

Le nuove esigenze costruttive portano alla **realizzazione di edifici a basso consumo energetico** inducendo i costruttori e gli utenti finali ad un maggiore controllo dell'involucro edilizio, finalizzato alla riduzione dei ponti termici ed alla verifica dell'assenza di condense e muffe.

Tramite le indagini termografiche è possibile testare la corretta riqualificazione energetica di un involucro e prevenire le eventuali patologie degenerative. La termografia, inoltre, ha delle grandissime potenzialità per il restauro conservativo ed il riuso di edifici esistenti.

Il volume si pone l'obiettivo di essere un testo di riferimento e di frequente consultazione per le applicazioni termografiche, tratteggiando la teoria di base dell'infrarosso, la storia e l'evoluzione della tecnica termografica, per poi approfondire le modalità di applicazioni passive (legate al regime termometrico della muratura e alla ricerca dei ponti termici) e quelle attive (legate alla ricerca di distacchi del rivestimento esterno dal supporto o alla lettura della tessitura muraria).

Attraverso schede di commento dei termogrammi e analisi dei risultati ottenuti si vuole guidare l'operatore termografico in tutte le fasi dell'analisi: dal sopralluogo, al progetto di indagine, dal commento dei risultati ottenuti al report conclusivo.

Le indagini termografiche sono sempre trattate in sinergia con altre prove non distruttive, con l'obiettivo di fornire sempre un quadro completo della patologia indagata.

Nel volume sono esaminate, inoltre, le applicazioni in ambito industriale, sia elettrico che meccanico, le applicazioni in ambito medico e veterinario, per concludere con applicazioni in ambito navale e forestale, il tutto con l'obiettivo di fornire un compendio completo della tecnica termografica.

Guido Roche,

Architetto, docente di riqualificazione tecnologica del costruito presso il Politecnico di Milano, docente di termografia infrarosso e analisi del costruito presso il Master CasaClima alla Libera Università di Bolzano, docente di termografia infrarosso presso l'agenzia CasaClima, certificatore energetico Regione Lombardia e Regione Emilia Romagna. Livello 3 in analisi termografiche e analisi visive, esperto di termografia Infrarossa applicata all'edilizia ed in particolare al restauro architettonico. Amministratore unico della società Architecno srl, specializzata in restauri e progettazione di edifici a elevate prestazioni energetiche e di riqualificazione completa di edifici esistenti. Direttore tecnico della società Ecocasa srl, specializzata nella progettazione e realizzazione di edifici a consumo nullo ed in bio architettura.

Volumi collegati,

Prontuario operativo per la Certificazione Energetica. II edizione

L'edificio nuovo

Guido Roche

Prontuario operativo per la Certificazione Energetica. II edizione

L'edificio esistente

Guido Roche

ISBN 978-88-387-6887-0



9 788838 768873

€ 39,00

PiT

13

La termografia per l'edilizia e l'industria



PiT
PROFESSIONE IN TASCA

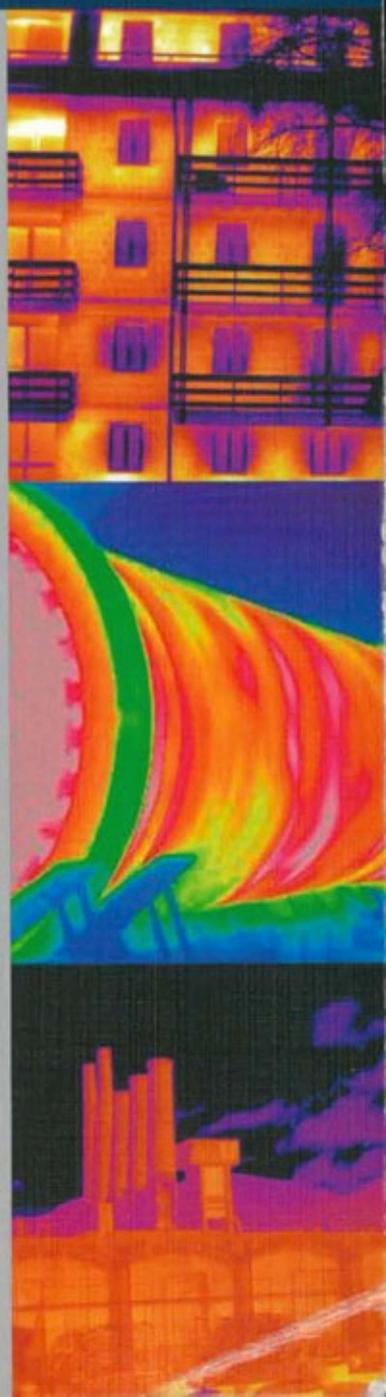
Guido Roche

La termografia per l'edilizia e l'industria

Manuale operativo per le verifiche termografiche

- › L'acqua nelle murature, individuazione e risanamento
- › La termografia per il risparmio energetico
- › Le applicazioni architettoniche e industriali
- › La termografia in ambito medico e veterinario

MAGGIOLI
EDITORE



5.2.1.3.	<i>Il sistema di scansione</i>	61
5.2.1.4.	<i>Ottica</i>	62
5.2.2.	<i>Le termocamere non raffreddate</i>	62
5.2.2.1.	<i>Il sensore</i>	63
5.2.2.2.	<i>Ottica</i>	64
5.2.3.	<i>Come scegliere una termocamera adatta alle proprie esigenze</i>	64
5.3.	<i>Principi fisici</i>	74
5.3.1.	<i>Trasmissione del calore</i>	78
5.3.2.	<i>Il mezzo interposto</i>	88
5.4.	<i>Come effettuare una battuta termografica</i>	89
6.	<i>La normativa relativa alle applicazioni termografiche</i>	97
6.1.	<i>Normativa e influenza dei fattori ambientali e climatici durante l'indagine termografica</i>	97
7.	<i>L'acqua nelle murature</i>	105
7.1.	<i>Parliamo di umidità e delle grandezze fisiche che la definiscono</i>	105
7.1.1.	<i>L'umidità nelle murature</i>	109
7.1.1.1.	<i>L'umidità allo stato liquido</i>	109
7.1.1.2.	<i>L'umidità allo stato gassoso</i>	110
7.1.1.3.	<i>L'acqua allo stato solido</i>	110
7.1.2.	<i>Classificazione delle cause dell'umidità nelle murature</i>	110
7.1.2.1.	<i>Umidità capillare</i>	110
7.1.2.2.	<i>Umidità da condensazione</i>	115
7.1.2.3.	<i>Umidità accidentale</i>	121
7.1.2.4.	<i>Umidità meteorica</i>	123
7.1.2.5.	<i>Umidità di costruzione</i>	126
7.2.	<i>Degrado</i>	127
7.2.1.	<i>Degrado fisico</i>	127
7.2.2.	<i>Degrado chimico</i>	127
7.2.2.1.	<i>I sali</i>	127
7.2.2.2.	<i>Efflorescenze saline e subflorescenze</i>	129
7.2.2.3.	<i>Corrosione dei metalli</i>	132
7.2.3.	<i>Degrado chimico-biologico</i>	132
7.2.3.1.	<i>Il degrado della pietra</i>	132
7.2.4.	<i>Degrado biologico</i>	133
7.2.4.1.	<i>L'infestazione dei vegetali</i>	133
7.2.5.	<i>Inquinamento</i>	134
7.3.	<i>Metodi di misura dell'umidità e strumenti</i>	136
7.3.1.	<i>Metodi diagnostici</i>	137
7.3.2.	<i>Misurazioni igrometriche</i>	137
7.3.3.	<i>Strumenti per la misurazione</i>	138
7.3.3.1.	<i>Strumenti che effettuano la misura di una sola variabile in un dato momento</i>	138
7.3.3.2.	<i>Strumenti per la misura di una sola variabile con registrazione delle variazioni nel tempo</i>	143

7.3.3.3.	<i>Strumenti per la misura contemporanea di differenti variabili e relativa registrazione</i>	143
7.3.3.4.	<i>Strumenti per la misura della velocità dell'aria</i>	144
7.3.4.	<i>Taratura degli strumenti</i>	144
7.3.5.	<i>Termografia: usi e principi fisici</i>	145
7.4.	<i>La misura del contenuto d'acqua nelle murature</i>	145
7.5.	<i>Trattamenti di risanamento delle murature umide</i>	150
7.5.1.	<i>Umidità di risalita</i>	150
7.5.1.1.	<i>Procedimento Knapen</i>	150
7.5.1.2.	<i>Sbarramenti impermeabili</i>	152
7.5.1.3.	<i>Taglio della muratura</i>	154
7.5.1.4.	<i>Procedimenti che aumentano la velocità di evaporazione</i>	156
7.5.1.5.	<i>Prodotti impermeabilizzanti a base cementizia</i>	157
7.5.1.6.	<i>Drenaggi</i>	158
7.5.1.7.	<i>Intercapedini</i>	159
7.5.1.8.	<i>Metodo elettro-osmotico</i>	159
7.5.1.9.	<i>Iniezioni di lattice siliconato</i>	162
7.5.1.10.	<i>Sbarramenti verticali</i>	162
7.5.1.11.	<i>Il sistema elettrofisico Domodry® per la deumidificazione e il controllo dell'umidità nelle murature (a cura dell'ing. Michele Rossetto)...</i>	164
7.5.1.11.1	<i>Un caso applicativo del sistema Domodry®: Palazzo Te (Mantova) ..</i>	177
7.5.2.	<i>Umidità da condensazione</i>	199
8.	<i>Le applicazioni architettoniche</i>	201
8.1.	<i>Termografia passiva</i>	203
8.1.1.	<i>La verifica del regime termoigrometrico delle murature</i>	204
8.1.2.	<i>La ricerca dei ponti termici e delle dispersioni di calore</i>	215
8.1.3.	<i>I casi applicativi - Termografia passiva</i>	232
8.2.	<i>Il rilievo psicrometrico</i>	272
8.2.1.	<i>Finalità del rilievo psicrometrico</i>	272
8.2.2.	<i>Strumenti utilizzati e modalità di rilievo</i>	272
8.2.3.	<i>Principio fisico</i>	273
8.2.4.	<i>L'evoluzione dello psicrometro</i>	274
8.2.4.1.	<i>La fase di campagna</i>	275
8.2.4.2.	<i>La restituzione</i>	276
8.3.	<i>Termografia attiva</i>	278
8.3.1.	<i>L'analisi della tessitura muraria non a vista</i>	278
8.3.2.	<i>La verifica dell'aderenza del rivestimento esterno al supporto (distacchi)</i>	286
8.3.3.	<i>La verifica della presenza di fessure nelle murature</i> ..	291
8.3.4.	<i>La verifica della presenza di canne fumarie</i>	295
8.3.5.	<i>I sistemi di sollecitazione termica della muratura</i>	296
8.3.5.1.	<i>Il riscaldamento per convezione</i>	297
8.3.5.2.	<i>Il riscaldamento per irraggiamento</i>	299



Citiamo di seguito i valori medi statistici di diminuzione dell'umidità muraria dopo l'installazione dell'impianto Domodry® (in % rispetto al contenuto d'acqua iniziale):

- nei primi 6 mesi: dal -10 al -40%
- nei primi 12 mesi: dal -20 al -60%
- nei primi 24 mesi: dal -40 al -80%.

Entro un massimo di 36 mesi viene garantita la deumidificazione totale sino a valori residui di contenuto d'acqua igroscopico, tipici di una muratura sana e asciutta.

Tecnologia Domodry®: compatibilità elettromagnetica

In tutte le nostre case sono presenti vari tipi di elettrodomestici che, come sappiamo, generano deboli campi elettromagnetici (cosiddette emissioni), del tutto innocui per la salute. L'apparecchio Domodry®, essendo un dispositivo elettrico, genera anch'esso delle emissioni⁽¹³⁾ che tuttavia risultano di gran lunga inferiori rispetto agli elettrodomestici di uso comune, come ad esempio un televisore, un frigorifero, una lampada alogena, ecc. (vedi Fig. 36). Se consideriamo che le emissioni di tutti questi elettrodomestici rispettano i limiti di legge, a maggior ragione li rispetta Domodry®, che dunque risulta del tutto innocuo per il nostro organismo.

Figura 36 – Confronto tra Domodry⁽¹⁴⁾ e alcuni comuni elettrodomestici. (Fonte dei valori degli elettrodomestici: Conferenza Annuale AIDII – Associazione Italiana degli Igienisti Industriali – Como, 25-27 giugno 2003)

VALORI DI EMISSIONE		
ELETTRODOMESTICO	VALORE SPECIFICO	RISPETTO A DOMODRY®
Monitor.PC	0,25 μ T	> 16 volte
Frigorifero	0,30 μ T	> 20 volte
TV Color	4,00 μ T	> 266 volte
Radiosveglia	5,00 μ T	> 333 volte
Lampada Alogena	12,00 μ T	> 800 volte
Aspirapolvere	20,00 μ T	> 1333 volte
Domodry®	0,015 μ T	= 1 volta

⁽¹³⁾ L'emissione di un dispositivo elettrico viene valutata misurando l'induzione magnetica media a 30 cm di distanza dal dispositivo, espressa in μ T (microTesla).

⁽¹⁴⁾ Valori di confronto calcolati con riferimento all'induzione magnetica media dell'apparecchio Domodry® pari a 0,015 μ T (microTesla) certificata dall'Istituto Giordano di Rimini.

Effetti benefici sulla salute

Domodry® agisce in modo mirato e specifico esclusivamente sulla componente dell'umidità muraria dovuta alla capillarità, pertanto non ha alcun effetto diretto su altre eventuali concause di umidità di tipo diverso (come ad es. infiltrazioni, perdite da condotte idrauliche, umidità di condensa, ecc.).

È tuttavia dimostrato che l'eliminazione definitiva dell'umidità capillare può indurre, di riflesso, effetti benefici anche sull'aria all'interno dell'immobile, in virtù della minor quantità di vapor d'acqua che dal muro si riversa nell'ambiente. Nella stragrande maggioranza dei casi, infatti, con il progredire della deumidificazione muraria innescata dall'impianto Domodry®, si riscontra anche una graduale regressione dei fenomeni di condensa. Ulteriore – ma non meno importante – effetto indiretto della deumidificazione muraria è la diminuzione del grado di dispersione termica dei muri perimetrali, con conseguente recupero dell'efficienza energetica (riduzione dei consumi per il riscaldamento) dell'intero immobile.

Effetti indiretti conseguenti all'eliminazione della risalita capillare e alla progressiva deumidificazione della muratura:

- eliminazione dell'eccesso di UR % negli ambienti interni;
- regressione dei fenomeni di condensa superficiale (e muffe);
- diminuzione del grado di dispersione termica dei muri perimetrali;
- recupero dell'efficienza energetica dell'immobile.

7.5.1.11.1. Un caso applicativo del sistema Domodry®: Palazzo Te (Mantova)

Palazzo Te, tra i più illustri esempi di Architettura del Manierismo, è l'opera più celebre dell'architetto italiano Giulio Romano. Il complesso, costruito tra il 1524 e il 1534 su commissione di Federico II Gonzaga, è oggi sede del museo civico e, dal 1990, del Centro Internazionale d'Arte e di Cultura di Palazzo Te, che organizza mostre d'arte antica e moderna e d'architettura.

Figura 37 – Mantova, Palazzo Te

A fronte di una grave problematica quale quella dell'umidità ascendente che da epoca storica affliggeva l'edificio, nel corso di vari anni erano stati sperimentati a Palazzo Te diversi sistemi alternativi (impianto ad elettroosmosi in una zona, apparecchio elettrofisico di vecchia generazione in un'altra zona, ecc.) che non avevano dato risultati apprezzabili o, comunque, definitivi.

L'Amministrazione di Palazzo Te aveva dunque richiesto di valutare la fattibilità di un intervento di sostituzione dei precedenti sistemi mediante applicazione della tecnologia Domodry®, da installare inizialmente a livello sperimentale in due zone (Camera dei Giganti e Zona ingresso).

Le indagini diagnostiche propedeutiche all'intervento, svolte nel 2009 nell'edificio, avevano in effetti evidenziato, anche nelle zone già interessate dai precedenti sistemi di deumidificazione, la presenza di una forte aggressione da parte dell'acqua di risalita capillare sull'opera muraria (muratura tradizionale di mattoni e malta di calce). Il fenomeno interessava sia le pareti perimetrali che quelle divisorie, con un avanzato stato di degrado delle superfici a vista, testimoniato da diffuse esfoliazioni delle pitture ed efflorescenze saline, per un'altezza da pavimento variabile da 1,0 a 1,5 m circa a seconda delle zone.

L'origine dei fenomeni di risalita capillare sopra descritti era riconducibile alla natura dei terreni (antica zona paludosa e lacustre)

su cui insiste l'edificio, in relazione alle caratteristiche costruttive e all'età dell'edificio stesso: l'abbondante presenza d'acqua nel sottosuolo, a breve profondità dal piano di campagna, favorisce un richiamo e un ristagno d'acqua nella zona su cui insistono le fondazioni, da cui appunto si innescava la risalita capillare secondo un ciclo continuo e ininterrotto.

Figura 38 – Apparecchio Domodry LS-R15**Figura 39** – Camera dei Giganti: installazione nel locale tecnico al piano superiore

Figura 40 – Zona ingresso: installazione nel locale al piano superiore

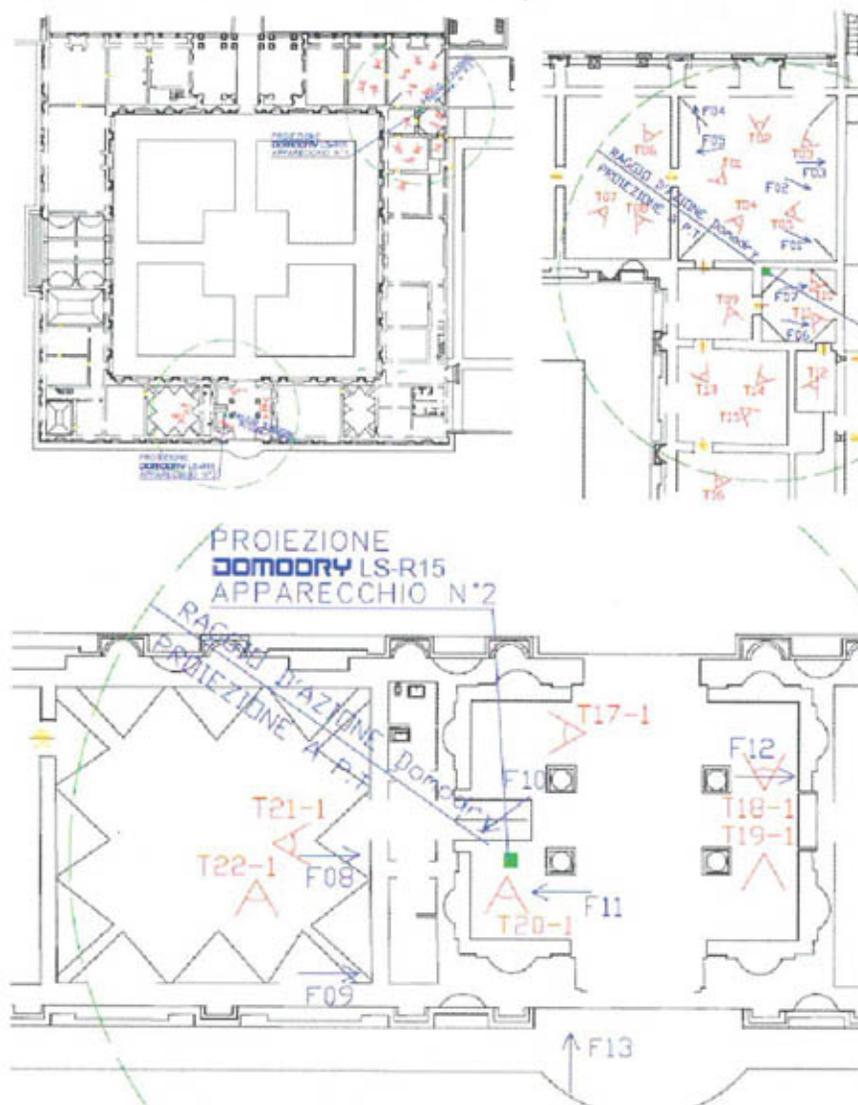


Figura 41 – Apparecchio Domodry LS-R15 e Ricevitore FM con modem gsm per il controllo remoto dei parametri microclimatici



A fronte del quadro diagnostico sopra descritto, in data 13/1/2010 è stato installato e attivato l'apposito impianto Domodry® per la deumidificazione delle murature, composto da n. 2 apparecchi mod. LS-R15 a copertura rispettivamente della Camera dei Giganti e della Zona ingresso, come illustrato nello schema che segue.

Figura 42 – Schema planimetrico con ubicazione prove



È stata quindi istituita un'attività di monitoraggio consistente nella mappatura iniziale e nella successiva verifica del decorso del processo di deumidificazione muraria, attraverso:

- controllo dell'umidità muraria mediante termografie di confronto (ante e post intervento) con termocamera IR tipo long wave;
- verifica dello stato di degrado superficiale delle murature mediante confronto fotografico (ante e post intervento);
- verifica delle variazioni dei parametri microclimatici durante il processo di deumidificazione, mediante analisi dei dati acquisiti tramite un apposito sistema di monitoraggio ambientale ⁽¹⁵⁾.

La verifica conclusiva, effettuata a circa due anni di distanza dalla data di installazione dell'impianto Domodry®, ha fornito esito pienamente positivo, come di seguito illustrato.

Controllo dell'umidità muraria mediante termografia IR

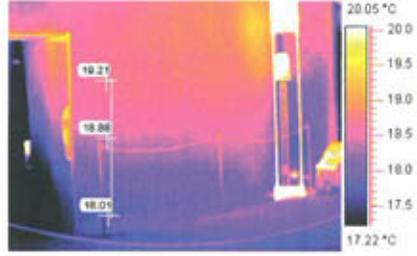
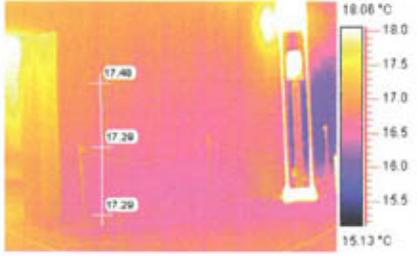
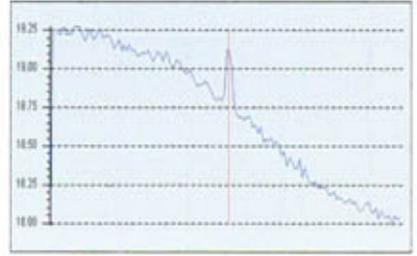
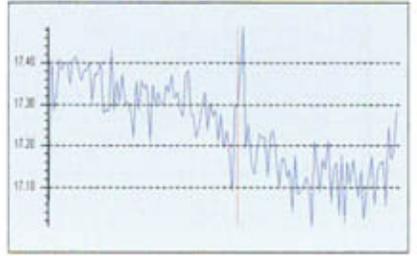
La termografia IR evidenzia con il colore scuro la presenza iniziale di umidità muraria. La stessa immagine, ripresa alla fine del processo di deumidificazione, dimostra la scomparsa dell'umidità.

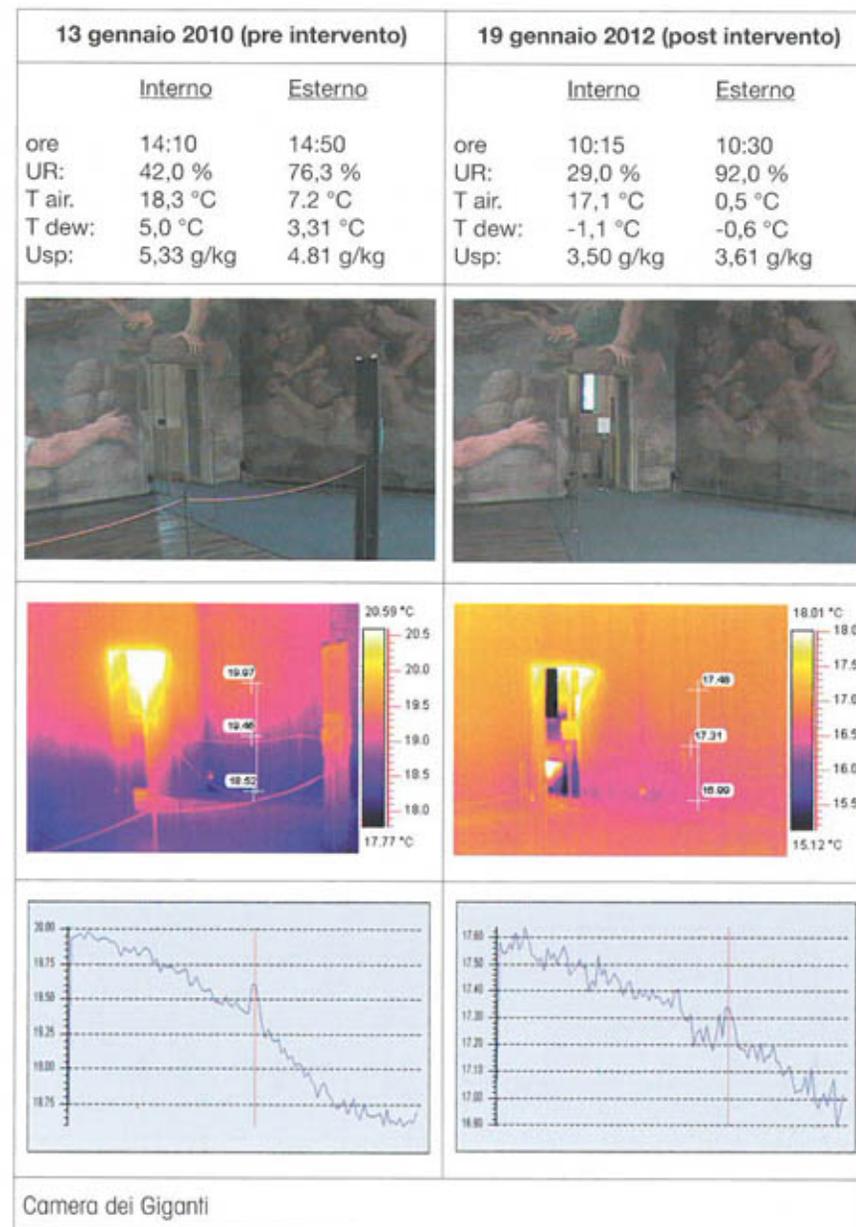
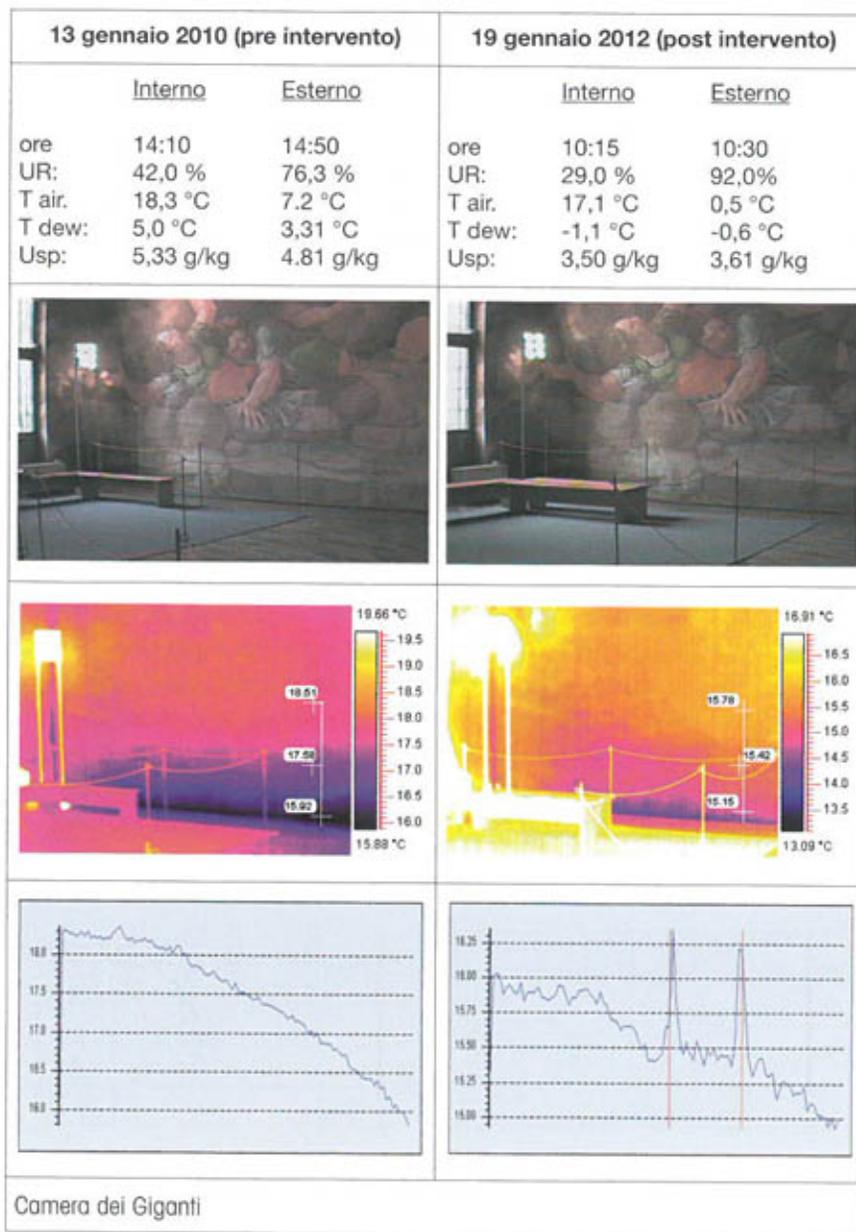
Parimenti, il confronto tra il profilo termico "prima" e "dopo" la deumidificazione evidenzia la drastica diminuzione del gradiente termico lungo una sezione verticale della parete termografata.

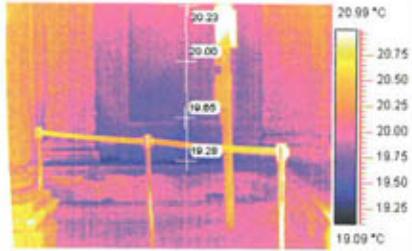
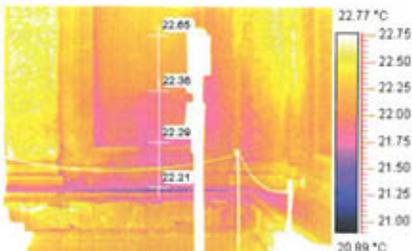
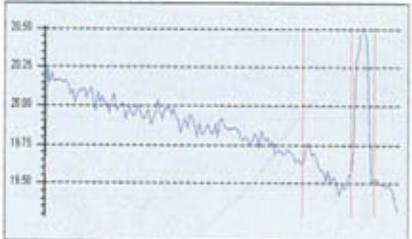
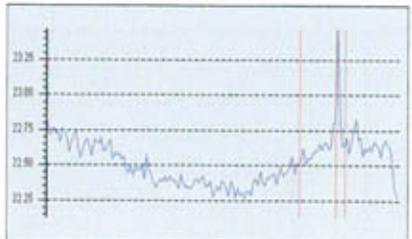
Ecco di seguito alcuni esempi delle termografie scattate.

⁽¹⁵⁾ È stato utilizzato uno specifico sistema in radiofrequenza, consistente in:

- n. 1 unità di ricezione provvista di modem gsm per controllo e scarico dati remoto;
- n. 2 trasmettitori - ciascuno munito di sonda per la misura di temperatura Ta ed umidità relativa UR dell'aria e di temperatura superficiale Ts a contatto della parete - entrambi allocati nella Sala dei Giganti, ma su due vertici opposti;
- n. 1 trasmettitore con sonda per il rilevamento dei parametri meteo (Ta - UR) allocato in posizione esterna.

13 gennaio 2010 (pre intervento)			19 gennaio 2012 (post intervento)		
	Interno	Esterno		Interno	Esterno
ore	14:10	14:50	ore	10:15	10:30
UR:	42,0 %	76,3 %	UR:	29,0 %	92,0 %
T air:	18,3 °C	7,2 °C	T air:	17,1 °C	0,5 °C
T dew:	5,0 °C	3,31 °C	T dew:	-1,1 °C	-0,6 °C
Usp:	5,33 g/kg	4,81 g/kg	Usp:	3,50 g/kg	3,61 g/kg
					
					
					
Camera dei Giganti					



4 ottobre 2010 (verifica intermedia)			27 settembre 2011 (post intervento)		
	Interno	Esterno	Interno	Esterno	
ore	10:30	10:40	ore	9:30	9:45
UR:	65,4 %	75,6 %	UR:	51,0 %	57,6 %
T air:	21,4 °C	20,0 °C	T air:	26,0 °C	23,9 °C
T dew:	14,6 °C	15,5 °C	T dew:	15,1 °C	15,0 °C
Usp:	10,45 g/kg	11,09 g/kg	Usp:	10,75 g/kg	10,71 g/kg
					
					
					
Zona ingresso					

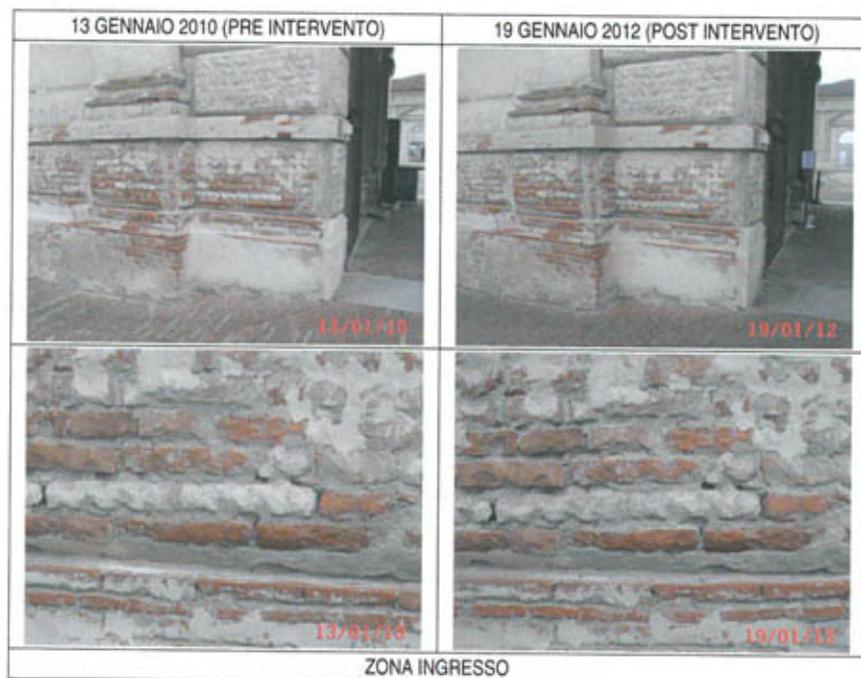
Osservazioni: l'ispezione termografica condotta nell'edificio ha evidenziato, in entrambe le zone d'intervento (Camera dei Giganti e Zona ingresso), la sostanziale scomparsa delle anomalie termiche (ovvero dell'umidità muraria di origine capillare) lungo lo sviluppo verticale delle pareti, sia rispetto alla mappatura iniziale del 13 gennaio 2010 precedente all'installazione dell'impianto Domodry®, sia rispetto alla verifica intermedia del 4 ottobre 2010.

Verifica dello stato di degrado superficiale delle murature

Nello stato di fatto precedente all'intervento di deumidificazione elettrofisica, le murature presentavano, sia sui paramenti murari interni che esterni, uno stato di degrado generalizzato e diffuso, consistente in distacchi (esfoliazione) della pellicola pittorica, associati a diffuse efflorescenze saline, localmente abbondanti, come dalla documentazione fotografica di confronto ("ante" e "post" intervento) di cui si riportano di seguito alcuni esempi:







Il confronto fotografico effettuato a due anni di distanza dall'installazione dell'impianto Domodry® ha evidenziato quanto segue: **nella quasi totalità dei punti monitorati, non si osservano apprezzabili evoluzioni dei fenomeni degradativi rispetto alla situazione rilevata inizialmente.**

Tale considerazione – apparentemente banale – è un chiaro indice del fatto che **l'umidità capillare che in precedenza aggrediva la muratura**, determinando la continua, progressiva e inesorabile evoluzione dei connessi fenomeni di degrado, **è stata definitivamente interrotta e neutralizzata.**

Ciò collima peraltro con le risultanze fornite dalle indagini termografiche, precedentemente illustrate.

Verifica delle variazioni dei parametri microclimatici anno 2011 rispetto al 2010

La seguente analisi è stata svolta al fine di evidenziare l'interazione tra l'umidità muraria ed il microclima interno, nella situazione "ante" e "post" intervento.

I dati di partenza sono rappresentati dai valori dei parametri microclimatici registrati tramite l'apposito sistema di monitoraggio ambientale, e precisamente:

- Temperatura T_a [°C] e Umidità relativa UR [%] dall'aria, Temperatura superficiale di parete T_s [°C] all'interno del locale monitorato (Camera dei Giganti);
- T_a [°C] e UR [%] meteo esterni.

La frequenza di registrazione dei parametri è stata impostata per intervalli di 1 ora. I dati registrati mediante le sonde ambientali sono stati quindi elaborati tramite uno specifico software (Darca Heritage) che ne consente la visualizzazione e la rappresentazione grafica dei tracciati istantanei senza soluzione di continuità, a partire dal momento di inizio della registrazione (coincidente con il 13/1/10, data di installazione dell'impianto Domodry®).

Tramite lo stesso software viene impostata in automatico anche la determinazione per via numerica dei seguenti parametri fisici derivati (calcolati in funzione delle grandezze misurate):

- Temperatura di rugiada T_d [°C]
- Umidità assoluta U_A [g/mc].

Nel caso in oggetto, i parametri microclimatici da considerarsi significativi ai fini dell'analisi sono l'Umidità assoluta U_{ass} (interna al locale ed esterna) e le temperature T_a e T_s all'interno del locale.

Onde poter apprezzare le variazioni dei suddetti parametri conseguenti al progredire del processo di deumidificazione delle murature indotto dall'impianto elettrofisico, i dati registrati sono stati opportunamente elaborati sotto il profilo statistico.

Innanzitutto, si sono prese in considerazione le grandezze fisiche derivate "Umidità assoluta differenziale" ΔU_{ass} e la "Temperatura differenziale" ΔT così definite:

$$\Delta U_{ass} \text{ [g/mc]} = U_{ass,int} - U_{ass,ext} \dots\dots\dots \text{differenza tra l'Umidità assoluta interna del locale monitorato meno la corrispondente Umidità assoluta esterna presente nel medesimo istante all'esterno;}$$

$\Delta T [^{\circ}C] = T_a - T_s$ differenza tra la temperatura dell'aria all'interno del locale monitorato meno la corrispondente temperatura superficiale interna della parete perimetrale.

I valori numerici dei differenziali di cui sopra vengono calcolati, secondo la medesima frequenza di registrazione dati (n. 1 dato/ora), per ciascuno dei punti di acquisizione all'interno del locale (sonda T1 e sonda T2). Come valore rappresentativo dell'intera sala, viene quindi presa la media tra i due valori corrispondenti rispettivamente ai due punti di acquisizione: si ottiene così una serie di n. 24 dati - con cadenza oraria - per ciascun giorno di rilevamento, per l'intero periodo di monitoraggio.

Di seguito, sempre per ciascuna delle grandezze differenziali ΔU_{ass} e ΔT sopra definite, viene calcolata la **media giornaliera** (media aritmetica della serie di n. 24 dati/gg.) che viene quindi rappresentata sotto forma di tabulati numerici e di grafici mensili.

I valori delle medie giornaliere sopra calcolate, relativi ai mesi dell'anno 2011, vengono messi a confronto in forma grafica con gli omologhi valori relativi al 2010: in tal modo, si possono riscontrare in modo immediato **le variazioni** subite dalle grandezze differenziali $\Delta U_{ass,m}$ e ΔT_m a distanza di un anno e più (valori 2011) dalla data di installazione dell'impianto Domodry®.

Tale confronto risulta particolarmente significativo per i due semestri comprendenti il periodo invernale, ovvero per **l'intervallo compreso tra il 15 gennaio (inizio della registrazione dati nel 2010) ed il 30 giugno**, rispettivamente dei due anni 2010 e 2011.

A titolo esemplificativo si riportano, rispettivamente nelle Figg. 43 e 44, i grafici dei differenziali $\Delta U_{ass,m}$ e ΔT_m relativi al mese di febbraio 2011 rispetto al 2010. Inoltre, nella Fig. 45 si riporta il grafico a istogrammi che riassume, per ciascun mese del semestre, il valore medio mensile del differenziale $\Delta U_{ass,m}$.

Figura 43 – Differenziale umidità assoluta $\Delta U_{ass,m}$ [g/mc] tra interno ed esterno. Valori medi giornalieri febbraio 2011 rispetto a febbraio 2010

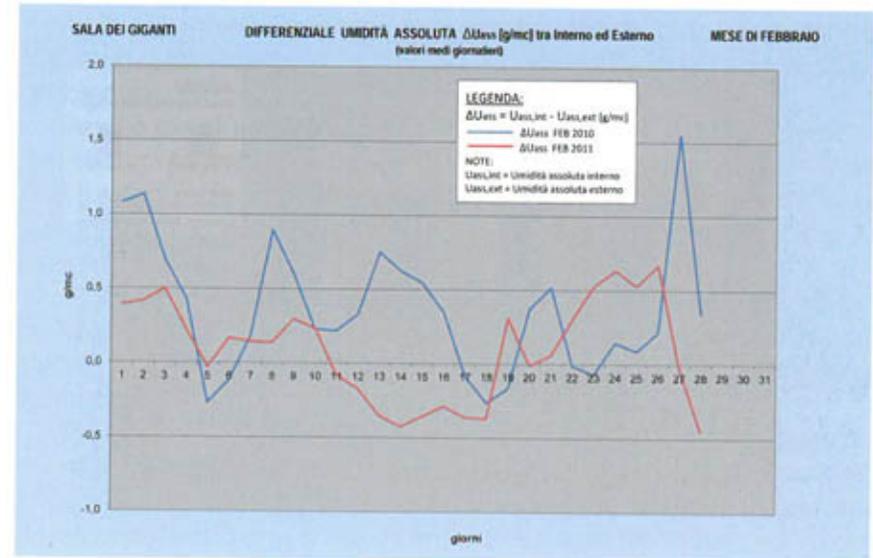


Figura 44 – Differenziale temperatura ΔT_m [°C] = (Ta - Ts). Valori medi giornalieri febbraio 2011 rispetto a febbraio 2010

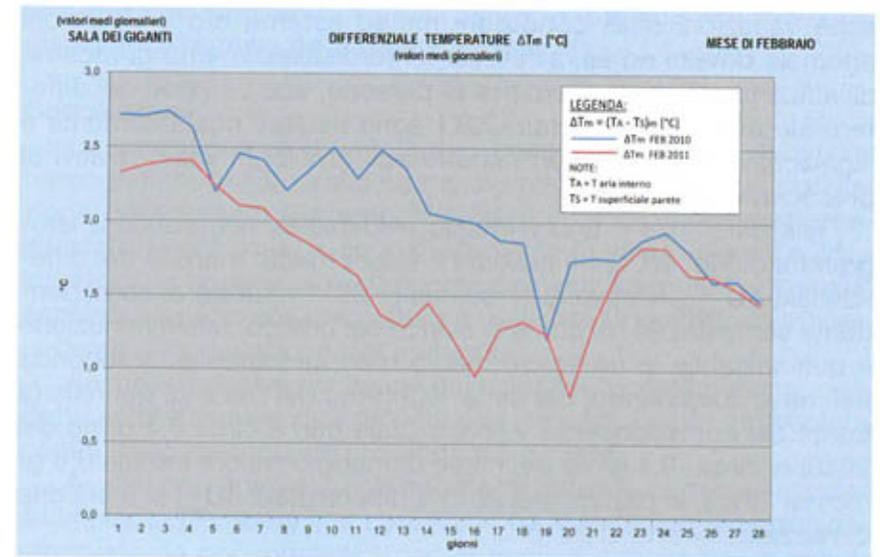
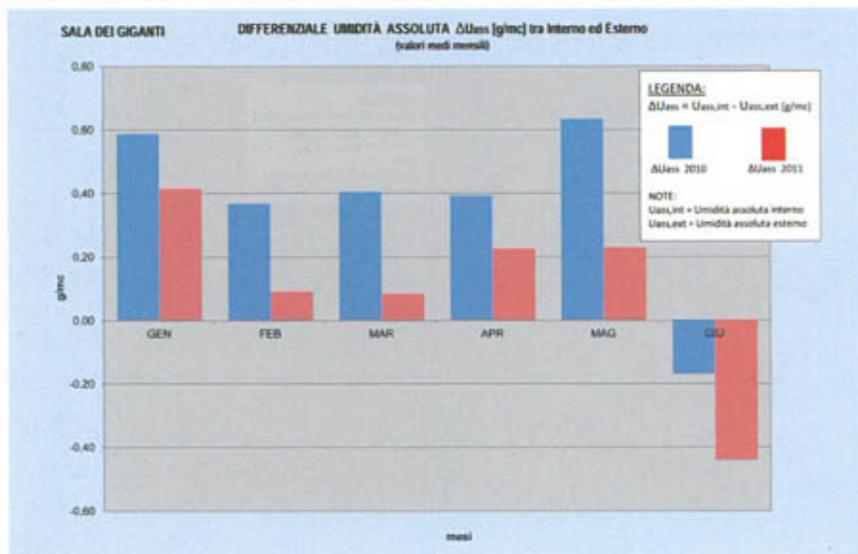


Figura 45 – Differenziale umidità assoluta $\Delta U_{ass,m}$ [g/mc] tra interno ed esterno
Valori medi mensili 1° sem. 2011 rispetto a 1° sem. 2010



Dal grafico mensile di Fig. 43 si evince chiaramente che, a parte alcune anomalie limitate a singole giornate (imputabili a brusche variazioni delle condizioni meteo esterne e/o a situazioni anomale dovute ad es. all'allestimento/disallestimento di mostre, all'affluenza di grosse comitive di persone, ecc.), i valori del differenziale $\Delta U_{ass,m}$ nel febbraio 2011 sono risultati costantemente e significativamente inferiori rispetto agli omologhi valori relativi al precedente anno 2010.

Tale differenza è ancor meglio evidenziata nel grafico a istogrammi di Fig. 45, che riassume il valore medio mensile del differenziale $\Delta U_{ass,m}$ relativo al 1° semestre 2011 rispetto al corrispondente semestre 2010: come si evince dal grafico, tale diminuzione è quantificabile in un valore medio mensile variabile, a seconda del mese considerato, dai circa -0,2 g/mc del mese di gennaio (a fronte del corrispondente valore iniziale pari a circa 0,4 g/mc del 2010) ai circa -0,4 g/mc del mese di maggio (valore iniziale 0,6 g/mc nel 2010): in pratica, nel 2011 il differenziale ΔU_{ass} si è più che dimezzato rispetto al 2010.

Poiché, come facilmente intuibile, il differenziale $\Delta U_{ass,m}$ rappresenta "l'umidità in eccesso" (in termini di umidità assoluta espressa in g/mc) presente giornalmente all'interno della sala rispetto al

valore atmosferico contemporaneamente presente all'esterno, se tale differenziale è diminuito significa che, a parità di altre condizioni, è diminuita l'originaria umidità muraria che, evaporando dal muro, costituiva la "sorgente di alimentazione" dell'umidità ambiente.

Anche per quanto riguarda il differenziale ΔT_m , dal grafico mensile di Fig. 44 (relativo al mese di febbraio) si evince chiaramente che i valori medi giornalieri nel 2011 sono risultati costantemente e significativamente inferiori rispetto agli omologhi valori relativi al precedente anno 2010.

In questo caso, si osserva come il valore medio giornaliero del differenziale ΔT_m subisca nel febbraio 2011 una diminuzione variabile tra 0,5 °C e 1,0 °C rispetto agli omologhi valori relativi al febbraio 2010.

Poiché il differenziale ΔT_m , essendo definito come lo "scostamento" tra la temperatura superficiale interna della parete perimetrale e la corrispondente temperatura dell'aria nel locale, può essere considerato una sorta di "indice di dispersione termica" della parete perimetrale (ovvero: minore è lo "scostamento", minore è la dispersione termica), se tale differenziale è diminuito significa che, a parità di altre condizioni, è diminuita l'originaria umidità muraria che, bagnando il muro, tendeva a mantenere elevata la dispersione termica della parete stessa.

Conclusione

La campagna di monitoraggio condotta, mediante verifiche termografiche e fotografiche, nel biennio successivo all'installazione dell'impianto Domodry® in Palazzo Te ha chiaramente evidenziato, in entrambe le zone d'intervento (Sala dei Giganti e Zona ingresso), la sostanziale scomparsa dell'umidità muraria di origine capillare, rispetto alla mappatura iniziale del 13 gennaio 2010 precedente all'installazione dell'impianto.

Anche le positive risultanze delle analisi microclimatiche, condotte sulla base dei dati raccolti con il monitoraggio ambientale, confermano pienamente i risultati di cui sopra.

A ulteriore riprova degli eccellenti risultati conseguiti grazie all'impianto Domodry®, si consideri che le indagini termografiche effettuate, in concomitanza con la verifica conclusiva, in alcune altre zone di Palazzo Te ricadenti al di fuori dell'area d'intervento, hanno al contrario evidenziato la permanenza, in tali zone, di forti

anomalie termiche ascrivibili ad umidità da risalita capillare, ancora presente.

Gli esiti qui illustrati per il caso specifico di Palazzo Te colmano peraltro con i risultati mediamente emersi su una più ampia casistica di ormai svariate centinaia di applicazioni della tecnologia Domodry® realizzate in tutta Italia, in contesti anche molto differenziati per condizioni ambientali, tipologie architettoniche e caratteristiche costruttive degli edifici oggetto di intervento.

In conclusione, si può quindi affermare che anche a Palazzo Te la tecnologia Domodry® ha ottenuto pieno e definitivo successo su un problema di umidità capillare pressoché "storico", per il quale, tra l'altro, nessuno dei sistemi alternativi precedentemente applicati aveva sortito risultato!

Differenze tra Domodry® e altri sistemi "similari"

È importante in conclusione sottolineare alcune differenze sostanziali che contraddistinguono il sistema Domodry® da altri sistemi solo apparentemente simili.

La prima fondamentale differenza sta nel principio scientifico utilizzato che, per quanto concerne Domodry®, si basa come già visto sull'applicazione di particolari fenomeni fisici denominati dagli addetti ai lavori (ovvero dalla Comunità scientifica internazionale) con i termini di "elettro-capillarità" ed "electrowetting".

Entrambi sono fenomeni osservabili e riproducibili in laboratorio, attraverso i quali risulta possibile, mediante l'applicazione di un potenziale elettrico esterno e sotto determinate condizioni, indurre variazioni della tensione superficiale – ovvero dell'angolo di contatto – all'interfaccia tra un liquido e un solido.

La dimostrazione scientifica dei suddetti fenomeni fisici – sui quali appunto si basa il funzionamento della tecnologia Domodry® – è documentata da articoli e pubblicazioni scientifiche su studi sperimentali autonomamente condotti, nel campo delle nano-tecnologie, da Università ed Enti di ricerca internazionali ⁽¹⁶⁾ a partire dalla fine degli anni '90 del secolo scorso.

Prendendo invece in esame la documentazione tecnica di svariati altri sistemi "similari" reperibili sul mercato o su siti internet, si riscontrano – come si può facilmente verificare – definizioni e/o

⁽¹⁶⁾ Per approfondimenti e/o riferimenti bibliografici sui suddetti studi sperimentali, si rimanda all'apposita pubblicazione tecnica, che può essere richiesta gratuitamente a Domodry srl.

spiegazioni relative a fenomeni che a tutt'oggi non trovano riscontro alcuno – né tantomeno dimostrazione – da parte della Comunità scientifica internazionale.

In secondo luogo, essendo il sistema Domodry® basato, come già detto, su uno specifico ed esclusivo principio scientifico, ne discende che anche il funzionamento – e, di conseguenza, l'effetto prodotto da Domodry® sulla muratura affetta da umidità ascendente – si differenzia in modo sostanziale e radicale da qualsiasi altro sistema attualmente presente sul mercato.

In particolare, l'azione di Domodry® è quella di neutralizzare, al contatto acqua-muratura, la capacità delle molecole d'acqua di caricarsi elettricamente, facendo in modo che rimangano neutre e, conseguentemente, non possano più essere attratte per differenza di carica da parte dei capillari della muratura ⁽¹⁷⁾.

In tal senso, quindi, l'effetto di Domodry® non è tanto quello di "opporsi" alla risalita capillare "invertendone" il flusso o "respingendola" verso il terreno di provenienza (come invece dichiarato da altri sistemi "similari"), bensì quello di "prevenirla" agendo direttamente sulle cause che ne sono all'origine. Anche per questo motivo, l'efficacia della tecnologia Domodry® non è minimamente eguagliabile da nessun altro sistema ad oggi disponibile sul mercato.

In conclusione: nel panorama dei sistemi, tradizionali e non, per l'eliminazione dell'umidità muraria di origine capillare, Domodry® si distingue come l'unica, originale tecnologia elettrofisica attiva riconducibile a principi fisici scientificamente dimostrabili, nonché suffragata dagli eccellenti risultati conseguiti in ormai svariate centinaia di applicazioni realizzate in tutta Italia.

Raccomandazioni per l'esecuzione dei successivi interventi di risanamento delle murature

Nei casi di murature originariamente affette da umidità capillare, occorre in ogni caso considerare che, anche a seguito del definitivo smaltimento dell'umidità residua, possono permanere, in profondità negli intonaci e/o all'interno dei corpi murari, oltreché in superficie, dei depositi salini residui: ciò è dovuto, in particolare, ai fenomeni di trasporto dei sali solubili presenti nell'acqua pro-

⁽¹⁷⁾ Definizione semplificata del principio di funzionamento della tecnologia Domodry®. Per la spiegazione scientifica più completa e rigorosa, si rimanda all'apposita pubblicazione tecnica, che può essere richiesta gratuitamente a Domodry srl.