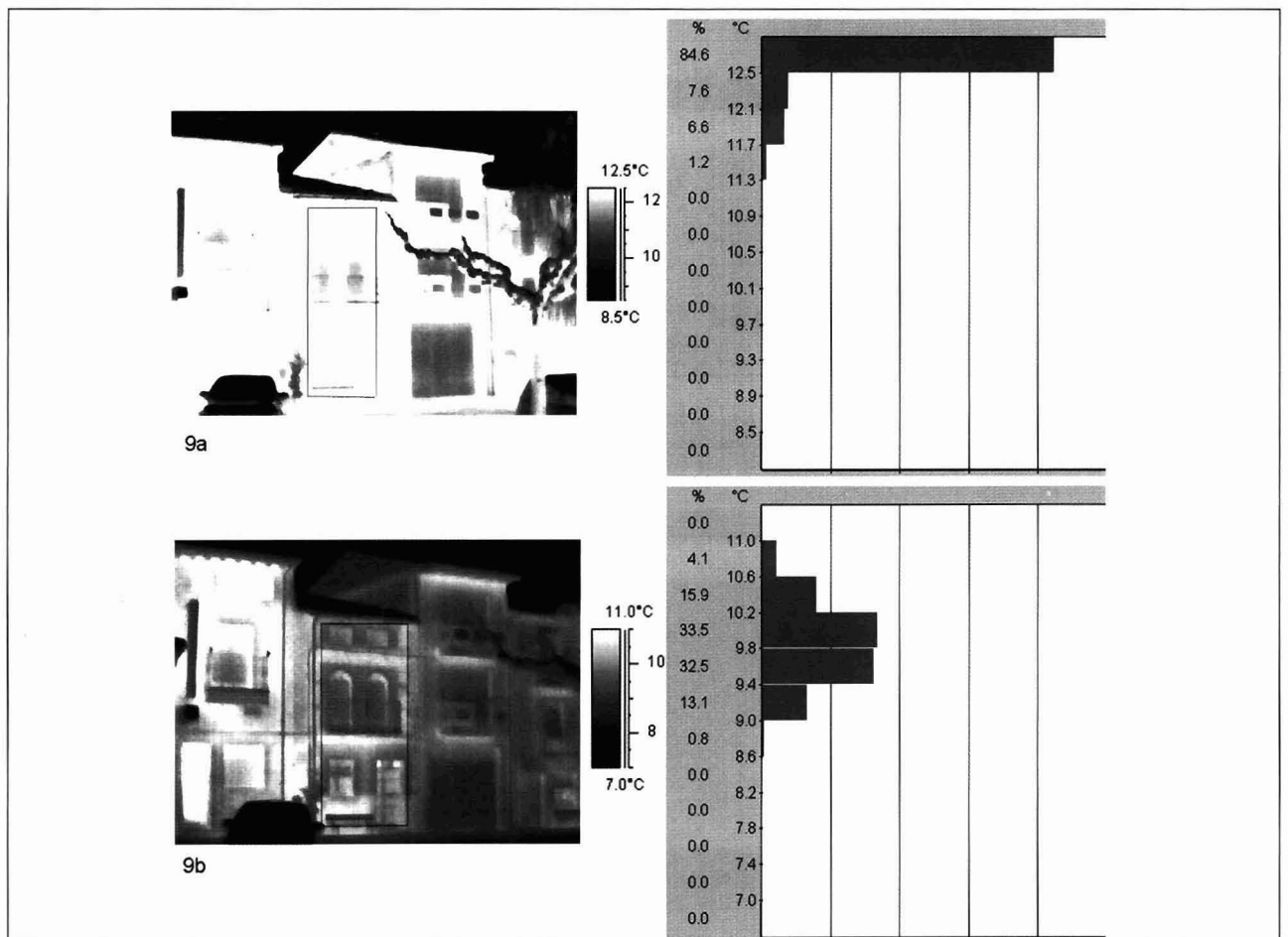


Figura 9.- Imagen termográfica de una vivienda rural. 9a: corresponde a la termografía tomada al anochecer, la temperatura del aire exterior era de 10,5 °C, se ha considerado éste como punto intermedio del intervalo. El histograma muestra que todos los puntos están a temperatura muy superior a la exterior. 9b: corresponde a la termografía realizada al amanecer, la temperatura del aire era de 9 °C, este punto se ha situado en el punto medio del intervalo. El histograma muestra que hay un gran porcentaje de puntos por encima de la temperatura media, existiendo también puntos a menos temperatura. La distribución de temperaturas no está tan alejada de la media como en 9a.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo financiero prestado al proyecto de investigación PB8-0720 "Aproximación a una metodología de reutilización de construcciones rurales" del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Balaras, C. A; Argiriou, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, vol. 34. 2002. pp 171-183.
- (2) Li, Z; Yao, W; Lee, S; Lee, C; Yang, Z. Application of infrared thermography technique in building finish evaluation. *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 19. 2000. pp 11-19.
- (3) Haralabopoulos, D. A; Paparsenos, G. F. Assessing the thermal insulation of old buildings - the need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography. *Energy Conversion and Management*, vol. 39. 1998. pp 65-79.
- (4) Grinzato, E; Vavilov, V; Kauppinen, T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, vol. 29. 1998. pp 1-9.
- (5) Grinzato, E; Bressan, C; Marinetti, S; Bisson, P. G; Bonacina, C. Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Physics & Technology*, vol. 43. 2002. pp 165-169.
- (6) Grinzato, E; Bison, P. G; Marinetti, S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3. 2002. pp 21-29.
- (7) Clark, M. R; McCann, D. M; Forde, M. C. Application of infrared thermography to non-destructive testing of concrete masonry bridges. *NDT & E international*, vol. 36. 2003. pp 265-275.
- (8) Wiggenshauser, H. Active IR-applications in civil engineering. *Infrared Physics & Technology*, vol 43. 2002. pp 233-238.
- (9) Titman, D. J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *NDT & E international*, vol. 34. 2001 pp 149 -154.
- (10) EN 13187: 1998. Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method (ISO 6781:1983 modified).

APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y LA ESPECTRORRADIOMETRÍA EN EL ESTUDIO DEL DETERIORO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO NACIONAL

(THERMOGRAPHY AND SPECTRORADIOMETRY APPLICATIONS IN THE STUDY OF
THE DETERIORATION OF OUR NATIONAL ARCHITECTURAL HERITAGE)

J. A. Cusidó, M. Devant y J. Riba
Institut de Tecnologia i Modelització Ambiental (UPC)

Cataluña

ESPAÑA

Fecha de recepción: 22-V-96

115-4

RESUMEN

Son conocidos los problemas que la acción de los agentes atmosféricos causan a nuestro patrimonio monumental. Sin duda, el aumento de la contaminación atmosférica contribuye a aumentar las causas naturales del deterioro de las piedras que constituyen nuestro legado histórico.

Lamentablemente, el conocimiento científico parcial de las causas que producen el denominado "mal de piedra", ha conllevado a restauraciones inapropiadas que, en no pocas ocasiones, lejos de solucionar el problema, han incrementado el proceso de deterioro o degradación.

La necesidad de encontrar métodos de diagnóstico rápidos y eficientes, especialmente los denominados como técnicas de análisis no destructivos, ha dado lugar a la aplicación de la Termografía Infrarroja (TIR) y la Espectrorradiometría (ER) como herramientas de apoyo al estudio del deterioro de las piedras monumentales y cuyos primeros resultados presentamos en este trabajo.

Palabras clave: legado histórico, edificios, termografía, espectrorradiometría

SUMMARY

It is well known the problems in ancient monumental buildings caused by atmospheric agents. Besides of natural causes, the rise in the atmospheric contamination levels has played an important role in the deterioration of the stones of our national heritage art.

Regrettably the partial scientific knowledge of the causes that produced the called "stone disease", has taken to inappropriate restorations that far from solving the problem, they have increased the deterioration process.

The need of finding quick and efficient diagnostic methods, specially non-destructive analysis techniques, has originated the use of Infrared Thermography and Spectroradiometry as support tools in the study of the deterioration of monumentals stones. The firsts results are presented in this work.

Keywords: heritage art, buildings, thermography, spectrorradiometry.

1. Introducción

Lamentablemente, el patrimonio monumental histórico, y especialmente aquél que se halla situado en los ambientes urbanos, sufre, a menudo, del denominado "mal de piedra". Esto es, la alteración de las características primitivas de la roca, debida a su adaptación a las nuevas condiciones ambientales en que se encuentra. Alteración que, en ambientes urbanos, es agravada por los altos índices de contaminación atmosférica. En algunos casos se han alcanzado tales grados de deterioro que han exigido programas específicos y urgentes de actuación, para poner a salvo la integridad del monumento (como es el caso de la Catedral de Burgos).

Al emprender las tareas de restauración de un monumento es de vital importancia conocer las causas de su degradación, así como el proceso que ha seguido a lo largo de los años. Para su investigación cobran gran importancia las técnicas no destructivas de análisis, puesto que éstas no significan ningún tipo de actuación sobre el monumento o destrucción de la muestra extraída de él. En este trabajo se presentan los resultados iniciales de la aplicación de la Termografía Infrarroja (TIR) y de la Espectrorradiometría (ER) para el estudio del estado y grado de alteración de las piedras monumentales de la Catedral de Oviedo. En este sentido, se hace hincapié en que se trata de primeros resultados no concluyentes.

2. La Catedral de San Salvador de Oviedo

La Iglesia Catedral de San Salvador de Oviedo es una muestra del gótico tardío, de innegable interés histórico-artístico, puesto que en él se refleja toda la evolución del gótico en España. Su construcción se realizó sobre antiguos restos románicos y pre-románicos, datando las partes más antiguas del año 1293 (Sala Capitular). Cabe reseñar que su mayor parte es edificada a lo largo de los siglos XV y XVI. A partir del siglo XVII las intervenciones en ella se producen, fundamentalmente, para restaurar partes maltrechas por accidentes meteorológicos (caídas de rayos y vendavales). Mención aparte merece el claustro. Éste, consta de dos pisos: el inferior, construido en el siglo XIV y de estilo gótico, claustro bajo, y el piso superior, claustro alto, que data del siglo XVIII.

En la actualidad, la Catedral de San Salvador presenta un nivel elevado de alteración de la piedra con que fue construida (1), destacando la intensa degradación del claustro y del pórtico, amén del ennegrecimiento de la parte externa de la Catedral. Esto último es debido, generalmente, a la formación de una o más pátinas de suciedad, permaneciendo la roca debajo de ellas inalterada, aunque a menudo decolorada. En las partes más resguardadas y con acceso al exterior, como el pórtico o el claustro, el ennegrecimiento se debe a una alteración efectiva de la

piedra, con la formación de costras que, al llegar a cierto espesor, se desprenden en forma de desconchados y deplacaciones.

La Catedral está construida, fundamentalmente, con tres tipos distintos de piedras: Laspra, Piedramuelle y Tiñana, siendo las tres de procedencia de canteras situadas en Asturias (2) (3) (Figura 1). De las tres, la predominante resulta ser la primera (60% del total de la parte gótica), que fue además la primera en ser usada. La Piedramuelle no es utilizada hasta finales del siglo XV y representa un 37% del material. Por su parte, la piedra Tiñana es utilizada sólo en reconstrucciones realizadas a partir del año 1943, representando tan sólo el 3% del material total.

La piedra de Laspra es una dolomía micrítica, constituida esencialmente por dolomita, cuarzo y filosilicatos, con unos porcentajes del 90%, 5% y 4,5%, respectivamente. La Piedramuelle y la Tiñana, petrológicamente, pueden ser clasificadas como calizas bioclásticas. Los análisis cuantitativos (2) de la primera han dado como resultado una composición del 85% de calcita, un 5% de cuarzo, 5% de feldspatos y 4% de filosilicatos. A diferencia, en la Tiñana, no se encuentran feldspatos, siendo su composición la siguiente: 90% de calcita, 7% de cuarzo y 2% de filosilicatos.

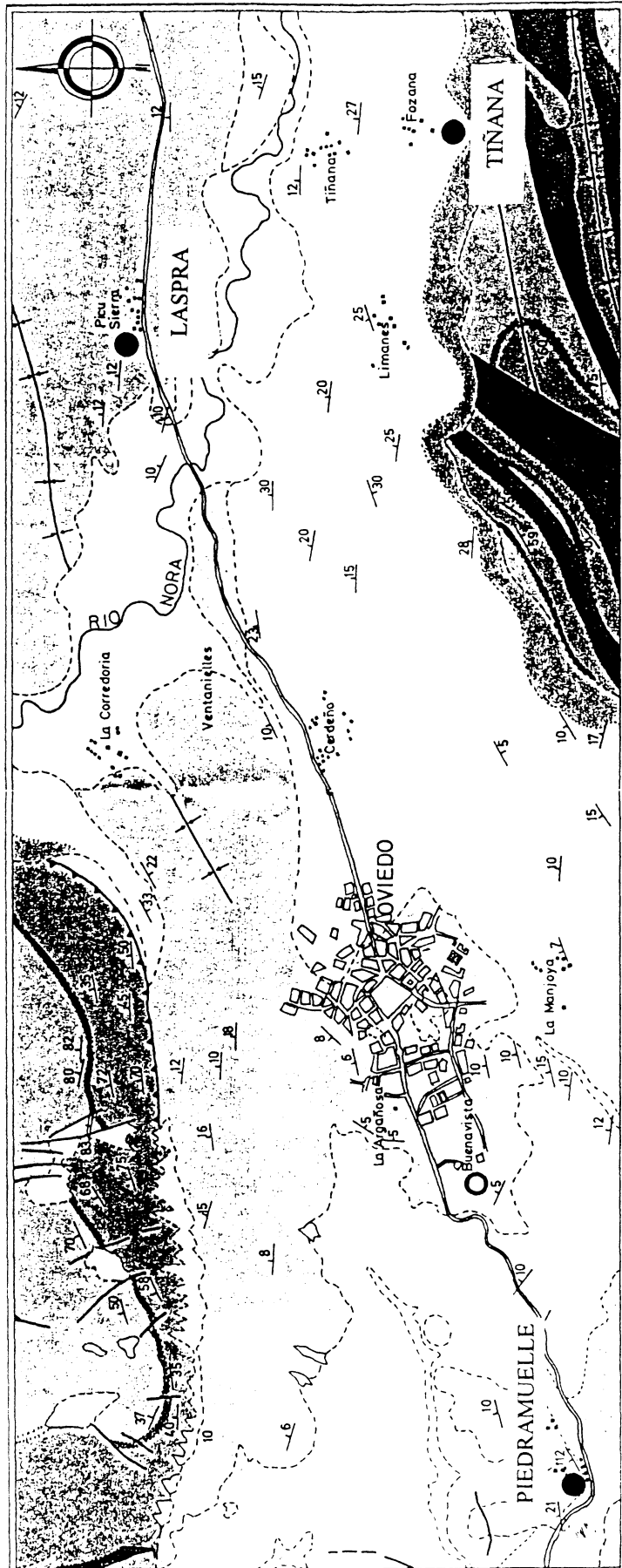
En relación al estudio alterológico de las piedras, resulta de suma importancia conocer las propiedades y características macro y microporosas de las rocas, debido a su determinante influencia en los procesos de deterioración que éstas seguirán, siendo de gran importancia, tanto la cantidad de poros como el grado de comunicación entre sí (porosidad abierta). Las tres rocas han resultado poseer una elevada porosidad. En cuanto al tamaño del poro, cabe reseñar que todas resultan ser esencialmente microporosas (radio de acceso menor que 7,5µm). Las características microporosas de las tres variedades se resumen en la Tabla 1.

Cabe resaltar el elevado porcentaje que la porosidad atrapada (poros de difícil acceso, cuellos de botella) representa respecto al total, con valores del 60% para la piedra de Tiñana y Piedramuelle y del 40% para la piedra de Laspra.

3. Técnicas de análisis no destructivo: Termografía Infrarroja y Espectrorradiometría

3.1. Principios físicos

Obviamente, la acometida de un proyecto de restauración de un edificio histórico, y especialmente aquéllos de carácter monumental, exige la realización de un exhaustivo estudio que determine, tanto las propiedades físicas y químicas de los materiales con los que se ha construido, como su estado de alteración. En este contexto, las distintas



ESCALA = 1:50.000

Fig. 1.- Ubicación de las canteras de Piedra de Laspra, Piedramuelle y Tiniana que han sido utilizadas en la construcción de la Catedral de Oviedo (E = 1:50.000).

TABLA I

Resumen de las características microporosas y macroporosas de las Piedras utilizadas en la Catedral de San Salvador de Oviedo. Se destaca el carácter esencialmente microporoso de las tres (r indica el radio de acceso)

Roca Tipo	Porosidad (%)	Macroporosidad (r > 7,5µm)	Microporosidad (r < 7,5µm)	Porosidad atrapada (%)
Laspra	30,80	0,00	30,80	12,50
Piedramuelle	24,70	2,98	21,73	15,34
Tiñana	13,80	2,50	11,30	8,50

técnicas de análisis no destructivo juegan un importante papel por sus ventajas evidentes y, en algunos casos, pueden llegar a constituir un método de diagnóstico rápido. En este artículo presentamos la aplicación de dos de ellas, la Termografía Infrarroja (TIR) y la Espectrorradiometría (ER), al estudio del estado de alteración de la Iglesia Catedral de Oviedo.

Las dos técnicas mencionadas reúnen en común el uso de la radiación electromagnética emitida y/o reflejada por el cuerpo en estudio como parámetro de análisis. Una diferencia básica entre las dos técnicas reside en que la ER se orienta al estudio de la radiación reflejada, transmitida o dispersada por un cuerpo o medio, como resultado de la radiación incidente sobre él, emitida por una fuente luminosa externa, en tanto que la TIR se dedica al análisis de la radiación electromagnética en el espectro infrarrojo, emitida por el propio objeto sometido a estudio.

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética en función de la temperatura a la que se encuentran, por este motivo recibe el nombre de radiación térmica. La radiación total emitida viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$R_t = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (Wm^{-2}) \quad [1]$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$) y ε es la emisividad del material en cuestión. Ésta se define como el cociente entre la radiación emitida por el cuerpo en cuestión con la que emitiría un cuerpo negro (aquél que absorbe toda la radiación incidente) a su misma temperatura (por tanto, para los cuerpos negros $\varepsilon = 1$). La emisividad depende de la longitud de onda y de la temperatura. Los cuerpos en que se cumple la relación $\varepsilon < 1$ se denominan cuerpos grises.

La radiación emitida no es constante para todas las longitudes de onda, su distribución espectral cumple la ley de Planck:

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi c^2 \varepsilon(\lambda, T)}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad [2]$$

En la Figura 2 se representan los espectros de radiación emitida para un cuerpo negro a diferentes temperaturas. Se observa que para temperatura ambiente (alrededor de 297 °K) el máximo de radiación se produce para longitudes de onda situadas en la banda del espectro infrarrojo, y más concretamente en la banda del infrarrojo cercano o medio, comprendida entre los valores de longitud de onda entre 700 nm y 20.000 nm.

Aparte de la emisividad hay otros factores que influyen de manera importante en la medida de la radiación térmica emitida por un cuerpo. En primer lugar, hay que tener en cuenta que la radiación que llega al detector está compuesta, además de la radiación propiamente emitida, por la radiación reflejada proveniente de otros cuerpos o de fuentes luminosas externas. Habría, pues, que reducir al máximo estas radiaciones "parásitas", ya que pueden dar lugar a temperaturas aparentes superiores a las reales, como en el caso de una esquina a causa de las reflexiones mutuas entre las dos paredes que la forman.

También influye el ángulo de incidencia de la observación (4), puesto que la emisividad de un material varía con la dirección de la misma, (cuerpos no-lambertianos), haciéndose nula para ángulos rasantes. Tan sólo para los cuerpos negros y grises la emisividad es la misma, sea cual sea el ángulo de observación. En la práctica, los metales tienen una emisividad constante hasta un ángulo de 40°, y los dieléctricos hasta los 60°.

Finalmente, la atmósfera, el medio en el que se transmite la radiación térmica, influye absorbiendo o dispersando parte de ella. En este sentido, cabe resaltar la existencia de ventanas de transmisión, es decir, intervalos de longitudes

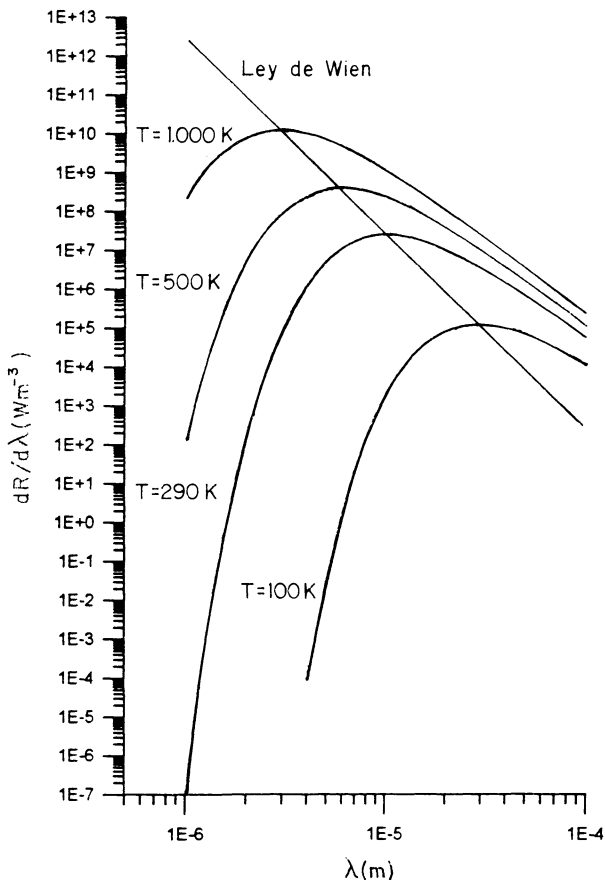


Fig. 2.- Representación, en escala logarítmica, de la radiación emitida por un cuerpo negro a diferentes temperaturas, según la Ley de Planck. Se observa que para temperaturas próximas a la ambiente (290 °K), el máximo de emisión corresponde al rango del infrarrojo, según la línea descrita por la Ley de Wien ($\lambda_m T = \text{cte.}$).

de onda para los que la atmósfera es prácticamente transparente. Entre éstas existen las situadas entre los 8 y 13 μm que, precisamente, corresponde con la longitud de onda del máximo de emisión para cuerpos situados a temperatura ambiente, según la conocida expresión de la ley de Wien representada, asimismo, en la Figura 2.

3.2. Termografía Infrarroja (TIR)

La Termografía Infrarroja (TIR) es una técnica instrumental que convierte una determinada distribución espacial de radiación térmica, esto es, una señal en la banda infrarroja del espectro electromagnético, invisible para el ojo humano, en señales eléctricas computerizables ("pixels"), generando una imagen visible. Intervienen dos parámetros en la medida: temperatura y emisividad. Para realizar medidas cuantitativas es necesario conocer previamente una de las dos, aunque cabe resaltar que es mucho más adecuada para realizar medidas cuantitativas de la temperatura (errores de hasta el 5%), que para la emisividad (errores de hasta el 30 %).

La TIR ofrece una información que corresponde a las capas más superficiales del material. En algunos casos, cuando

la radiación incidente sobre el cuerpo está reforzada por una longitud de onda determinada, la radiación electromagnética es capaz de penetrar un cierto espesor y reflejarse en una capa a una determinada profundidad. Esta radiación reflejada es la que se recoge con la cámara, de forma que somos capaces de "ver" lo que ocurre detrás de la pared (5).

La TIR se caracteriza por:

- Ser una técnica de medida de temperatura y emisividad superficial sin entrar en contacto directo con el sistema en estudio (denominada, por este motivo, técnica no destructiva).

- Ser una técnica totalmente pasiva, es decir, que no requiere de fuente de iluminación externa, lo cual permite su funcionamiento, tanto diurno como nocturno, así como efectuar la Inspección Termográfica sin alterar las condiciones ambientales durante la experimentación.

- Ser una técnica ideal para el estudio de las pérdidas energéticas, cuya información se aplica al ahorro y uso racional de la energía, así como potencialmente a diversas áreas de interés para la preservación medioambiental, como es el caso que nos ocupa.

- Una de sus aplicaciones más relevantes se halla en lo que se denomina diagnóstico o mantenimiento preventivo; se trata de una aplicación creciente de esta herramienta científica. Su capacidad de análisis in situ permite efectuar controles de procesos térmicos, o donde la temperatura y la emisividad de las superficies aporten información válida para el diagnóstico.

- Finalmente, destacamos que se trata de una técnica que proporciona la información en tiempo real, lo que permite una gran flexibilidad para el estudio de observaciones inesperadas.

Existe un importante campo de aplicaciones de la termografía en el estudio del estado del patrimonio arquitectónico y monumental (5). Entre las que citamos:

- Establecimiento cronológico de las diferentes fases constructivas, pues permite diferenciar puertas y ventanas tapiadas o abiertas posteriormente, la estructura de los muros, los diferentes materiales utilizados, etc.

- Localizar el paso de canalizaciones diversas y vías de servicios.

- Poner de relieve la presencia de humedades y fenómenos de capilaridad.

- Análisis de irregularidades bajo estucos y frescos. Inhomogeneidades constructivas.

3.3. Espectrorradiometría (ER)

La ER es una técnica de medida de flujo energético, emitido por una fuente de radiación o superficie donde ésta incide, discriminando las diferentes longitudes de onda (lo que constituye el espectro).

Las aplicaciones de la espectrorradiometría se circunscribían, inicialmente, al campo de la química analítica, si bien, posteriormente, el campo de utilidades de dicha técnica se amplió substancialmente con las posibilidades de los avances de la microelectrónica, desarrollados durante los últimos años, que permitieron la fabricación de instrumentación de dimensiones reducidas, de fácil manejabilidad y de simple mantenimiento.

En este sentido, en las posibles aplicaciones científicas, citamos:

- Energía Solar. Análisis espectral de la radiación solar.
- Medio Ambiente. Contaminación de recursos acuáticos.
- Medio Ambiente. Patologías en construcción, vegetación, etc.
- Teledetección. Análisis de imágenes de satélites.
- Termografía. Apoyo a la teledetección infrarroja.
- Colorimetría. Sistema C.I.E.
- Análisis de la emisión radiante de fuentes luminosas.
- Absorción en gases, líquidos y sólidos.

Usualmente, el uso de esta técnica, en su versión instrumental de campo, se ha circunscrito a la determinación de la respuesta espectral de la vegetación (determinación de espectros de reflexión de plantas (7), de suelos, así como de la determinación del espectro solar incidente (albedo) en determinadas aplicaciones de la energía solar (8).

Sin embargo, consideramos que existen posibilidades de aplicación en otros campos como la petrofísica, por cuanto la respuesta espectral, junto con la utilización de otras técnicas físicas, puede correlacionarse con la difusión de determinados agentes ambientales que inciden en la alteración de las rocas de nuestro patrimonio monumental. En concreto, entendemos que las variaciones sobre las propiedades físicas, que inciden sobre el deterioro de las piedras, en que esta técnica puede ser interesante son las siguientes:

- Determinación del color (Sistema C.I.E.).
- Velocidades de absorción y desorción.

- Permeabilidad al vapor.

-Expansión térmica.

Sin embargo, la falta de referencias, al ser esta investigación una de las primeras aplicaciones a la petrografía, sugiere que los resultados obtenidos con esta técnica, dentro del marco general de nuestro trabajo, deberán atenerse a la consideración de datos iniciales no concluyentes.

4. Metodología y plan de trabajo

4.1. Termografía Infrarroja (TIR)

Los días 18 de marzo de 1993 y 2 de junio de 1994 se realizaron sendas inspecciones termográficas in situ. El equipo utilizado en las inspecciones constó de:

- Equipo termográfico AGEMA 470.
- Termohigrómetro digital Rotronic GTL-100-50.
- Termómetro de contacto Anritsu HL600.
- Estación de trabajo para el tratamiento de imagen de resolución 740 x 240 pixels y 4096 colores.
- Estación de edición de vídeos VHS, SONY E300.

La metodología seguida en estas inspecciones consta de tres fases: fase de recopilación de datos iniciales, la fase de la inspección termográfica propiamente dicha y la fase de análisis de los datos obtenidos.

En la primera fase, a tenor de los datos suministrados y obtenidos en otros análisis, se realiza una selección de los lugares donde debe realizarse la inspección termográfica. La selección se realizó en base a tres criterios:

- i) El grado de alteración.
- ii) Diferentes características pétreas (piedra de Laspra o Piedramuelle).
- iii) Variabilidad en la ubicación (orientación, exposición a agentes meteorológicos, etc).

En la Catedral de Oviedo se seleccionaron tres áreas: El patio de los de los Reyes, la terraza del Rosetón frontal, y el Claustro.

En la segunda fase, una vez medidos los datos higrotérmicos (Tabla 2), se realiza el **barrido** por termovisión, con un registro videográfico y digital de la información obtenida.

Finalmente, en la **evaluación de los resultados**, se realiza un tratamiento informático de las imágenes más relevantes.

4.2. Espectrorradiometría (ER)

Con el objetivo de desarrollar una técnica que permita evaluar el grado de alteración de una roca en profundidad,

TABLA II

Condiciones climáticas durante las inspecciones termográficas realizadas

	Patio de los Reyes		Terraza del Rosetón		Claustro de la Catedral	
	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)
18/3/93	13-16	55 (± 3)	18	53 (± 2)	15	67 (± 3)
2/6/94	23	65 (± 3)	20	68 (± 3)	20	68 (± 3)

se realizaron los análisis de los espectros de reflexión de una serie a tres profundidades diferentes (0, 1 y 5 cm) de dos muestras de Piedra Laspra y tres de Piedramuelle. Las medidas se realizaron con un espectrorradiómetro LICOR 1800, que proporciona un rango de medida de 400 a 1100 nm, correspondientes a las bandas visible y del infrarrojo mediano del espectro electromagnético, con un intervalo de 2nm. Su sensibilidad es de $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Wcm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ ster}^{-1}$.

5. Resultados

5.1. Termografía Infrarroja

La Termografía Infrarroja permite distinguir, como ya se ha dicho, zonas a diferente temperatura o emisividad. En las Figuras 3 y 4(A y B), correspondientes a la terraza del Rosetón Central en la Fachada Principal, se observa cómo se destacan pequeñas áreas bien definidas a una temperatura claramente superior (alrededor de 1°C) del resto del

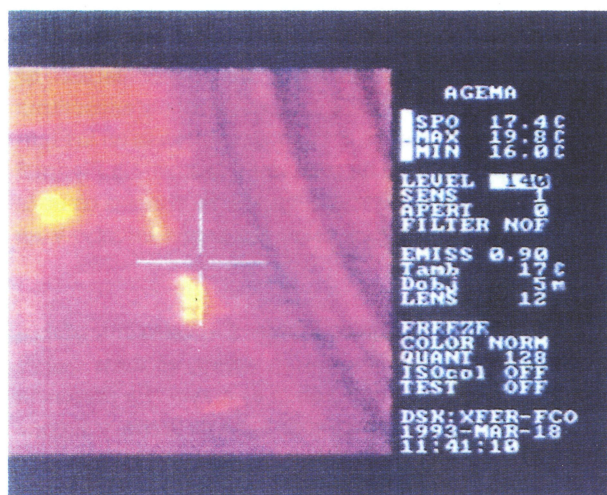


Fig. 3.- Termograma que corresponde al área del Rosetón Central en que se pone en evidencia las restauraciones efectuadas, distinguiendo el material original del utilizado en las mismas por su mayor contraste térmico.

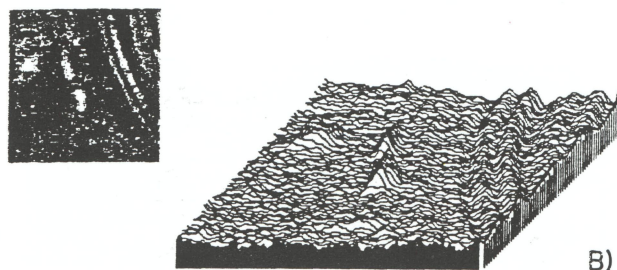
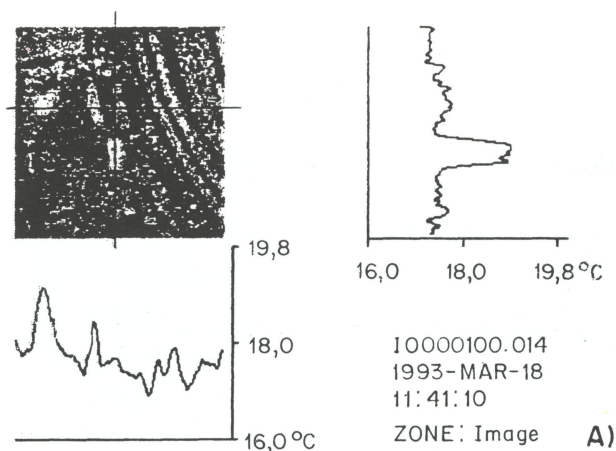


Fig. 4.- A) Perfil de temperatura, y B) mapa de temperaturas del área recogida en el termograma de la Fig. 3.

muro. Las diferencias observadas son causa de intervenciones de restauración, realizadas en la segunda mitad de este siglo, y con un material diferente al original. Esto constituye un claro ejemplo de la capacidad de la técnica de la termografía infrarroja para la determinación, estudio y seguimiento de las actuaciones de restauración.

En otros casos, la TIR, permite distinguir sillares de un

mismo material con un distinto grado de alteración. La Figura 5 presenta las imágenes termográficas de bloques localizados en las paredes Sur y Norte, respectivamente, del Patio de los Reyes, con unas diferencias de temperatura entre 3 y 1°C respecto a sus contiguos. En el primer caso, las zonas más frías pertenecen a zonas de un nivel de degradación más elevado. El corte de cantera y la colocación en obra pueden causar variaciones en la emisividad. Éste puede ser el caso de sillares aislados. Sin embargo, cuando el área que presenta la inhomogeneidad, o la diferencia de temperatura es considerable, las posibles diferencias de emisividad no pueden ser las únicas causantes. En este sentido, en la Figura 6 (A y B) se presenta una cornisa de un pilar situado en el lado Sur del Claustro, que la termografía revela como una zona fuertemente alterada, aunque en primera aproximación sólo aparecía ligeramente degradada.

Particularmente interesante resulta la observación de las zonas de lavado, es decir de aquéllas en que la acción de la

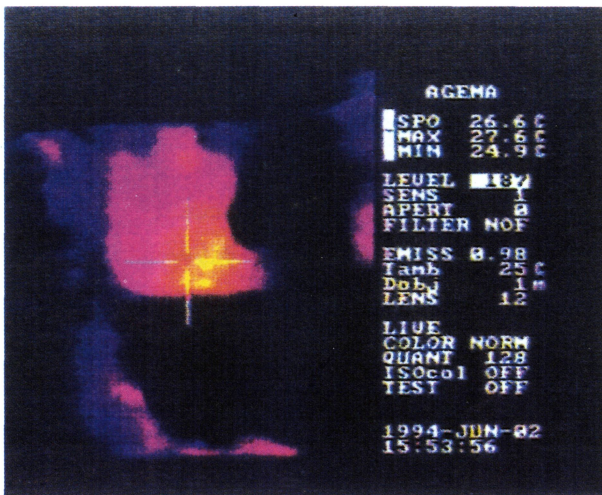
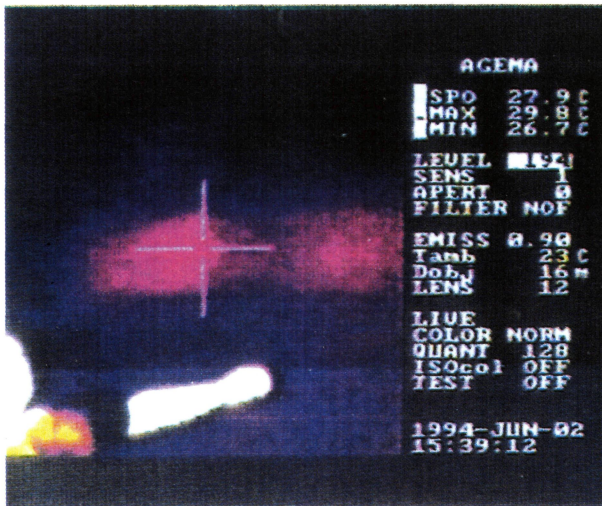


Fig. 5.- Termogramas correspondientes a las paredes Sur y Norte del patio de los Reyes, donde, en cada caso, se pueden observar diferencia de temperaturas entre sillares contiguos de 1°C y 3°C, indicativos de su mayor grado de alteración, independientemente de su observación en imagen visible.

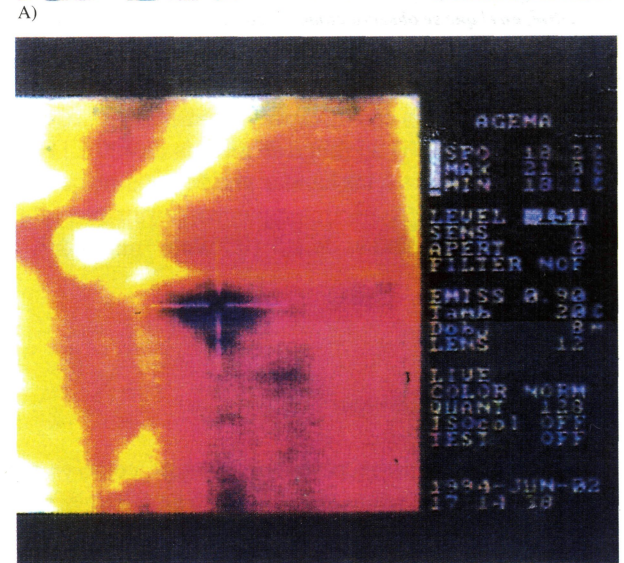
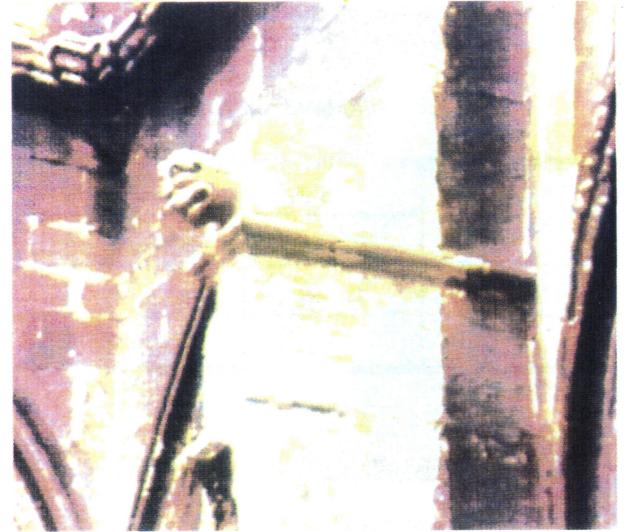


Fig. 6.- A) Imagen visible y B) termográfica de un contrafuerte situado en el Claustro de la Catedral. La imagen termográfica revela una zona fuertemente alterada que, a simple vista, permanece imperceptible.

lluvia ha impedido la formación de pátinas y/o costras. Las zonas lavadas, que presentan un mejor estado de conservación, bajo la termografía infrarroja se encuentran a una temperatura menor, tal y como se observa en la Figura 7, correspondiente a un pilar del Claustro. La Figura 8 corresponde al perfil de temperaturas. Se observa cómo la diferencia de temperatura entre las zonas lavadas y no lavadas llega hasta los 3°C.

La diferencia encontrada es debida, a nuestro entender, a que las zonas lavadas transpiran mejor, es decir que el índice de evaporación convectiva es mayor. La presencia de costras impide la absorción de agua de lluvia y supone un obstáculo a la evaporación.

Sin embargo, y en contradicción a lo observado en el Claustro, en la terraza del Rosetón Central las zonas lavadas presentan, contrariamente, temperaturas ligeramente más elevadas (Figura 9).

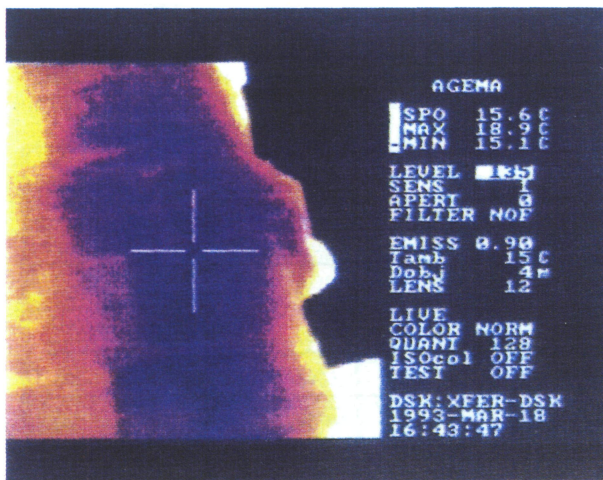


Fig. 7.- Imagen termográfica de un contrafuerte situado en el claustro de la Catedral, en el que se observa cómo las zonas lavadas presentan una temperatura menor (en este sentido se considera que transpiran mejor, lo que tiene un efecto positivo en su menor grado de alteración).

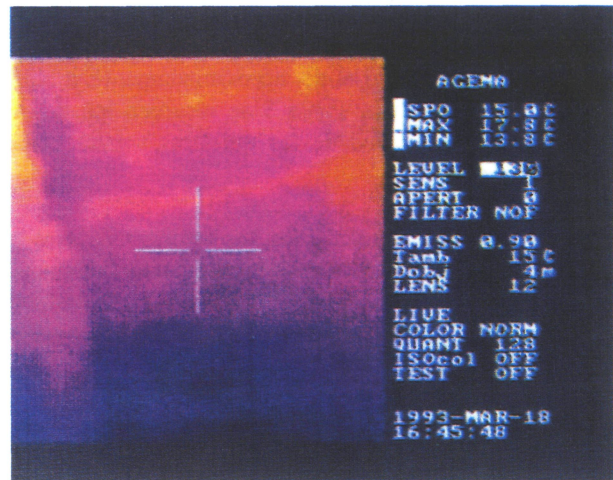


Fig. 10.- Termograma donde se observa el efecto de capilaridad en la parte inferior de un contrafuerte del Claustro de la Catedral.

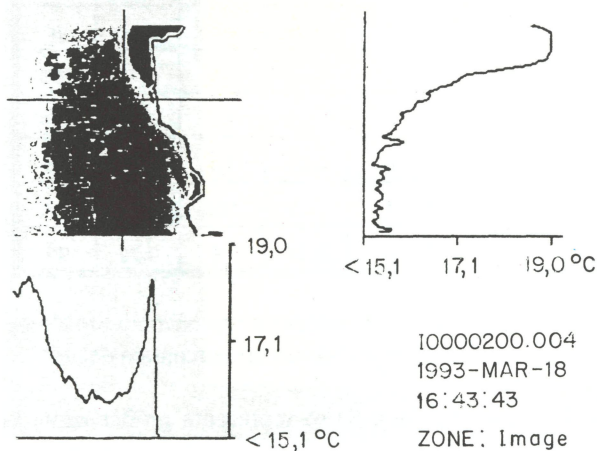


Fig. 8.- Perfil de temperaturas del termograma presentado en la Figura 7. La diferencia de temperaturas entre las zonas lavadas y no lavadas se sitúan en el entorno de los 3°C.

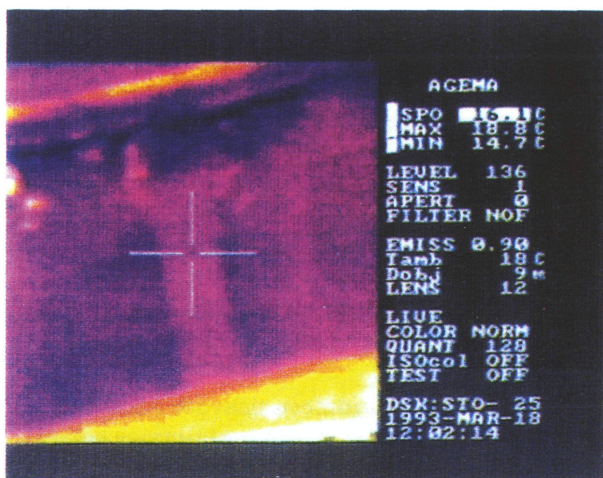


Fig. 9.- Observación del efecto de la acción de lavado por la lluvia sobre algunos elementos situados en la terraza del Rosetón Central, cuya temperatura es ligeramente superior a las restantes, en contradicción a lo observado en el Claustro.

Este comportamiento diferente puede ser atribuido a diferentes motivos. Por una parte, la exposición a la radiación solar o la existencia de ligeras brisas o vientos, esto es, a las diferentes condiciones microambientales. Por otra parte, cabe recordar que mientras que el Claustro está construido con Piedra de Laspra, la terraza del Rosetón Central está hecha con Piedramuelle. La primera es más porosa y tiene menor porosidad atrapada que la segunda, índice de porosidad total del 30,8% y de porosidad atrapada del 12,5% contra el 24,8% y el 15,3% respectivamente. Las diferencias en la porosidad permitirían a la piedra de Laspra una evaporación del agua absorbida más efectiva. También puede influir el hecho de que la alteración en la Terraza del Rosetón sea debida a la formación de pátinas, y no de costras, como en el Claustro.

Finalmente, en la Figura 10 se observa la capacidad de la TIR para poner de relieve fenómenos de capilaridad. El termograma corresponde a la base de un contrafuerte del Claustro afectada por dicho fenómeno.

5.2. Espectrorradiometría (ER)

En las Figura 11(A y B) presentamos dos de los espectros de reflexión obtenidos para dos de las muestras de las que se dispuso. La primera corresponde a piedra de Laspra y la segunda a Piedramuelle. Destaca la distribución, prácticamente lineal, de los espectros, con pendiente creciente hacia la banda correspondiente al amarillo, que se corresponde, en todos los casos, al color característico de las muestras de las que se partía (blanco-amarillento).

Sin embargo, es interesante observar la formación de pequeños picos a 550 nm (visible) y 770 nm (infrarrojo próximo) en las muestras de Piedramuelle, que se definen más claramente según aumenta la profundidad de corte de las diferentes muestras.

Dado el carácter lineal de los espectros, se opta por el análisis de los mínimos y máximos de reflectancia, los cuales se acaban produciendo, aproximadamente, a los 400 y 1.100 nm. En la Tabla 3 se resumen los datos obtenidos para cada una de las muestras y para cada profundidad escogida.

En todas las muestras estudiadas, los valores máximos y mínimos de las reflectancias se encuentran situados en las muestras cortadas a 1 cm de profundidad, pudiéndose observar tendencias de variación cercanas, según se trate de muestras de Laspra o bien de Piedramuelle.

Las mayores variaciones se observan en la piedra de Laspra (en porcentajes muy parecidos en ambas muestras), lo cual se corresponde a su mayor porosidad (capacidad de absorción) respecto a las piedras de Piedramuelle.

En el caso de las muestras de Piedramuelle, la variación parece ser ligeramente menor, cosa que concuerda con el menor grado de alteración de la misma. Parece ser posi-

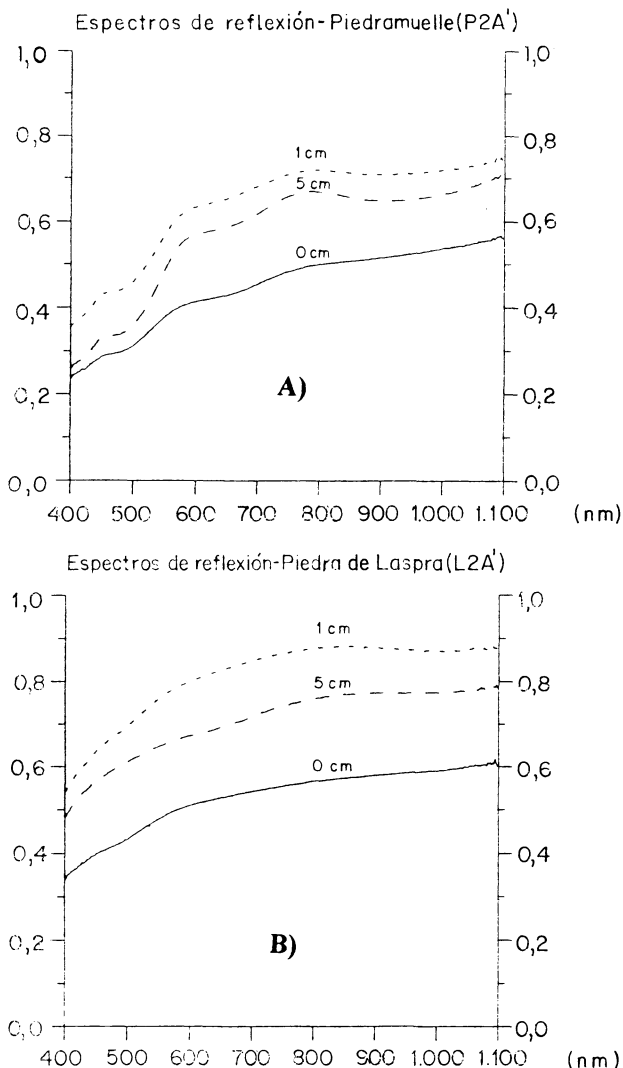


Fig. 11.- Muestras cortadas a 0, 1, y 5 cm, han sido estudiadas mediante espectrorradiometría de reflexión. A) Piedra de Laspra. B) Piedramuelle.

TABLA III

Valores máximos y mínimos de los espectros de reflexión obtenidos de las muestras analizadas a diferentes profundidades de corte

MUESTRA	Prof.	Mín Reflectancia		Máx. Reflectancia	
	cm		%		%
Laspra L2A	0	0,23	44	0,51	61
	1	0,52	100	0,84	100
	5	0,46	88	0,81	96
Laspra L2A'	0	0,34	63	0,62	70
	1	0,54	100	0,88	100
	5	0,48	88	0,79	89
Piedramuelle P1	0	0,16	57	0,66	69
	1	0,28	100	0,95	100
	5	0,26	91	0,92	97
Piedramuelle P2A	0	0,27	90	0,60	85
	1	0,30	100	0,70	100
	5	0,29	97	0,70	100
Piedramuelle P2A'	0	0,24	68	0,57	76
	1	0,35	100	0,75	100
	5	0,26	74	0,71	80

ble comparar las dos situaciones en resistencia a la alteración diferencial entre ambas en un porcentaje del 10%.

En la Figura 12 (A y B) se representa gráficamente la información resumida en la Tabla 3. Los resultados obtenidos sugieren la adopción de un modelo de alteración proporcional a la profundidad siguiendo una relación del tipo:

$$\rho = A + Be^{-kx} \quad [3]$$

aunque este modelo debería ser refrendado por análisis más detallados que no se han podido realizar en el marco del proyecto.

6. Conclusiones

Del trabajo experimental, y a modo de resumen, se concluye que:

I) Los materiales introducidos con motivo de restauraciones son fácilmente observables, puesto que la imagen infrarroja aumenta el contraste entre el material original y el introducido en la restauración, debido a sus diferentes propiedades térmicas o emisivas. Para evitar la aparición de patologías, como por ejemplo condensaciones intersticiales, que contribuyan a la degradación de los

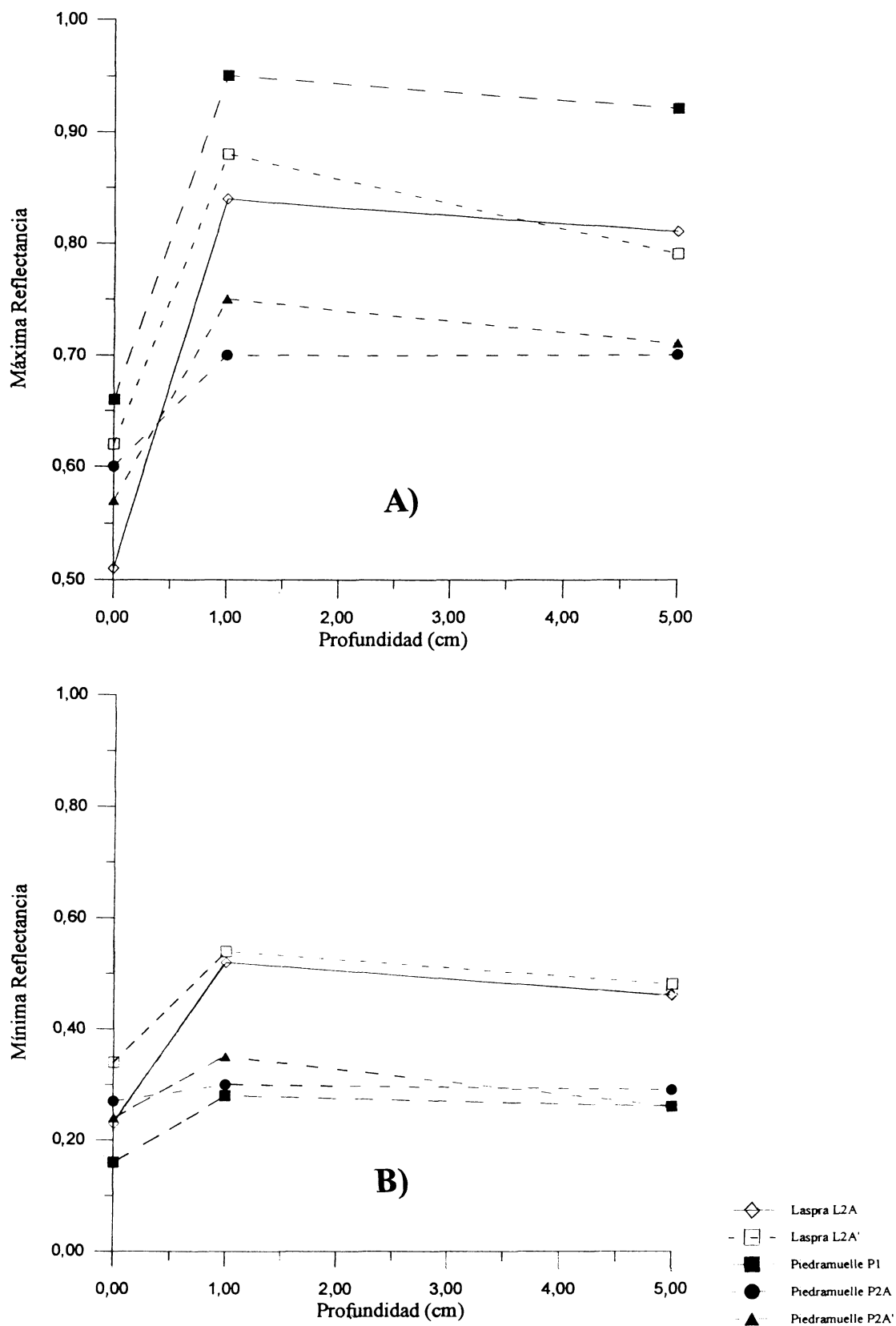


Fig. 12.- En la figura se representan los valores máximos A) y mínimos B) de los espectros de reflexión de cada muestra estudiada y por cada profundidad de corte. La variación observada sugiere un posible modelo de alteración del tipo presentado en el texto.

mismos, las actuaciones de restauración se deberían realizar con materiales de características térmicas similares.

II) Con la TIR se manifiestan, claramente, los materiales alterados de los que no lo están, deduciéndose también de ello que los materiales en buen estado de conservación se encuentran a una temperatura superficial sensiblemente más baja que el resto ("se puede decir que transpiran mejor"). Sin embargo, esto no puede ser generalizado para cualquier situación, pero sí se puede afirmar que, para una situación determinada particular, la TIR permite distinguir zonas de propiedades emisivas diferentes. Con la ayuda de otros análisis se puede determinar su correlación con el grado de alteración. Las imágenes obtenidas permiten, pues, una extrapolación de la alteración para aquel caso concreto, además de permitir realizar una evaluación del área afectada.

III) Algunos bloques del mismo material presentan temperaturas o emisividades superficiales diferentes, que consideramos pueden ser debidas al tipo de corte en cantera. Mediante la TIR, en la fase actual de trabajo, se hace muy difícil evaluar las diferencias de emisividades, ya que el margen de error puede ser del 30%, lo cual incide en el rango de lecturas experimentales.

IV) El análisis espectrorradiométrico permitiría llegar a una técnica de evaluación del grado de alteración de una roca en profundidad, cuya manejabilidad y sensibilidad puede ser de gran servicio en estudios de procesos de alteración y de las piedras monumentales, y que podrían dar lugar a un modelo o escala de alteración.

Agradecimientos

La realización del presente estudio ha sido llevada a cabo con el apoyo de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), mediante el contrato Pat.

91.1093-CO2-O2). Los autores desean hacer constar su agradecimiento por la ayuda recibida.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) ESBERT, ROSA M^a y MARCOS, ROSA M^a: *Las Piedras de la Catedral de Oviedo y su deterioración*. 1^a Edición. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias. Oviedo 1983.
- (2) ESBERT, ROSA M^a; MARCOS, ROSA M^a y ALONSO, J.: La deterioración de las Piedras de la Catedral de Oviedo. 1^a Parte: Petrografía y porosidad, características intrínsecas determinantes de la deterioración de sus rocas carbonatadas. *Materiales de Construcción*, nº 185, 1982, pp. 61-71.
- (3) ESBERT, ROSA M^a y MARCOS, ROSA M^a: La deterioración de las Piedras de la Catedral de Oviedo. 2^a Parte: Formas y Fenómenos de alteración. *Materiales de Construcción*, nº 186, 1982, pp. 79-88.
- (4) GAUSSORGUES, GILBERT.: *La Thermographie Infrarouge*. 3^a Edición. Technique et Documentation. Paris 1989.
- (5) GAYO, E.; PALOMO, A. y MACÍAS A.: La termografía infrarroja: posibilidades y aplicación al estudio superficial de los materiales. *Materiales de Construcción*, nº 227, 1992, pp. 5-14.
- (6) SERACINI, MAURIZIO: La termovisione come strumento di indagine non invasiva nella diagnostica architettonica. *Atti del 1^o convegno nazionale ASS.I.R.CO.* ASS.I.R.CO. Verona, Octubre 1981.
- (7) NAUTIYAL, A.R.: Leaf Spectral Signatures as an Index of Biomass Production Potential in Tree Species. *International Agrophysics*, nº 3, 1987, pp. 31-33.
- (8) RIORDAN, C ET AL. : Spectral Solar Radiation Data Base at SERI, *Solar Energy*, nº 42, 1989, pp. 67-79.

* * *

Annex 3: FITXA INFORMES TERMOGRAFIA

INFORME XX: UBICACIÓ

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
SP1
SP2
SP3
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

IMATGE DIGITAL

INFORMACIÓ IMATGE
Model Càmera
Lent
Resolució IR
Data creació

 PLÀNOL PLANTA

TIPUS DE TERMOGRAFIA: OMPLIR

MATERIAL UTILITZAT: OMPLIR

VALORACIÓ: OMPLIR

Annex 4: FITXA INFORMES TERMOGRAFIA ACTIVA

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

Descripció fase termografia activa

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

Descripció fase termografia activa

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

Imatge termogràfica durant el procés d'escalfat.

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

Descripció fase termografia activa

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

Descripció fase termografia activa

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

Descripció fase termografia activa

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

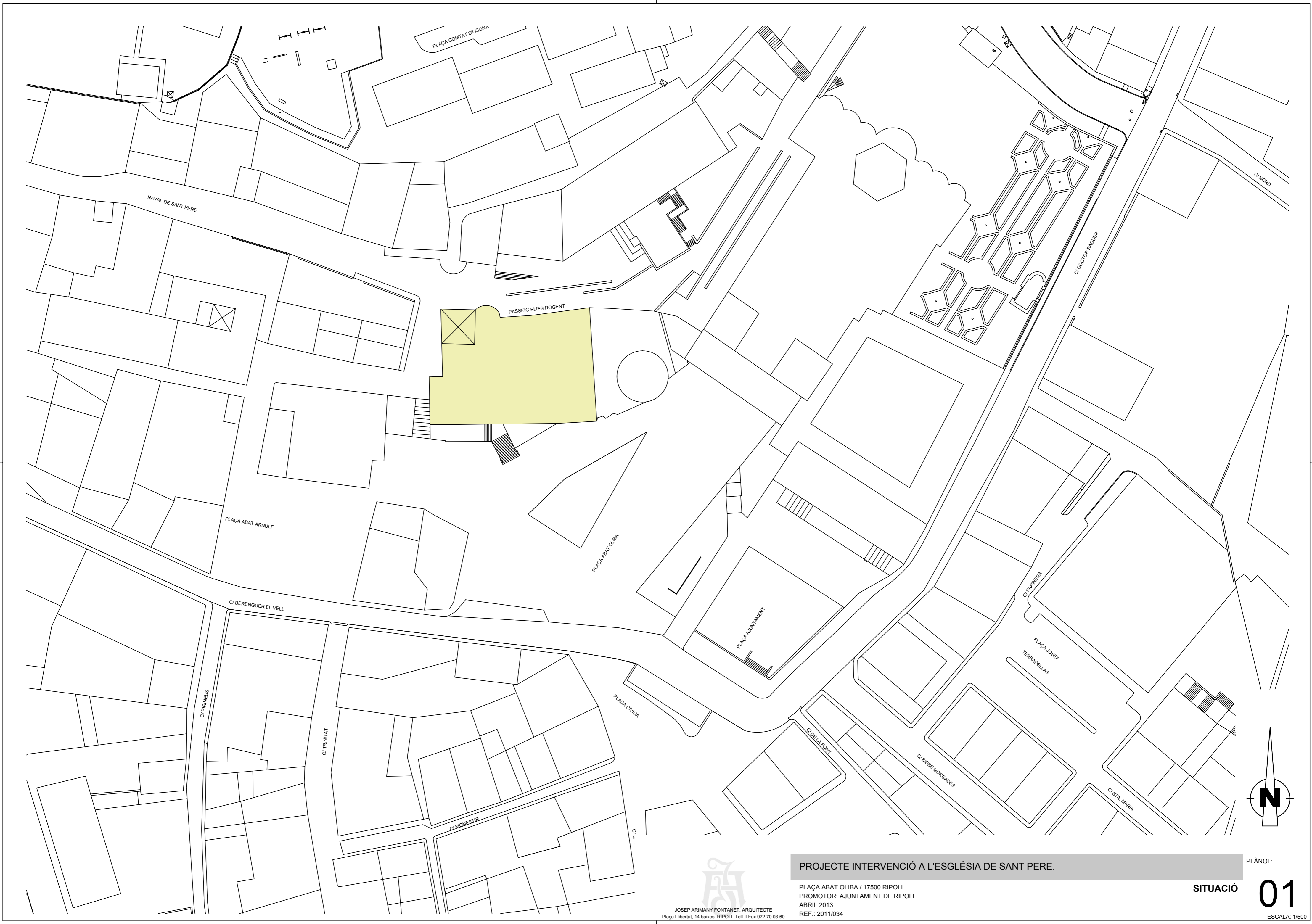
Descripció fase termografia activa

IMATGE TERMOGRAFIA

PARÀMETRES
Tº màx
Emissivitat
T. Reflectida
Distància
T. Atmosferica
Humitat relativa

Descripció fase termografia activa

Annex 5: PLÀNOLS SANT PERE DE RIPOLL



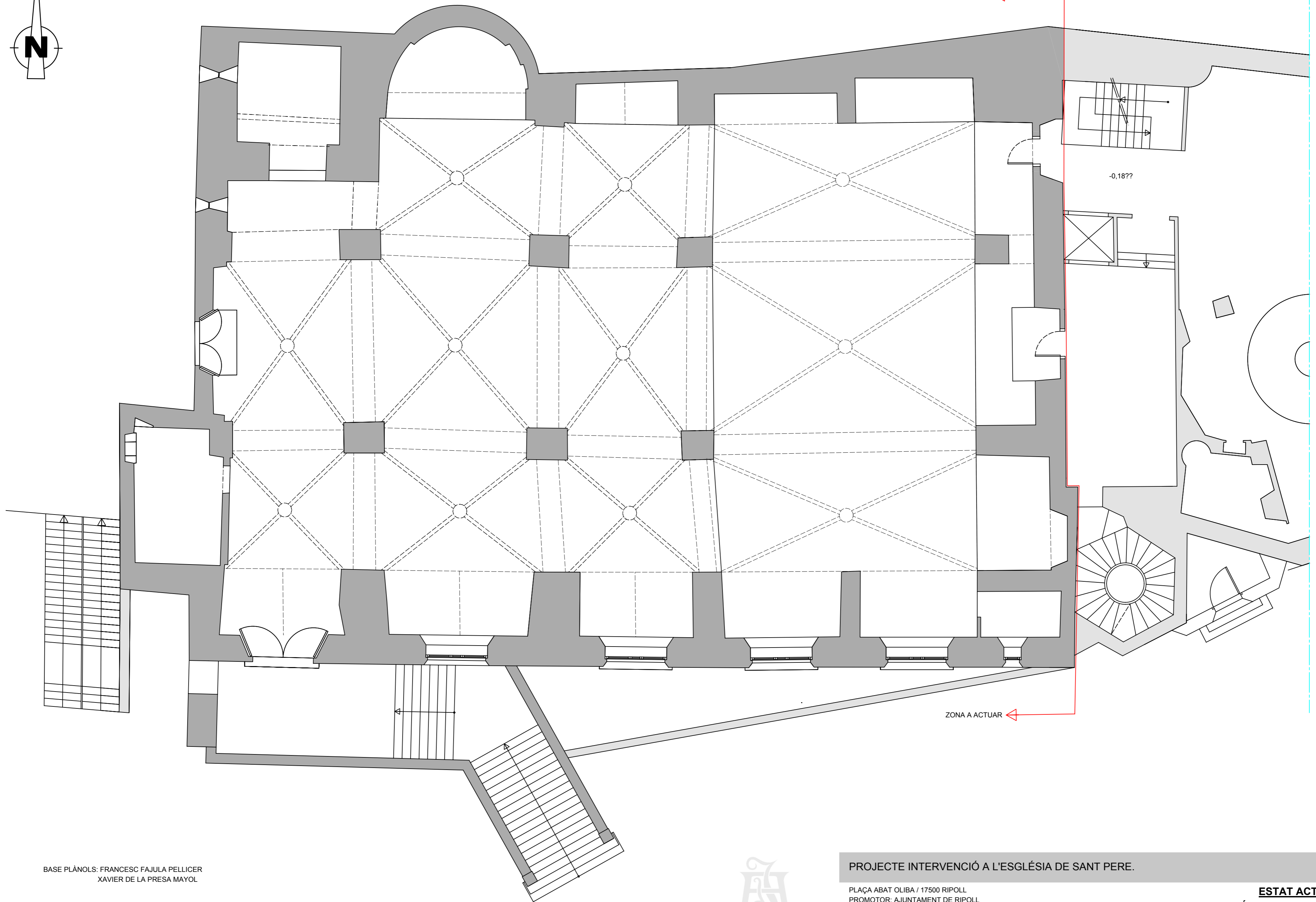
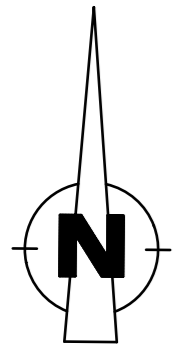
PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

PLÀNOL:

PLAÇA ABAT OLIVA / 17500 RIPOLL
 PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
 ABRIL 2013
 REF.: 2011/034

SITUACIÓ

01



BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL


JOSEP ARIMANY FONTANET. ARQUITECTE
Plaça Llibertat, 14 baixos. RIPOLL Telf. i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

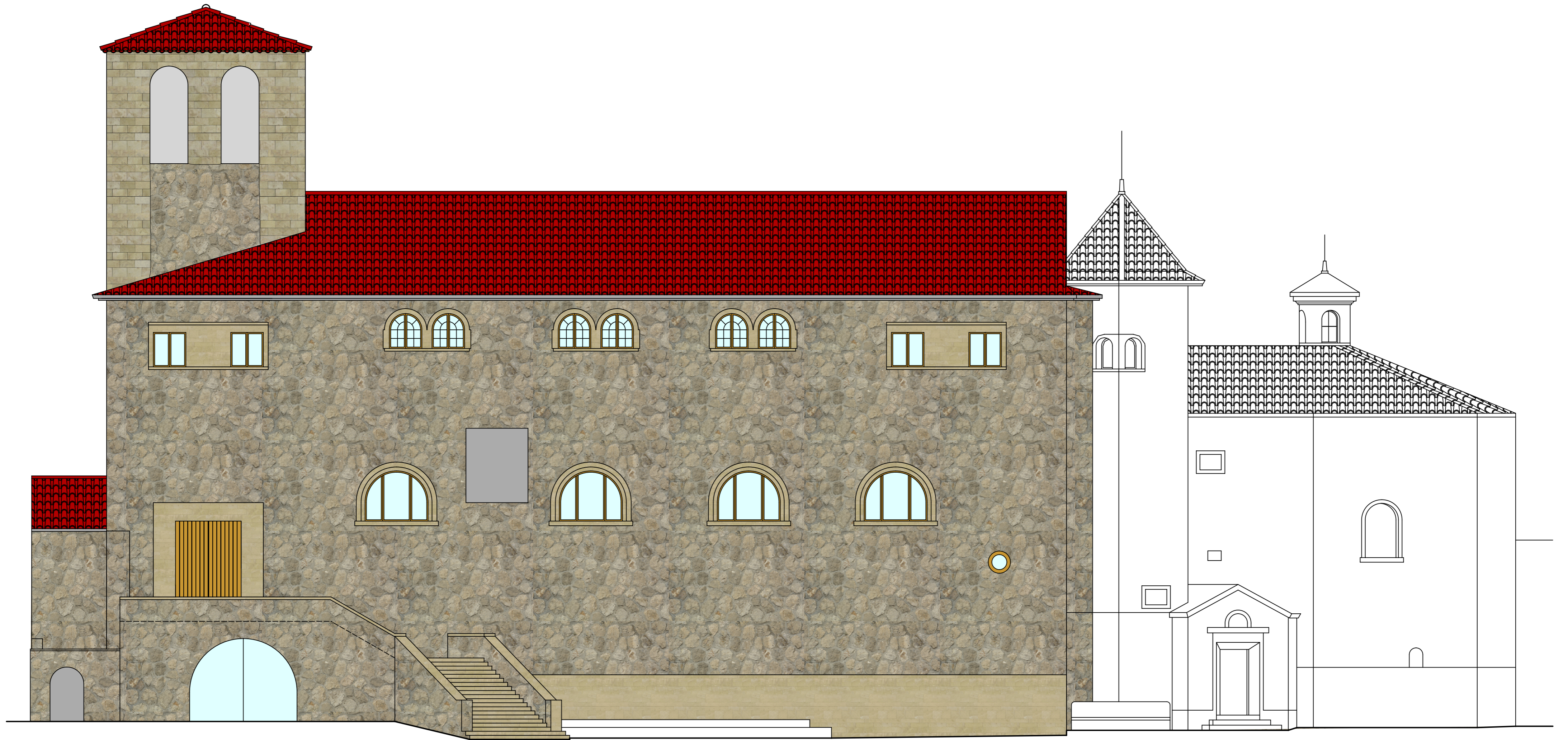
PLÀNOL:

PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
ABRIL 2013
REF.: 2011/034

ESTAT ACTUAL
PROJECCIÓ VOLTES SOSTRE

03

ESCALA: 1/100



BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL


JOSEP ARIMANY FONTANET, ARQUITECTE
Plaça Llibertat, 14 baixos, RIPOLL Telf. i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

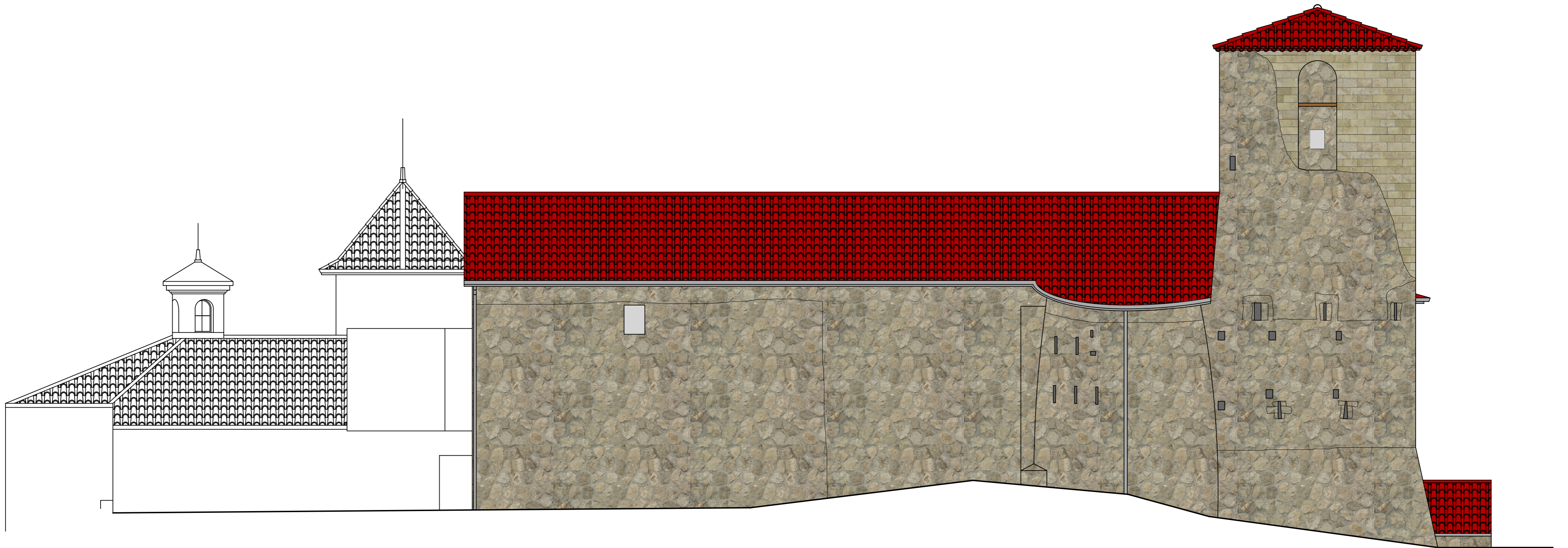
PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
ABRIL 2013
REF.: 2011/034

ESTAT ACTUAL
FAÇANA SUD

PLÀNOL:

04

ESCALA: 1/100



BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL


JOSEP ARIMANY FONTANET. ARQUITECTE
Plaça Llibertat, 14 baixos. RIPOLL. Telf. i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

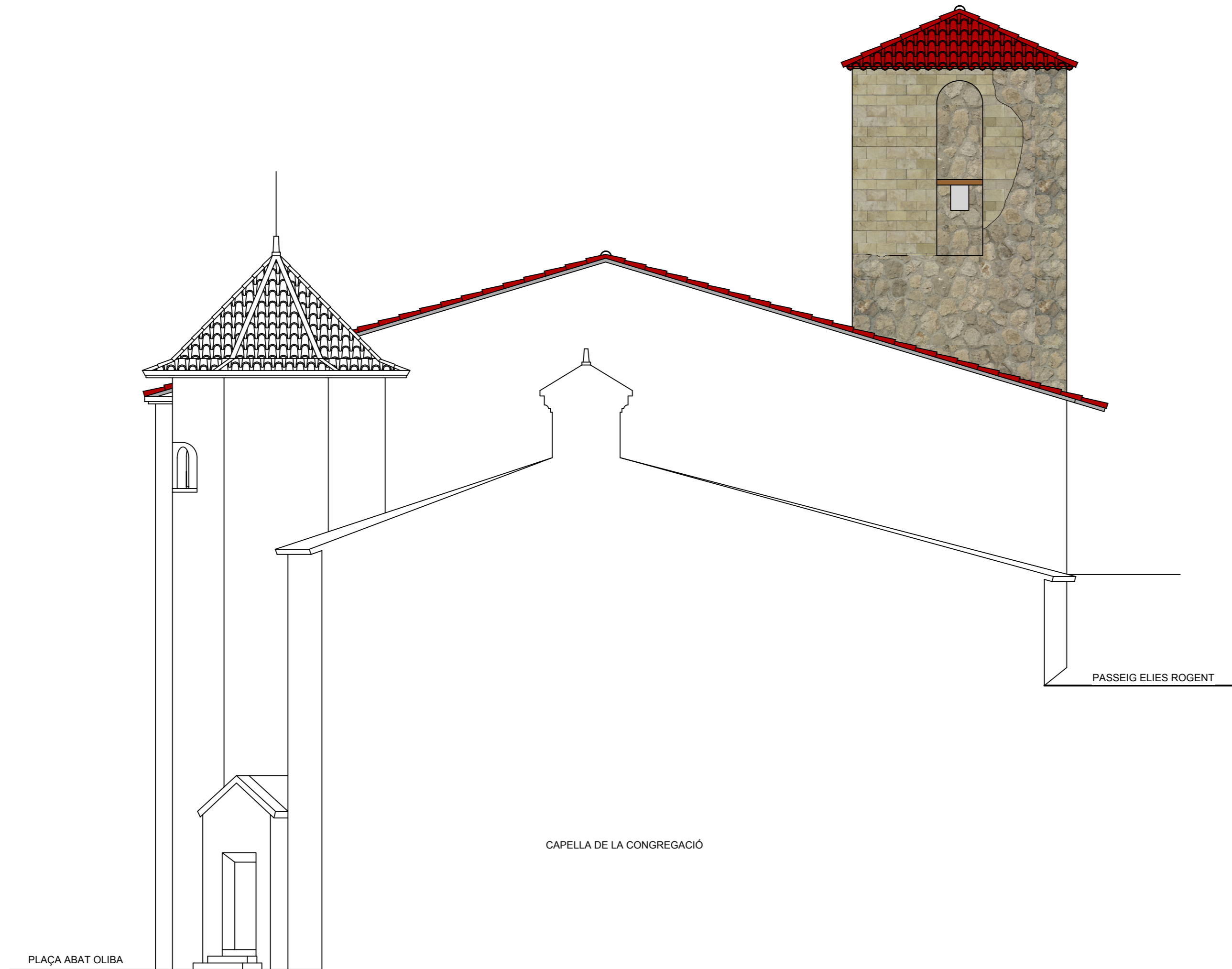
PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
ABRIL 2013
REF.: 2011/034

ESTAT ACTUAL
FAÇANA NORD

PLÀNOL:

05

ESCALA: 1/100



BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL


 JOSEP ARIMANY FONTANET. ARQUITECTE
 Plaça Llibertat, 14 baixos. RIPOLL Telf. i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

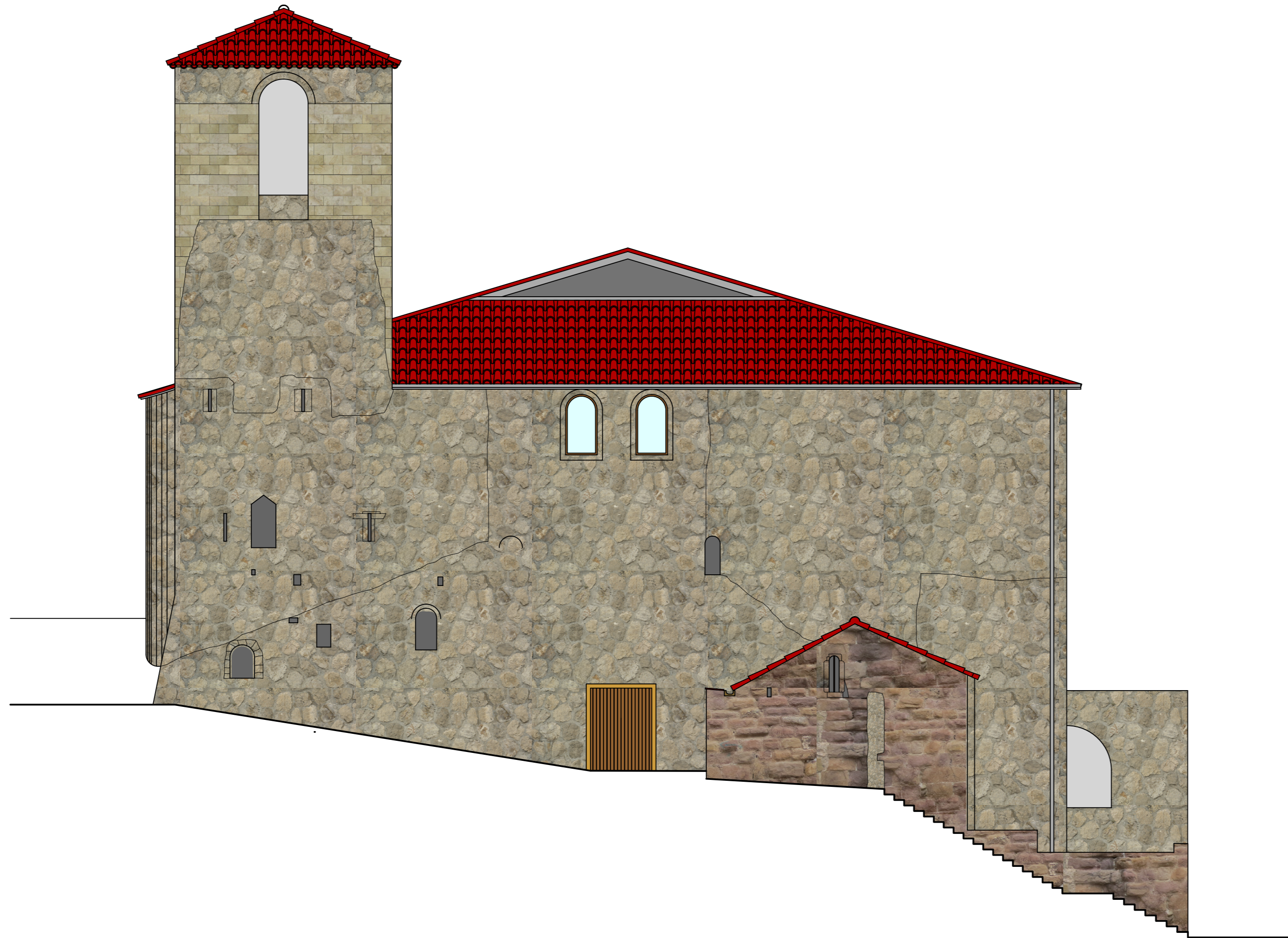
PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
 PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
 ABRIL 2013
 REF.: 2011/034

ESTAT ACTUAL
FAÇANA EST

PLÀNOL:

06

ESCALA: 1/100



BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL


JOSEP ARIMANY FONTANET. ARQUITECTE
Plaça Llibertat, 14 baixos. RIPOLL Telf. i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

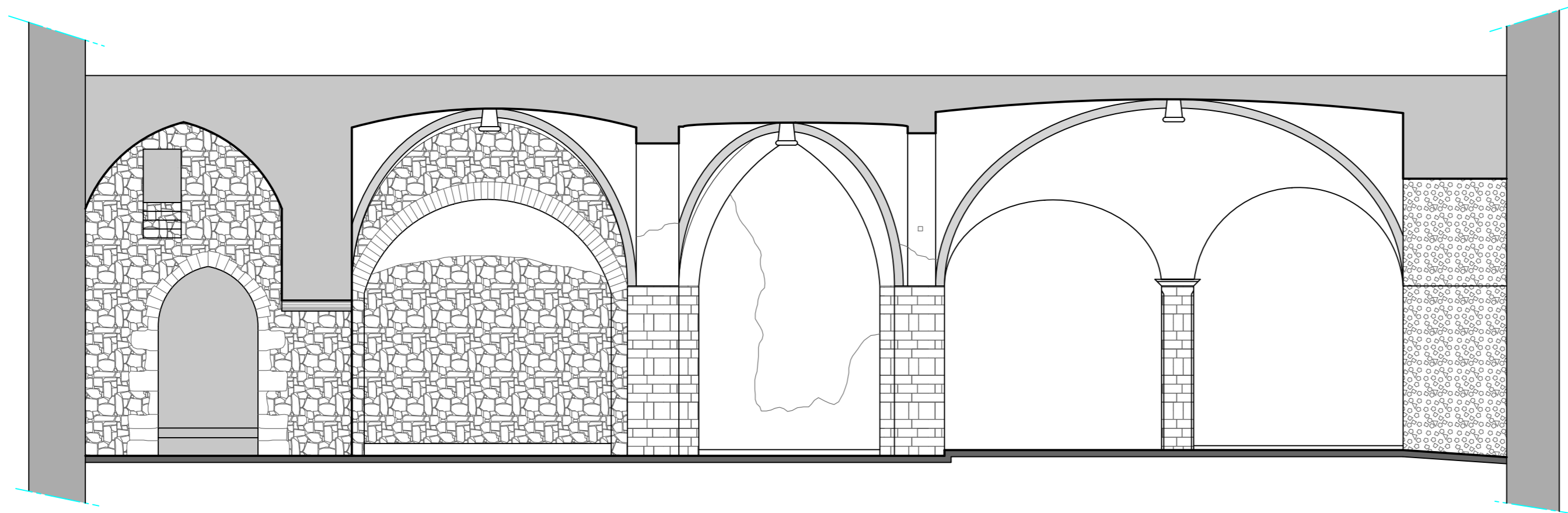
PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
ABRIL 2013
REF.: 2011/034

ESTAT ACTUAL
FAÇANA OEST

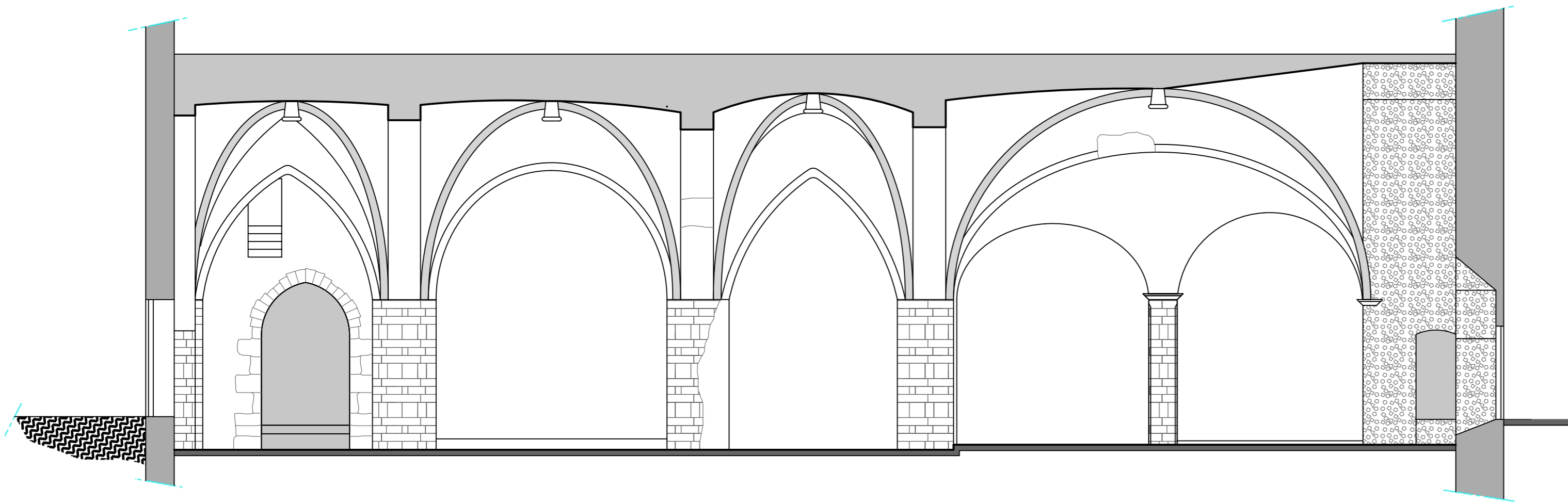
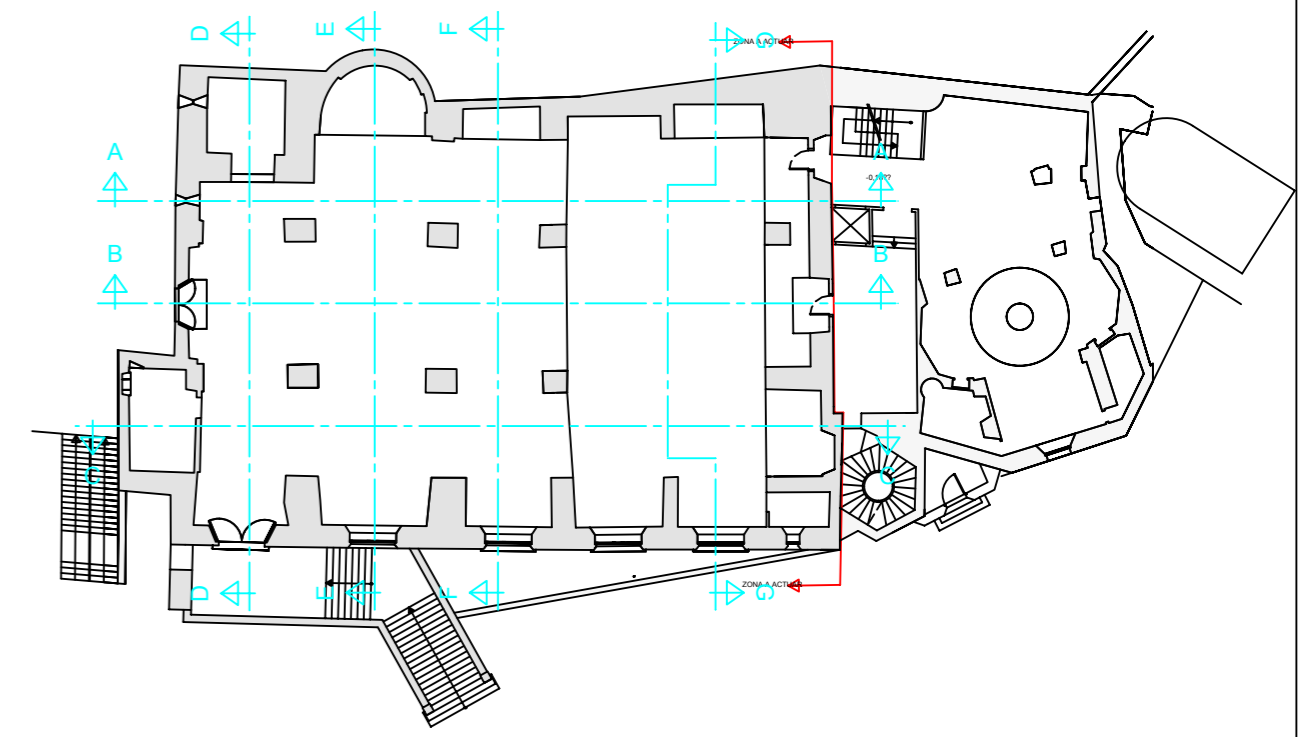
PLÀNOL:

07

ESCALA: 1/100



SECCIÓ A



SECCIÓ B

BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL


 JOSEP ARIMANY FONTANET. ARQUITECTE
 Plaça Llibertat, 14 baixos. RIPOLL. Telf. i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

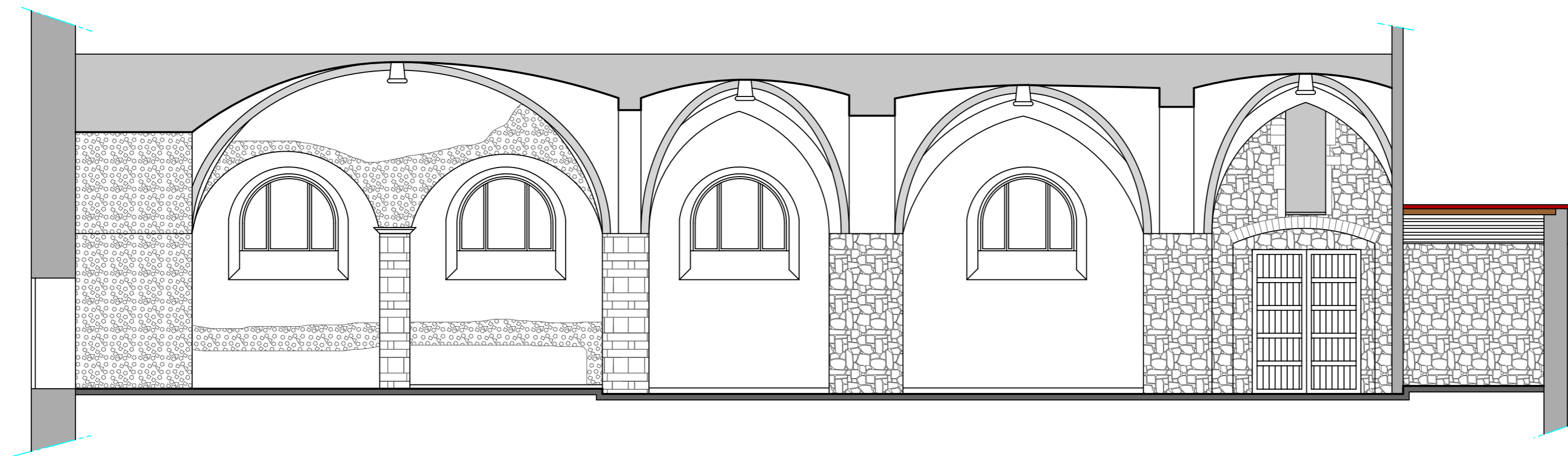
PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
 PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
 ABRIL 2013
 REF.: 2011/034

ESTAT ACTUAL
SECCIONS A i B

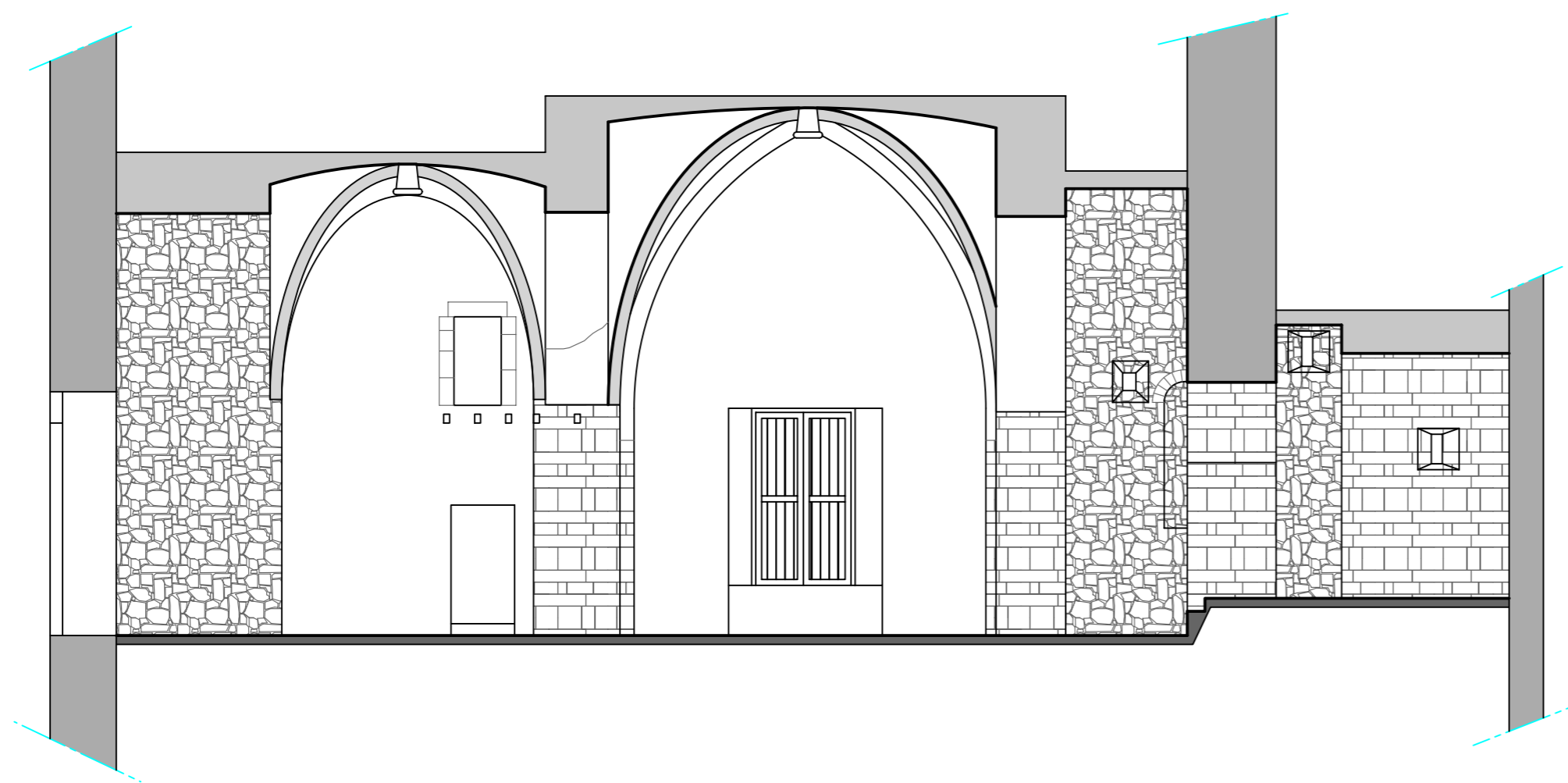
PLÀNOL:

08

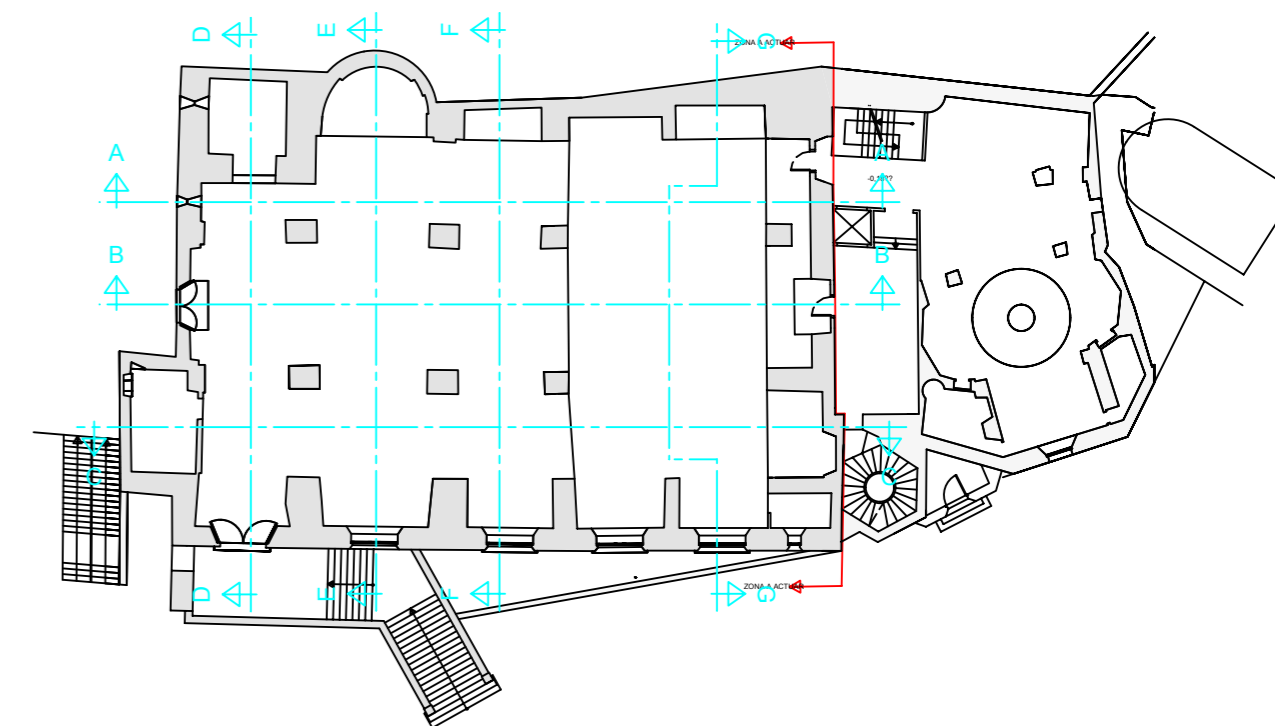
ESCALA: 1/100

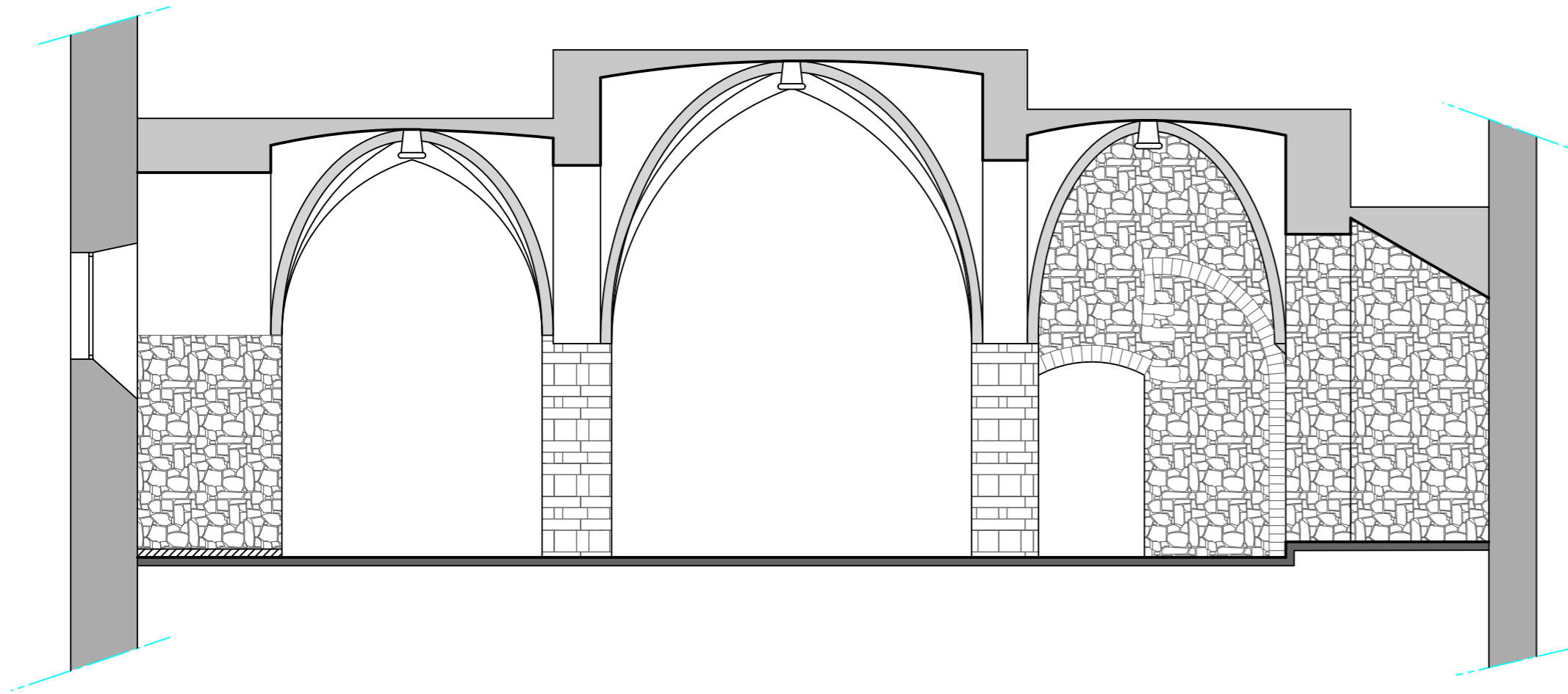


SECCIÓ C

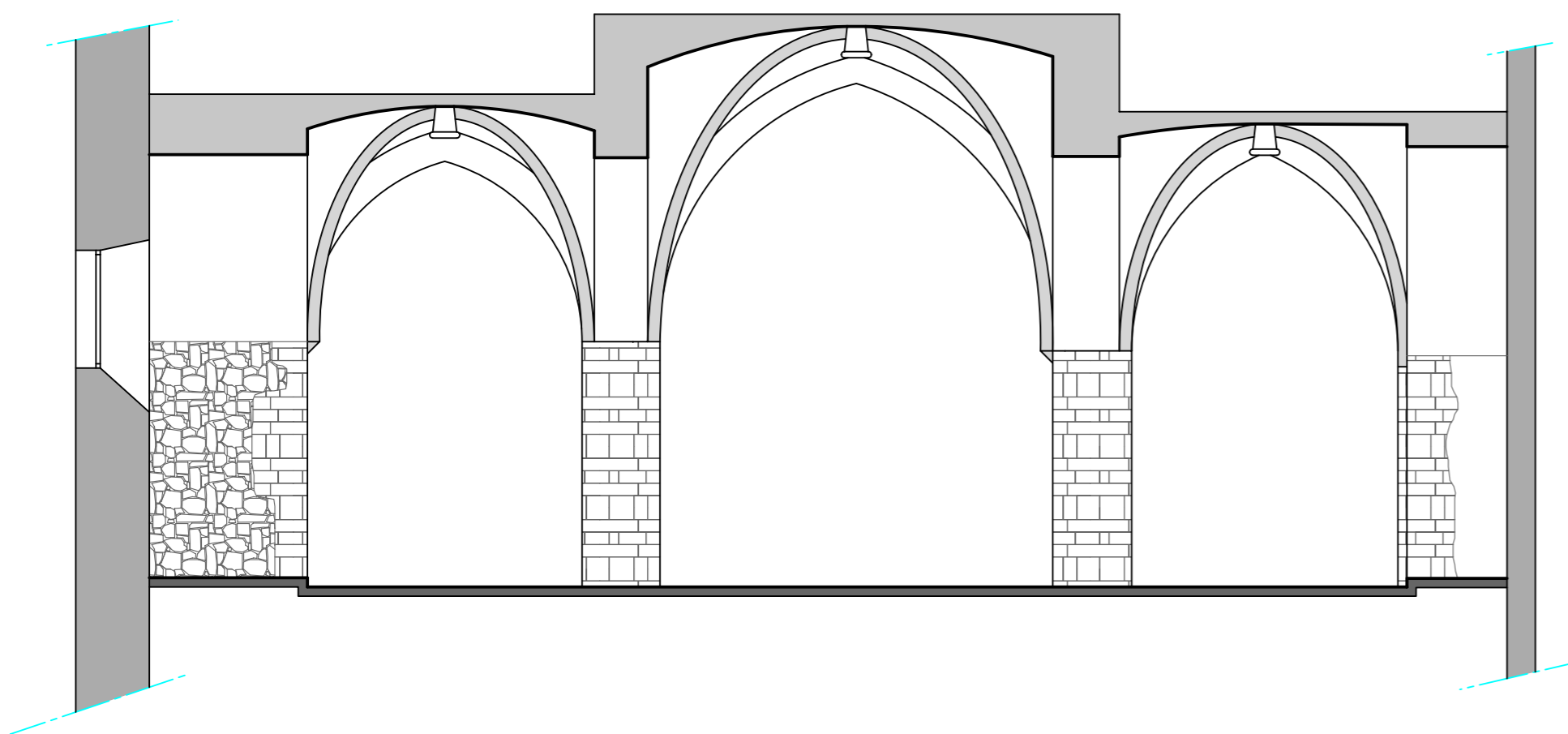
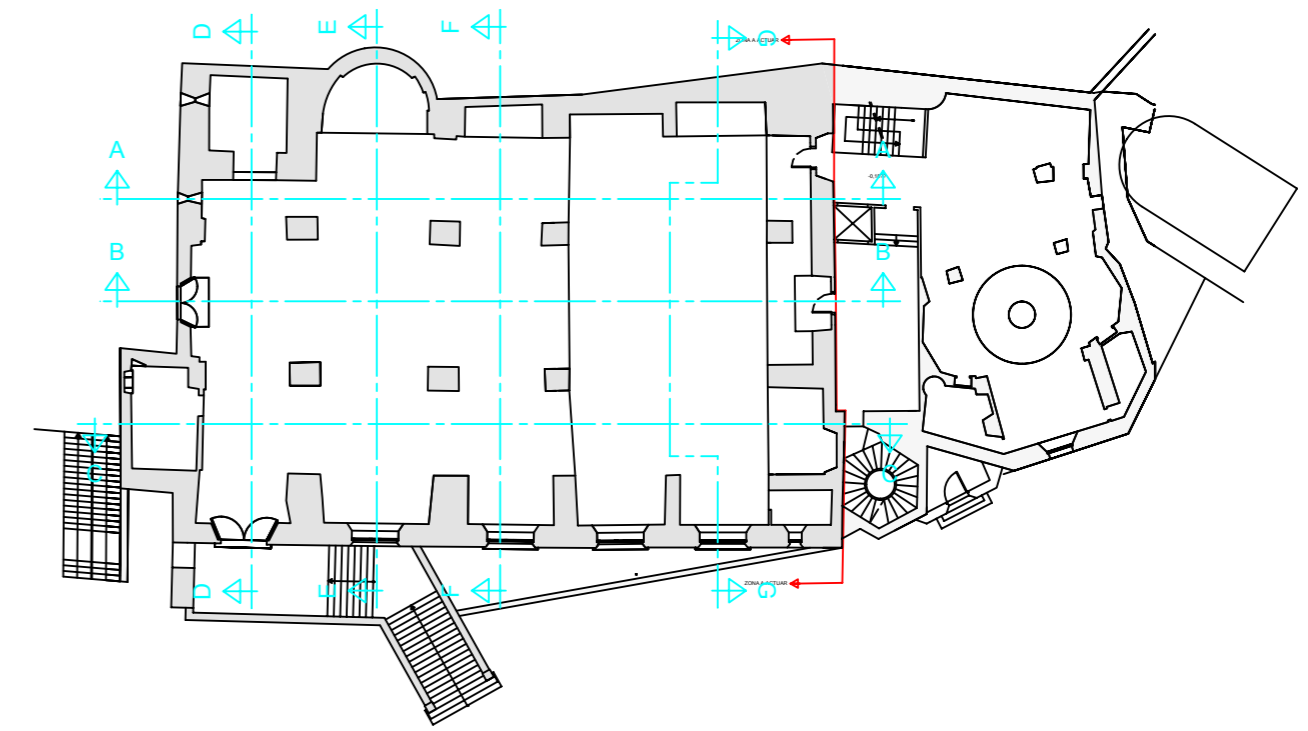


SECCIÓ D

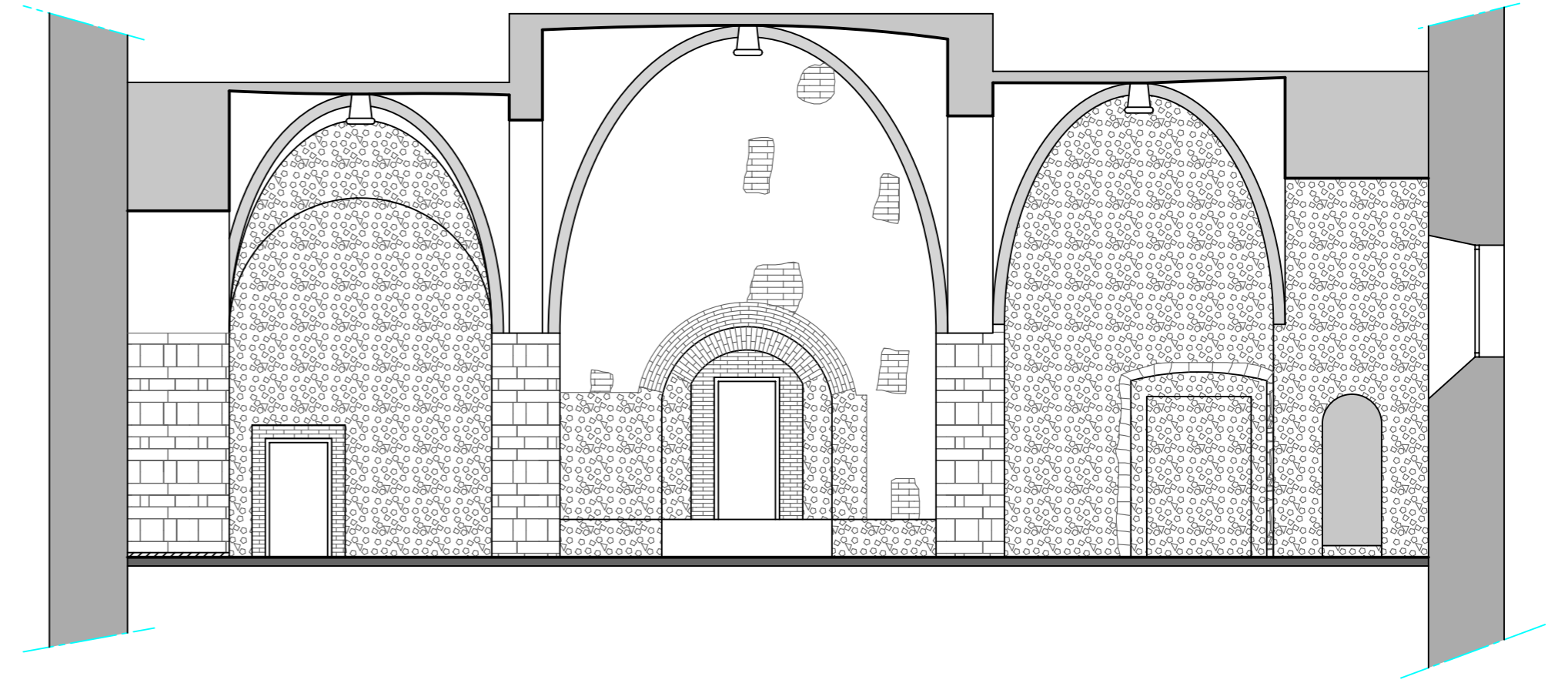




SECCIÓ E



SECCIÓ F



SECCIÓ G

BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL

JOSEP ARIMANY FONTANET. ARQUITECTE
Plaça Libertat, 14 baixos. RIPOLL. Telf: i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
ABRIL 2013
REF.: 2011/034

ESTAT ACTUAL
SECCIONS E, F i G

PLÀNOL:

10

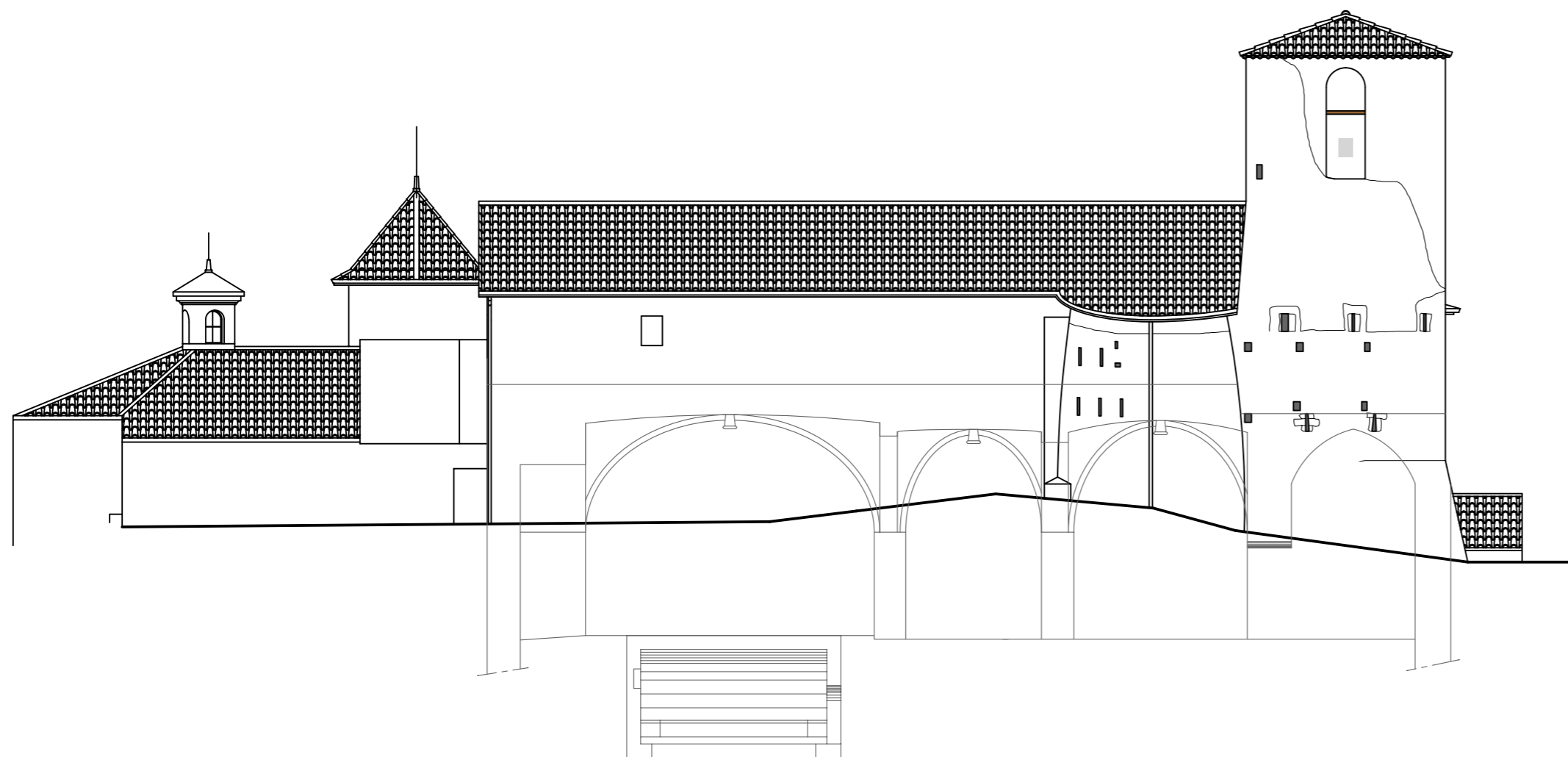
ESCALA: 1/100



FAÇANA SUD



FAÇANA OEST



FAÇANA NORD

BASE PLÀNOLS: FRANCESC FAJULA PELLICER
XAVIER DE LA PRESA MAYOL

JOSEP ARIMANY FONTANET, ARQUITECTE
Plaça Llibertat, 14 baixos, RIPOLL, Telf. i Fax 972 70 03 60

PROJECTE INTERVENCIÓ A L'ESGLÉSIA DE SANT PERE.

PLAÇA ABAT OLIBA / 17500 RIPOLL
PROMOTOR: AJUNTAMENT DE RIPOLL
ABRIL 2013
REF.: 2011/034

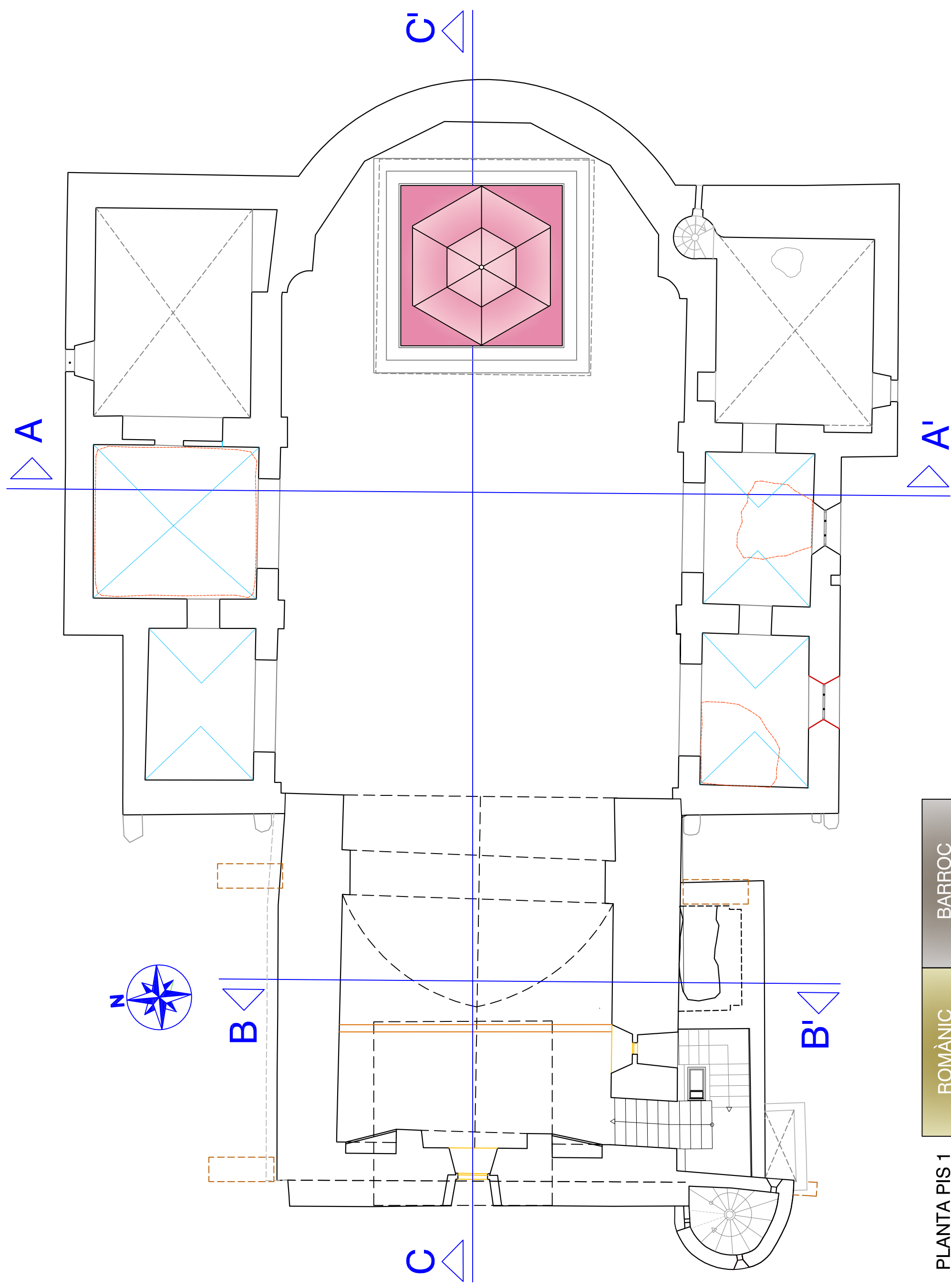
ESTAT ACTUAL
FAÇANES AMB PROJECCIÓ INTERIOR

PLÀNOL:

11

ESCALA: 1/200

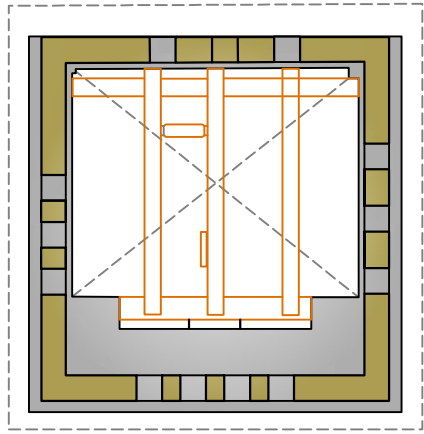
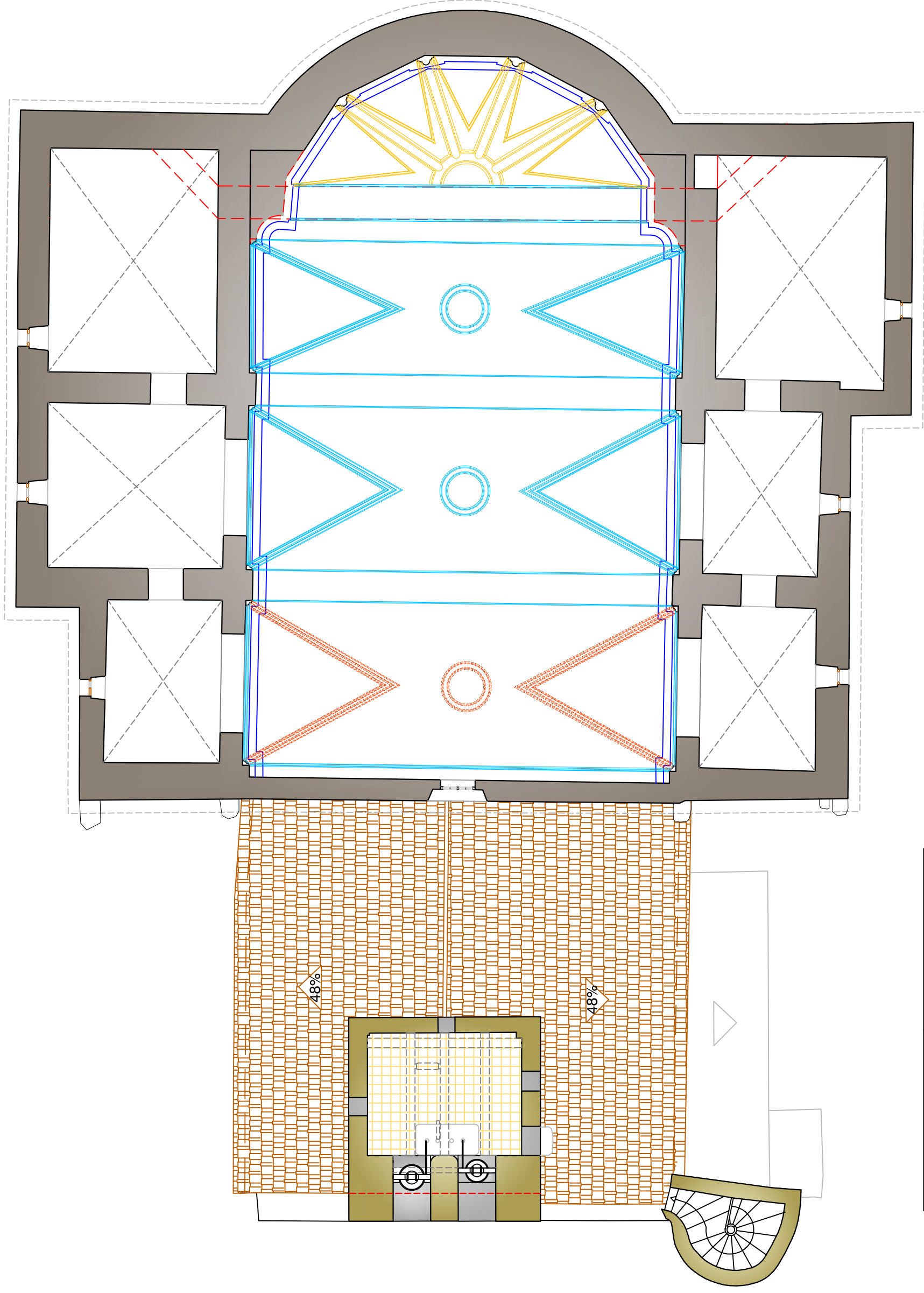
Annex 6: PLÀNOLS SANT JULIÀ DE VALLFOGONA



PLANTA PIS 1

ROMÀNIC

BARROC

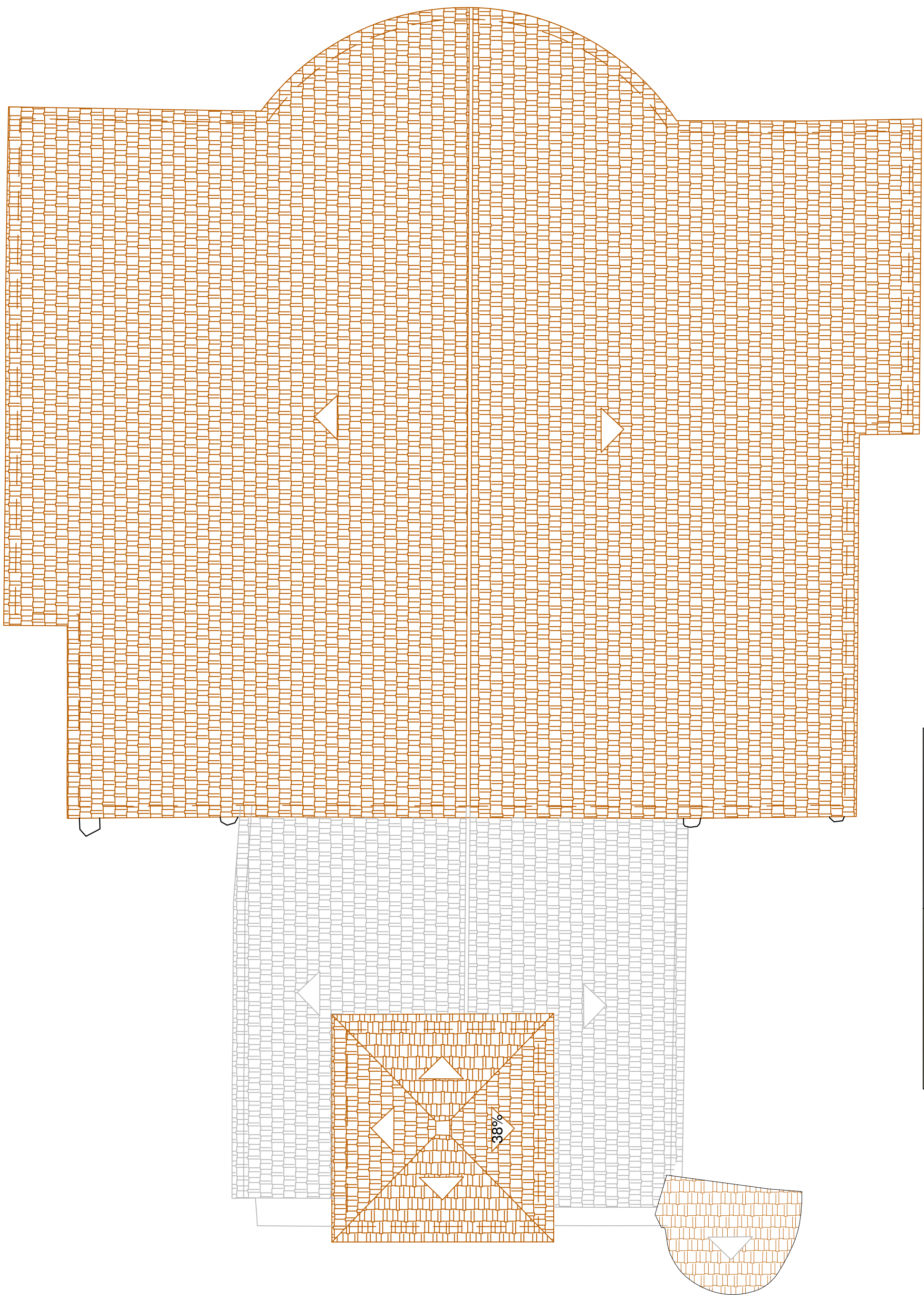


PLANTA PIS 3

PLANTA PIS 2

ROMÀNIC

BARROC

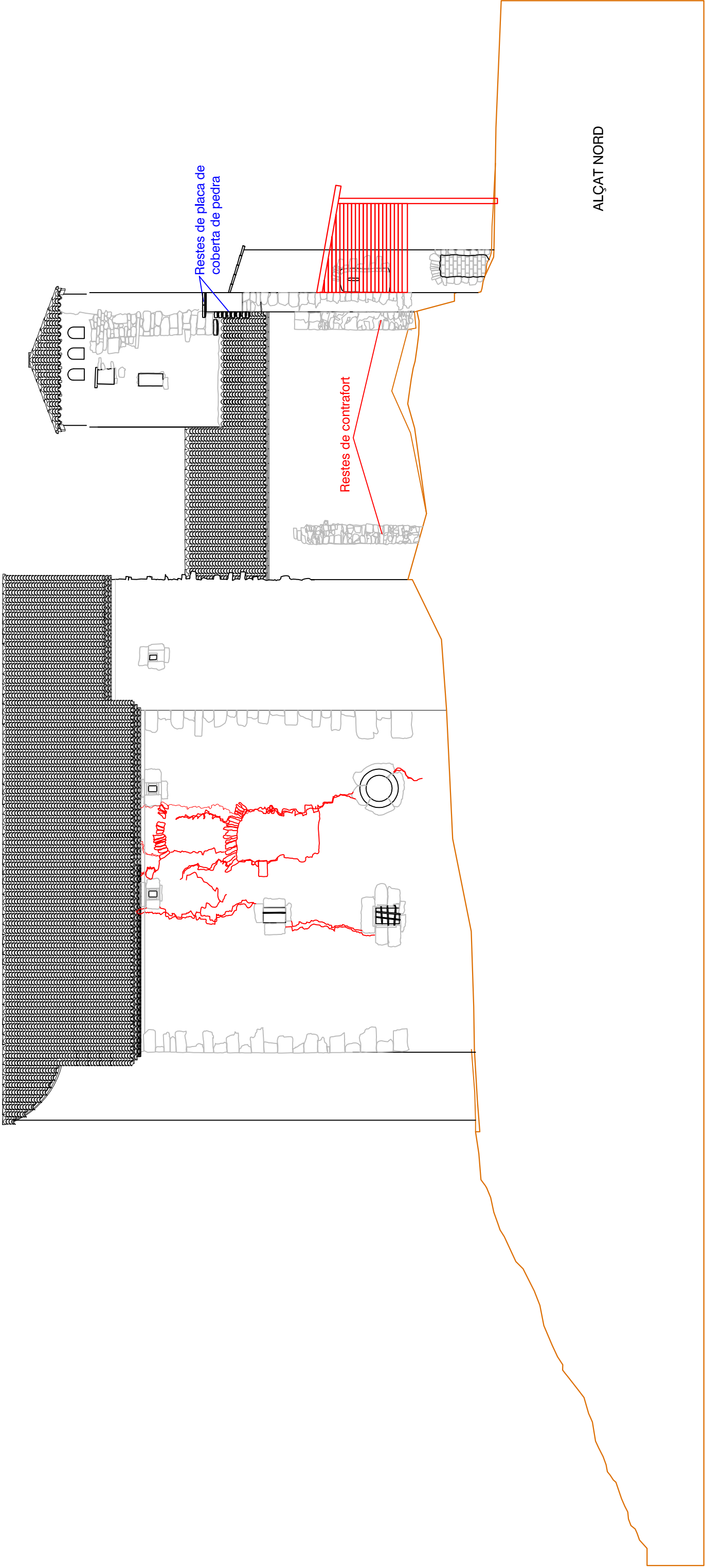


PLANTA COBERTA

ROMÀNIC

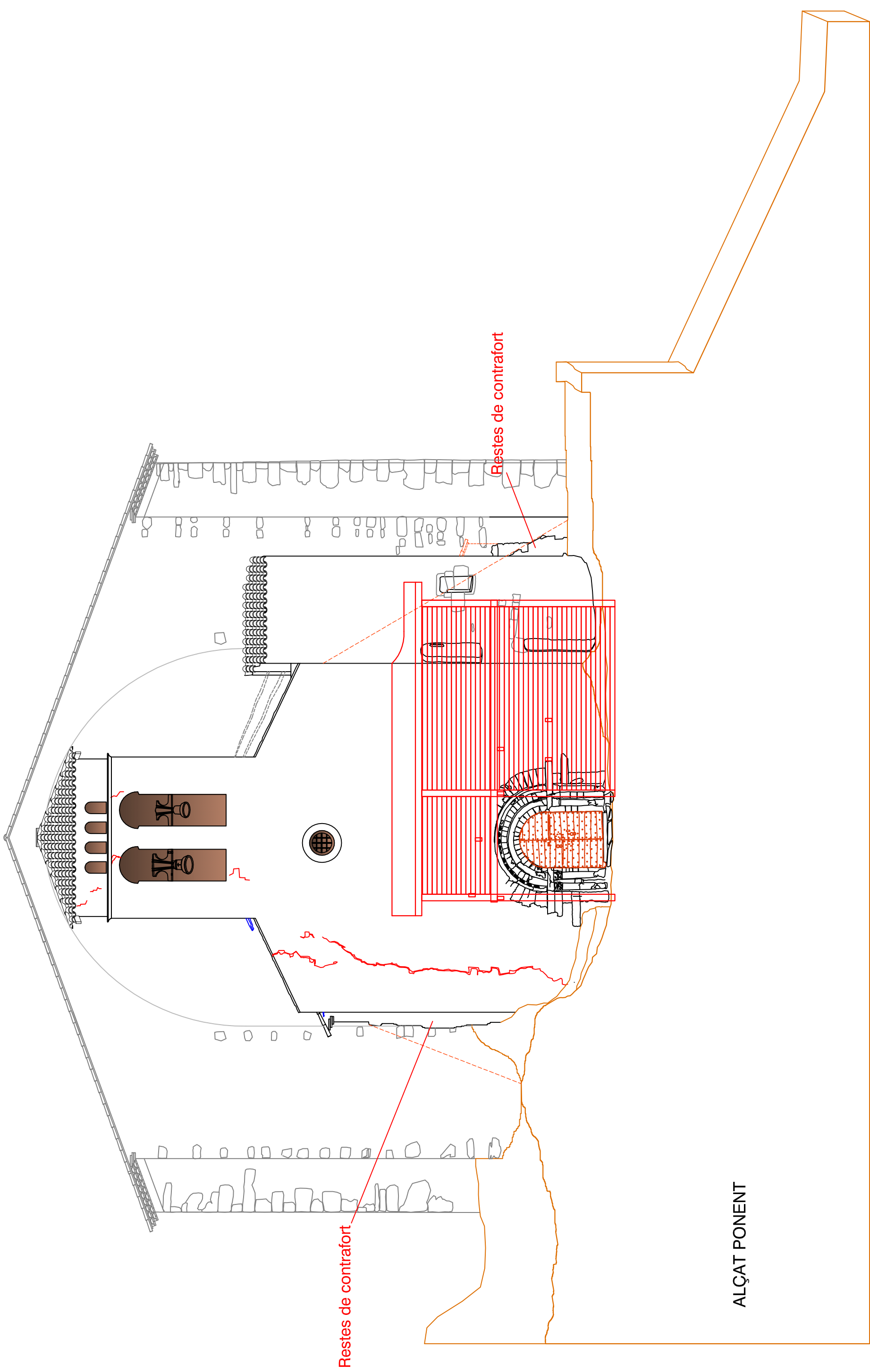
BARROC

JORDI SALVAT I COMAS



ALÇAT NORD

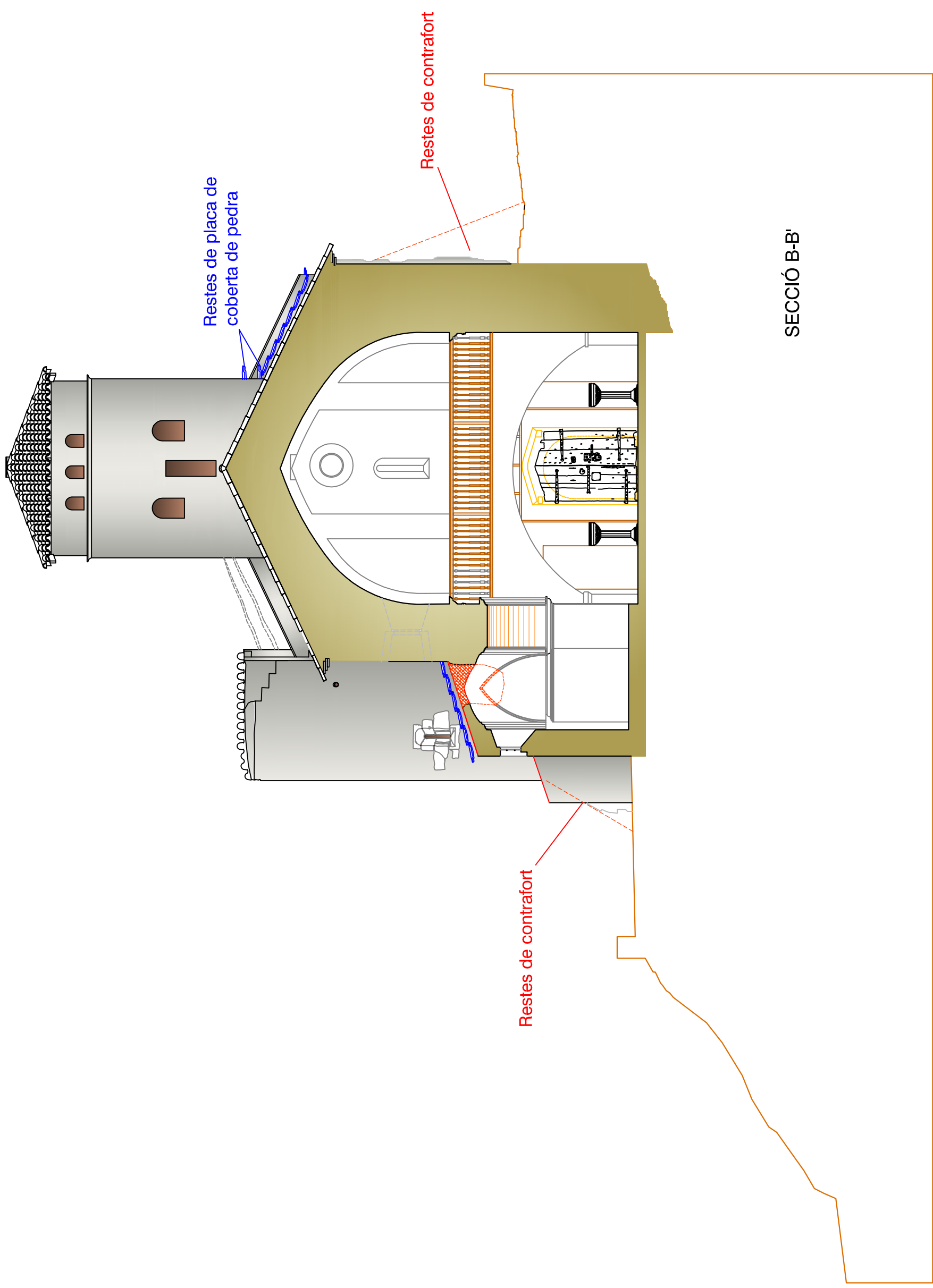
JORDI SALVAT I COMAS



Restes de contrafort

Restes de contrafort

ALÇAT PONENT

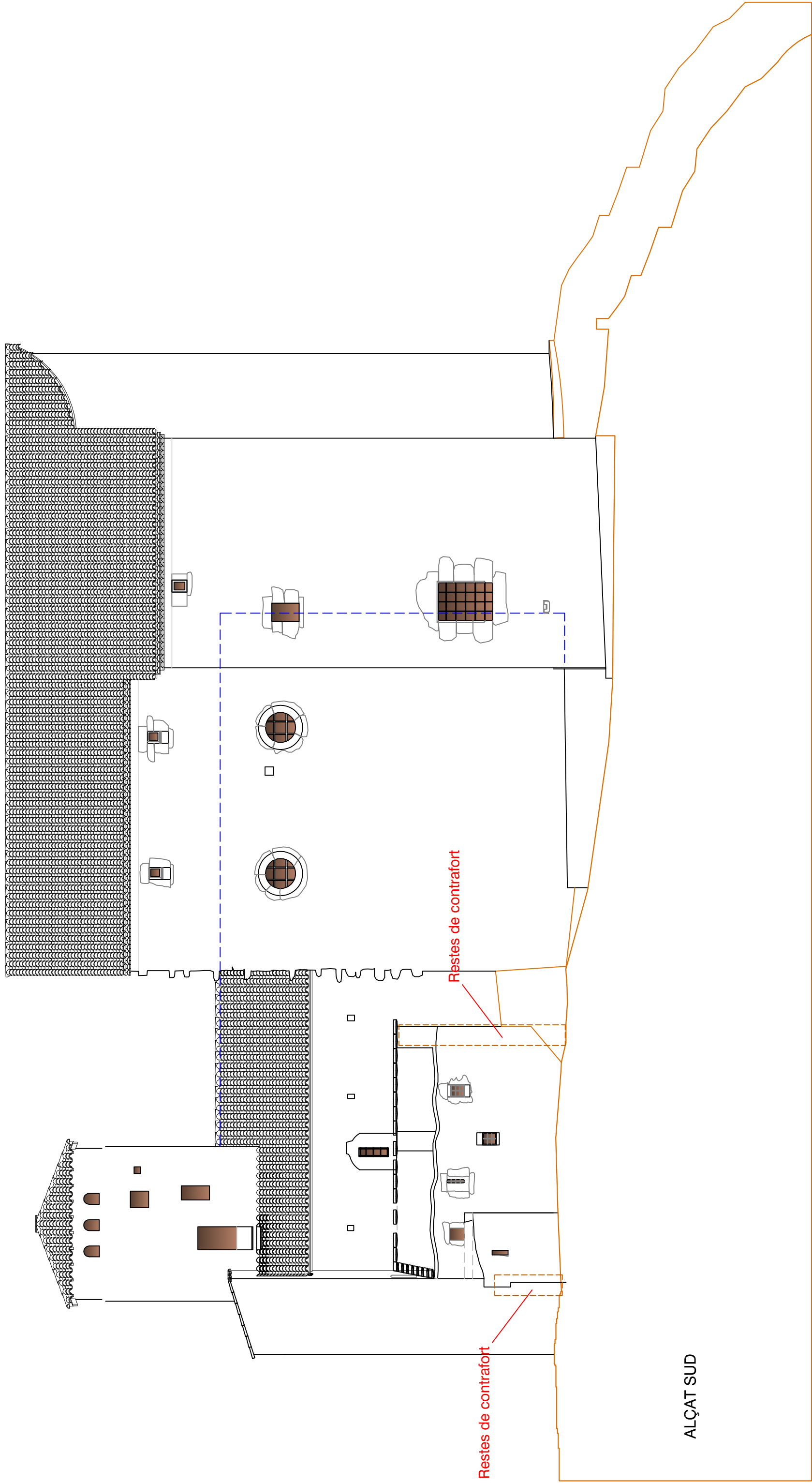


SECCIÓ B-B'

ROMÀNIC

BARROC

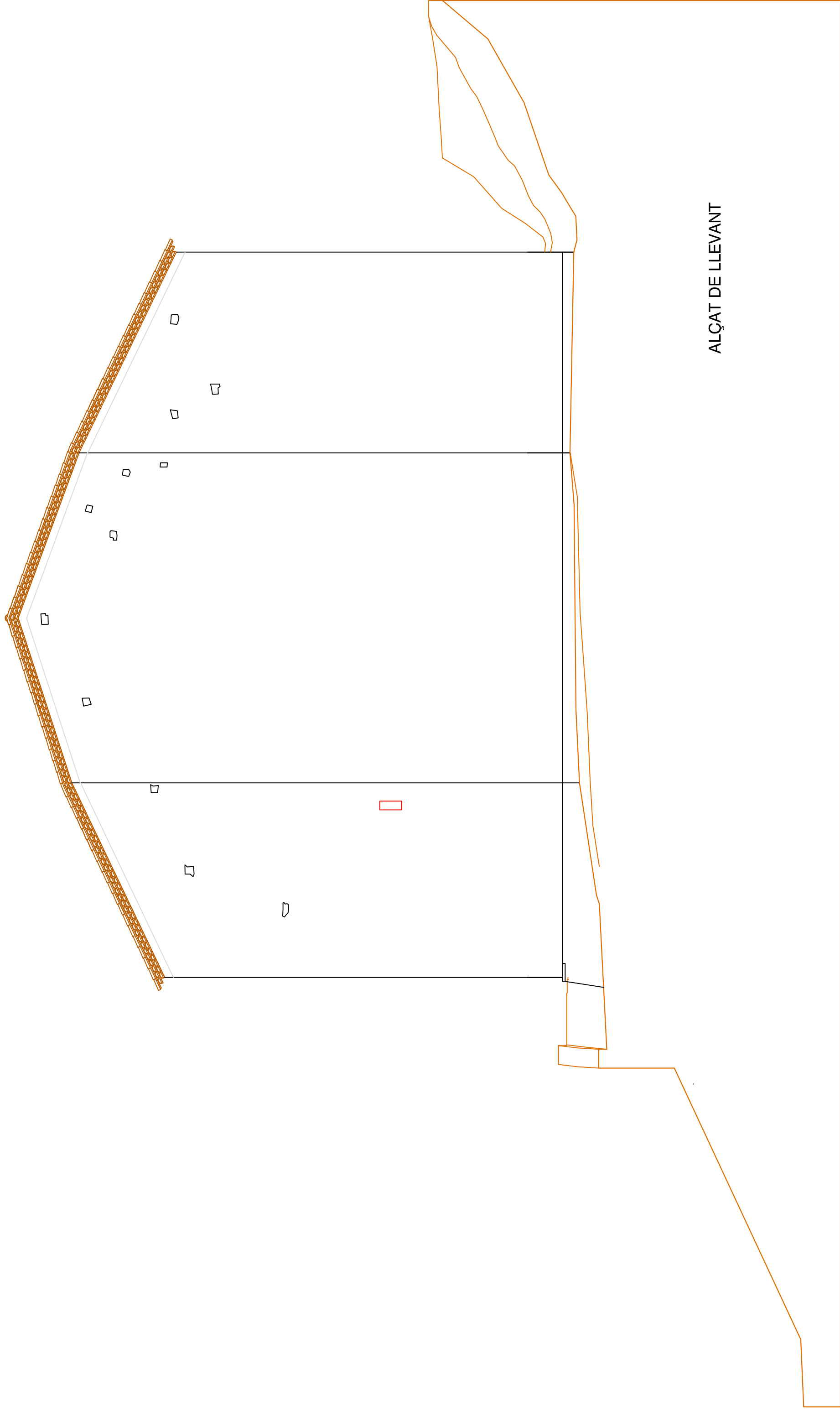
JORDI SALVAT I COMAS



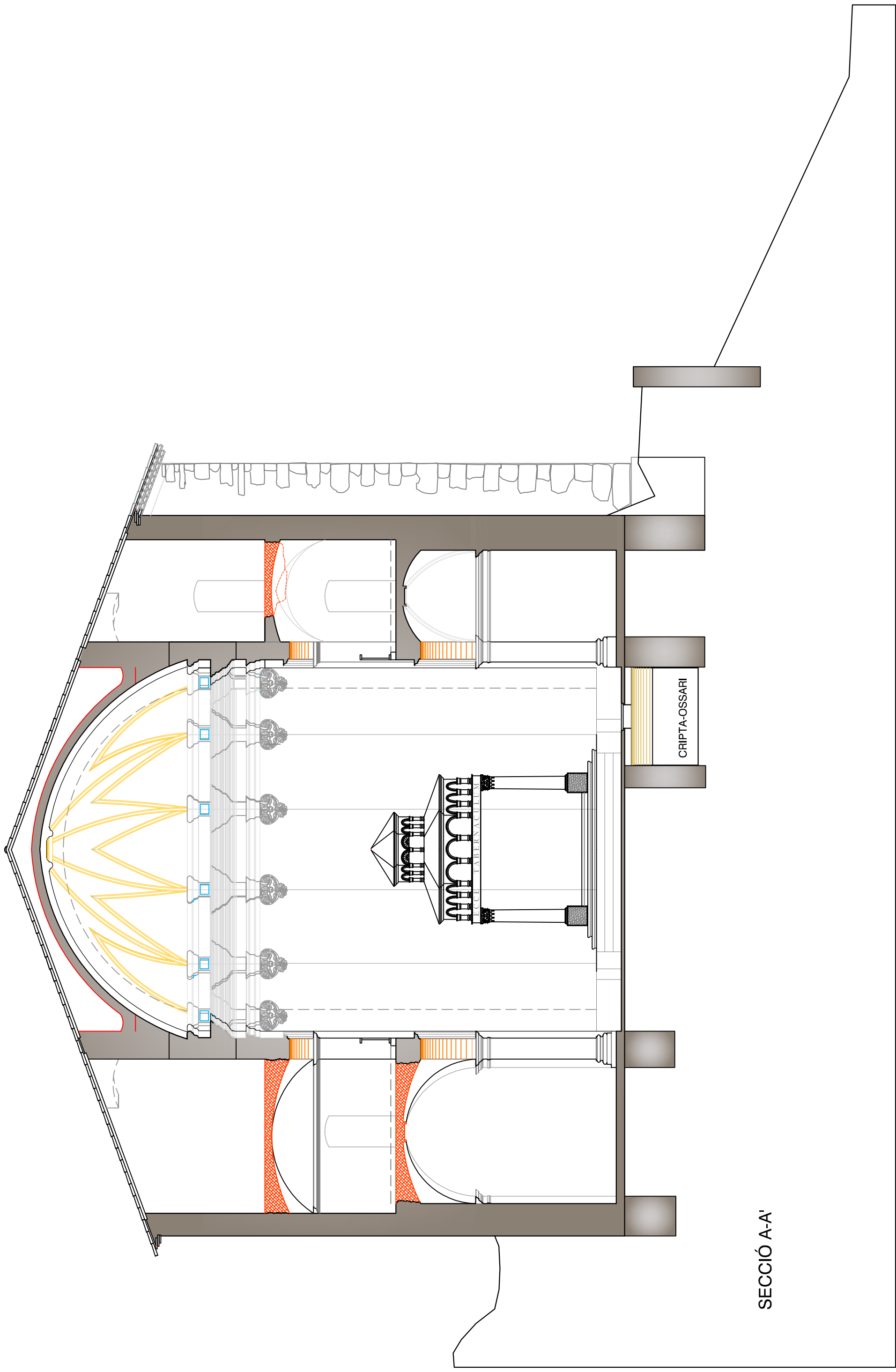
ALÇAT SUD

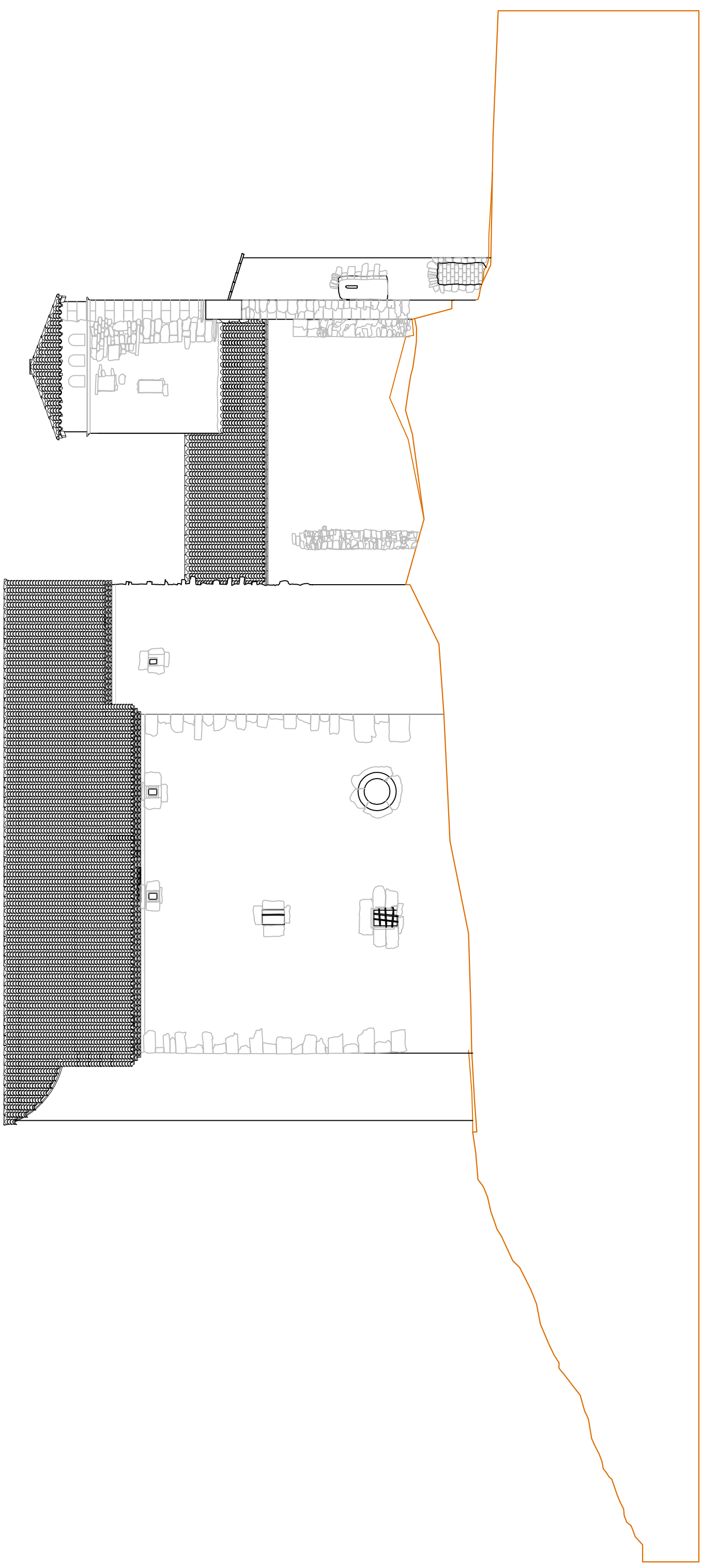
Restes de contrafort

Restes de contrafort



ALÇAT DE LLEVANT





JORDI SALVAT I COMAS