

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA

in

DIAGNOSTICA E SPERIMENTAZIONE DELLE STRUTTURE LS

ESPERIENZA DI TECNICHE DIAGNOSTICHE

NON DISTRUTTIVE

AI FINI ENERGETICI E STRUTTURALI

CANDIDATO
Veronica Corradetti

RELATORE:
Prof. Ing. Giovanni Pascale

CORRELATORI
Prof. Ing. Francesco Ubertini
Dr. Arch. Camilla Colla
Dott. Ing. Elena Gabrielli

Anno Accademico 2010/2011

Sessione II

3ENCULT

Efficient Energy for EU Cultural Heritage

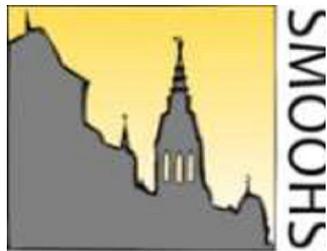
www.3encult.eu



SMooHS

Smart Monitoring of Historic Structures

www.smoohs.eu



INTRODUZIONE	6
1 DIAGNOSTICA DEL PATRIMONIO ESISTENTE MEDIANTE TECNICHE NON DISTRUTTIVE	10
1.1 LINEE GUIDA PER I BENI CULTURALI	10
1.1.1 Oggetto e scopi delle linee guida	11
1.1.2 Conoscenza del manufatto	11
1.2 TECNICHE DIAGNOSTICHE NON DISTRUTTIVE UTILIZZATE	14
1.2.1 TERMOGRAFIA INFRAROSSA: Scopi, Strumentazione e Principi della tecnica	14
1.2.2 GPR: Scopi, Strumentazione e Principi della tecnica	18
1.2.3 BLOWER DOOR TEST: Scopi, Strumentazione e Principi della tecnica	23
2 STATO DELL'ARTE DELLE TECNICHE DIAGNOSTICHE NON DISTRUTTIVE UTILIZZATE	29
2.1 TERMOGRAFIA A INFRAROSSI APPLICATA AD EDIFICI STORICI IN MURATURA: stato dell'arte della tecnica	29
2.2 GROUND PENETRATING RADAR APPLICATO AD EDIFICI STORICI IN MURATURA: stato dell'arte della tecnica	34
2.3 VALUTAZIONE DELLA TENUTA ALL'ARIA DEGLI EDIFICI MEDIANTE BLOWER DOOR TEST: stato dell'arte della tecnica	45
3 PROGETTI EUROPEI E RELATIVI CASI STUDIO	52
3.1 PROGETTO EUROPEO 3ENCULT: SCOPI ED OBIETTIVI	52
3.1.1 Palazzina della Viola (Bologna)	54
3.1.2 Palazzo D'Accursio (Bologna)	56
3.2 PROGETTO EUROPEO SMOOHS: OBIETTIVI E PRINCIPALI APPLICAZIONI	59
4 MONITORAGGIO DEI MOTI CONVETTIVI	62
4.1 SCOPO DELLA PROVA	62
4.2 OGGETTO DELLA PROVA: PALAZZINA DELLA VIOLA (BOLOGNA)	63
4.3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	67
4.4 PROCEDURA PREPARATORIA	70
4.5 ACQUISIZIONE DATI	82
4.6 ELABORAZIONE DATI	88
4.7 VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI ED OSSERVAZIONI	104
4.8 VERIFICA DEI RISULTATI	129

5	INDAGINE GPR SU SOLAI	134
5.1	SCOPO DELLA PROVA	134
5.2	OGGETTO DELLA PROVA: PALAZZINA DELLA VIOLA (BOLOGNA)	134
5.3	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	135
5.4	PROCEDURA PREPARATORIA	136
5.5	ACQUISIZIONE DATI	137
5.6	ELABORAZIONE DATI E VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI	143
5.6.1	Linea radar acquisita nella loggia frontale 1F2 e nel salone Centrale 1F9	145
5.6.2	Griglia radar acquisita nel salone centrale 1F9	149
5.6.3	Griglia radar acquisita nella sala 1F6	153
6	INDAGINE GPR SU MURETTI	163
6.1	SCOPO DELLA PROVA	163
6.2	OGGETTO DELLA PROVA: MURETTI IN PIETRA LECCESE (CETMA, BRINDISI)	163
6.3	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	164
6.4	PROCEDURA PREPARATORIA	165
6.5	ACQUISIZIONE DATI	167
6.6	ELABORAZIONE DATI E VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI	174
6.6.1	Muretto W1	174
6.6.2	Muretto W2	184
7	PROVA DI PERMEABILITÀ ALL'ARIA DI UN EDIFICIO STORICO IN MURATURA	189
7.1	SCOPO DELLA PROVA	189
7.2	OGGETTO DELLA PROVA: PALAZZO D'ACCURSIO (BOLOGNA)	190
7.3	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	191
7.4	ACQUISIZIONE DATI	196
7.4.1	PRIMA CAMPAGNA DI ACQUISIZIONE DATI	196
7.4.1.1	UFFICI COMUNALI (2° TRAPIANO)	196
7.4.1.2	COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE	202
7.4.1.2.1	Sala Urbana	202
7.4.1.2.2	Sala dei Primitivi e Sala del '500	207
7.4.1.2.3	Sala Vidoniana	214
7.4.1.2.4	Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20), Sala della Repubblica Cispadana (n°19) e Sala n°18	217
7.4.2	SECONDA CAMPAGNA DI ACQUISIZIONE DATI	219
7.4.2.1	UFFICI COMUNALI (1° PIANO)	219
7.4.2.2	COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE	224
7.4.2.2.1	Sala Urbana	224

7.4.2.2.2 Sala Vidoniana, Sala dei Primitivi e Sala del '500	235
7.4.2.2.3 Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20), Sala della Repubblica Cispadana (n°19)	235
7.4.2.2.4 Sala n°18, Sala Aemilia Ars, Sala dei Cavalleggeri e Sala degli Svizzeri	260
7.5 VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI ED OSSERVAZIONI	247
7.5.1 RISULTATI PRIMA CAMPAGNA DI INDAGINE	249
7.5.1.1 UFFICI COMUNALI (2° TRAPIANO)	249
7.5.1.2 COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE	250
7.5.1.2.1 Sala Urbana	250
7.5.1.2.2 Sala dei Primitivi e Sala del '500	250
7.5.1.2.3 Sala Vidoniana	251
7.5.1.2.4 Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20), Sala della Repubblica Cispadana (n°19) e Sala n°18	252
7.5.2 RISULTATI SECONDA CAMPAGNA D'INDAGINE	253
7.5.2.1 UFFICI COMUNALI (1° PIANO)	253
7.5.2.2 COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE	255
7.5.2.2.1 Sala Urbana	255
7.5.2.2.2 Sala Vidoniana, Sala dei Primitivi e Sala del '500	257
7.5.2.2.3 Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20), Sala della Repubblica Cispadana (n°19)	259
7.5.2.2.4 Sala n°18, Sala Aemilia Ars, Sala dei Cavalleggeri	260
7.6 PROBLEMATICHE DELL'APPLICAZIONE DEL BLOWER DOOR TEST IN EDIFICI STORICI IN MURATURA	262
CONCLUSIONI	267
BIBLIOGRAFIA	270
ALLEGATO A: Tabelle delle temperature delle strisce di carta per le varie quote di riferimento e per le diverse serie termografiche	274
ALLEGATO B: Tabelle di input per la creazione delle mappe di temperatura	275
ALLEGATO C: Mappe di temperatura, orizzontali e verticali, per le diverse serie termografiche	351

INTRODUZIONE

Gli edifici storici rappresentano un'importante parte del patrimonio culturale esistente e caratterizzano, in modo unico ed irripetibile, le società in cui sono inseriti; essi rappresentano più del 50% degli edifici presenti sia sul territorio europeo sia italiano e salvaguardare tale ricchezza è dovere imprescindibile di ogni cittadino.

Tali strutture sono spesso caratterizzate da carenze sia strutturali sia energetiche dovute alla scarsa manutenzione eseguita nel corso degli anni ed alla difficoltà di effettuare interventi su di essi, in quanto sottoposti alla tutela dei Beni Culturali e soggetti a rigorosi vincoli. È doveroso effettuare analisi ed interventi su di essi affinché l'elevata inefficienza e degrado ambientali che li contraddistinguono non possano tramutarli in una reale minaccia per la società e l'ambiente circostante.

Per preservare tale patrimonio è necessario dunque intervenire ma occorre farlo con i mezzi idonei per non creare ulteriori danni che, considerata l'importanza dell'oggetto in esame, potrebbero rilevarsi gravi ed irreparabili. Un consistente aiuto, a tal fine, è fornito dalla diagnostica strutturale che mediante tecniche non distruttive fornisce un ottimo strumento per la conoscenza del manufatto in esame e la programmazione di eventuali interventi su di esso.

A tal proposito sono finanziati dall'Unione Europea specifici progetti inerenti le tematiche introdotte per cercare di promuovere nuove sfide scientifiche alla ricerca di metodi, talvolta anche innovativi, che possano combattere l'inadeguatezza a cui sono attualmente soggetti gli edifici storici. In particolare, tali progetti riguardano determinati casi studio dislocati nei diversi stati membri con l'intento di raccogliere le diverse problematiche caratterizzanti il patrimonio culturale esistente; i risultati ottenuti sui singoli casi studi forniranno un'ottima base e punto di partenza per l'applicazione di essi su scala globale.

L'obiettivo principale del lavoro svolto, ed in seguito descritto in ogni suo particolare, è stato quello di indagare, mediante l'utilizzo di tecniche diagnostiche indirette e non invasive, sullo stato di fatto di determinati casi studio contemplati all'interno dei progetti europei 3ENCULT e SMooHS al fine di fornire risultati interessanti ed innovativi che dimostrino la versatilità ed efficacia di tali tecniche e dimostrino la loro applicabilità sia ai fini energetici sia strutturali. Nello specifico è

stato effettuato il monitoraggio dei moti convettivi dell'aria all'interno di una zona significativa della Palazzina della Viola (Bologna) mediante l'utilizzo della termografia infrarossa, un'indagine GPR sia su solai presenti alla Palazzina della Viola (Bologna) sia su muretti in pietra leccese realizzati presso il laboratorio CETMA (Brindisi) e la valutazione della permeabilità all'aria di Palazzo D'Accursio (Bologna) mediante l'esecuzione del Blower Door Test.

Il *primo capitolo* riassume le prescrizioni contenute all'interno delle "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni (2006)" al fine di ottenere un completo quadro conoscitivo del manufatto in esame, rilevando le principali caratteristiche e criticità mediante prove e modelli idonei al singolo caso di studio. Sono inoltre riportati gli scopi, la strumentazione ed i principi delle tecniche diagnostiche non distruttive utilizzate nell'analisi svolta:

- la termografia ad IR è in grado di rilevare e rappresentare la radiazione infrarossa emessa da un corpo la quale, essendo funzione della temperatura superficiale del corpo stesso, permette alla termocamera di misurare direttamente la temperatura e fornire in output il termogramma dell'oggetto;

- il Ground Penetrating Radar è basato sulla propagazione di un fascio di onde elettromagnetiche irradiato nel solido da indagare, la misura del ritardo tra l'istante in cui viene emesso il segnale da parte dell'antenna emittente e quello in cui viene captato dall'antenna ricevente permette di rilevare eventuali difetti presenti nel mezzo e non visibili dall'esterno;

- il Blower Door Test, attraverso la sua particolare strumentazione, permette di instaurare una depressione o sovrappressione tra l'involucro interno, luogo della misurazione, e l'ambiente esterno circostante permettendo di valutare le infiltrazioni d'aria presenti e di stimare, nello stato di fatto, l'ermeticità dell'edificio;

Il *secondo capitolo* presenta una panoramica sullo stato dell'arte e della ricerca inerente le tecniche diagnostiche precedentemente introdotte e descritte nel dettaglio; particolare attenzione è fornita ai risultati ottenuti da recenti studi ed analisi eseguiti su edifici storici in muratura mediante tali tecniche al fine di proporre interessanti spunti per eventuali impieghi e prove futuri.

Nel *terzo capitolo* sono riportati gli scopi ed obiettivi principali dei due progetti europei che contemplano i casi studio inerenti il lavoro svolto. In particolare il progetto

3ENCULT (Efficient Energy for EU Cultural Heritage) propone di colmare il gap presente tra la conservazione del patrimonio culturale esistente e le problematiche inerenti l'elevato grado di inefficienza energetica e strutturale; al suo interno sono presenti due casi studio inerenti il territorio italiano e, nello specifico, la Palazzina della Viola (Bo) e Palazzo D'Accursio (Bo). Il progetto SMooHS (Smart Monitoring of Historic Structure), a cui appartiene l'analisi georadar svolta sui muretti in pietra leccese, riguarda invece il monitoraggio "intelligente" degli edifici storici mediante lo sviluppo di sistemi poco invasivi e di facile installazione; un ausilio importante alle diverse fasi in cui esso è articolato è stato fornito dalla diagnostica non distruttiva che ha permesso la comprensione del reale comportamento e stato di fatto delle strutture in esame.

Nel *quarto capitolo* è descritta la procedura effettuata per monitorare i moti convettivi dell'aria all'interno del salone principale della Palazzina della Viola (Bo) facendo ricorso all'utilizzo della termografia ed all'installazione di strisce di carta, appese dal soffitto al pavimento, nell'area in esame. In particolare è stato effettuato il monitoraggio sia dei flussi di aria calda, mettendo in collegamento il salone con la loggia adiacente caratterizzata da una temperatura maggiore, sia dei flussi di aria fredda, mettendo in collegamento il salone con la stanza adiacente più fredda rispetto ad esso. Inquadrando le strisce di carta mediante diverse serie termografiche, nelle diverse condizioni climatiche, è stato possibile rilevare la temperatura dell'aria alle differenti quote di altezza e realizzare mappe di temperature sia orizzontali sia verticali. La veridicità dei risultati ottenuti è stata confermata dalla verifica svolta mediante l'utilizzo di un fumogeno colorato che ha reso visibile l'andamento reale dei flussi dell'aria nelle diverse condizioni di prova.

Il *quinto capitolo* tratta l'impiego della tecnica del GPR come metodologia di indagine sui solai presenti al primo piano della Palazzina della Viola (Bo). L'analisi è incentrata sull'individuazione e localizzazione degli elementi principali della struttura in esame focalizzando l'attenzione sulle loro caratteristiche geometriche e materiali.

Nel *sesto capitolo* è riportata invece l'indagine GPR su muretti in pietra leccese realizzati presso il laboratorio CETMA di Brindisi; in tal caso lo scopo è quello di risalire alla conformazione interna dei muretti intonacati, in termini di corsi di mattoni, giunti di malta ed eventuali difetti interni, e cogliere la risalita dell'acqua nel muretto

immerso in una soluzione di acqua e cloruro di sodio allo 0.05 % rispettivamente per 2h e 30' e 5h.

Il *settimo capitolo* tratta infine l'esecuzione del test di permeabilità all'aria, o Blower Door Test, a Palazzo D'Accursio (Bo) al fine di valutarne l'effettiva ermeticità, rilevare i principali punti critici dell'involucro edilizio e valutare l'applicabilità inusuale di tale tecnica su edifici storici in muratura, attualmente esclusi dall'obbligo di certificazione energetica.

1 DIAGNOSTICA DEL PATRIMONIO ESISTENTE MEDIANTE TECNICHE NON DISTRUTTIVE

La diagnostica strutturale è una disciplina che fatica a trovare una specifica collocazione all'interno delle scienze ingegneristiche poiché essa ha lo scopo di fondere insieme i concetti principali derivanti dalle nozioni teoriche di base e le osservazioni legate alla pratica ed all'esperienza; tuttavia, proprio tale duplicità di intenti e di scopi, la colloca tra le discipline attualmente più utilizzate nel campo dell'ingegneria civile-strutturale. Le tecniche diagnostiche, se eseguite in modo corretto ed opportuno, forniscono un ottimo strumento per la conoscenza del manufatto in esame e la programmazione di eventuali interventi su di esso; in particolare, l'utilizzo di tecniche diagnostiche non distruttive permette di ampliare il campo di applicabilità di tale disciplina a tutte le situazioni maggiormente delicate quali, ad esempio, gli interventi sul patrimonio storico esistente.

1.1 LINEE GUIDA PER I BENI CULTURALI

1.1.1 Oggetto e Scopi delle Linee Guida

Tutti gli interventi inerenti i beni culturali esistenti sul territorio nazionale hanno l'obbligo di far riferimento e rispettare le prescrizioni vigenti contenute nelle *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni (2006)*. La redazione di tali linee guida nasce dall'esigenza di tutelare e porre in sicurezza il patrimonio culturale esistente; il concetto di salvaguardia, difatti, è molto diffuso all'interno di ogni pratica amministrativa-progettuale ma non è stato mai chiarito, nel particolare, un suo significato pratico concreto. Intervenire sullo stato di fatto degli edifici esistenti, se non eseguito opportunamente, non risolve la criticità per la quale il lavoro è stato programmato ed inoltre può danneggiare in modo irreparabile il bene in esame. Talvolta vengono eseguiti interventi frutto di approfonditi studi che, su edifici storici, risultano

totalmente fallimentari; occorre infatti entrare nell'ottica che applicare i criteri costruttivi del nuovo su edifici esistenti non ha le stesse probabilità di riuscita ed inoltre potrebbe causare la perdita definitiva di una parte del patrimonio. Lo scopo delle Linee Guida, tenute costantemente aggiornate, è quello di guidare l'esperto nella progettazione di interventi sulle strutture in muratura che tengano conto, realmente, della tutela e sicurezza delle stesse; è stato cercato di raccogliere, in un unico testo, una serie di utili indicazioni supportate da validi e rigorosi modelli scientifici-matematici. Un fondamentale apporto a tale documento è attribuibile alla ricerca che è in grado di fornire, in continuo, informazioni inerenti il campo di applicabilità e di riuscita delle diverse metodologie utilizzabili su edifici esistenti; nell'insieme degli studi effettuati i risultati migliori e più significativi sono presi in considerazione per l'intero patrimonio nazionale. Per raggiunger buoni obiettivi occorre che vi sia una sensibilizzazione delle mentalità al fine di porre maggiore attenzione a tali tematiche ed operare in modo corretto e costruttivo; non sono necessarie grandi manovre bensì piccoli passi che, se compiuti costantemente, sono in grado di fornire risultati soddisfacenti.

1.1.2 Conoscenza del manufatto

All'interno delle Linee Guida vengono presi in considerazione i diversi aspetti che portano dall'identificazione dell'azione sismica e della capacità della struttura ai criteri da seguire per ridurre la vulnerabilità della stessa; le caratteristiche del manufatto e le relative criticità dovranno essere accertate mediante prove e modelli idonei al singolo caso di studio.

In particolare, nel *Capitolo 4*, sono fornite le indicazioni necessarie per una approfondita conoscenza del manufatto fondamentale sia per una corretta valutazione del rischio sismico che per la programmazione di eventuali interventi di miglioramento. La conoscenza del manufatto, per un edificio storico in muratura, è maggiormente complessa rispetto agli edifici di nuova costruzione in quanto spesso è presente una certa aleatorietà circa i dati iniziali del progetto e le fasi costruttive, gli interventi successivi alla realizzazione, i materiali utilizzati ed il loro stato attuale. Inoltre, nell'operare in un edificio storico, occorre porre particolare attenzione all'impatto che il generico intervento può avere sulla struttura stessa e sui beni contenuti al suo interno. Prendendo in considerazione tali aspetti occorre realizzare un quadro conoscitivo il più completo possibile del manufatto in esame affinché sia disponibile una buona base di

dati necessari per costruire il modello e studiare il comportamento strutturale dell'edificio; più il livello di conoscenza è accurato tanto più il modello sarà attendibile. Sono riportate, nello specifico, le diverse fasi proposte dalle Linee Guida per la conoscenza completa del manufatto:

- Identificazione della struttura: occorre rilevare la localizzazione del manufatto sul territorio ed effettuare un primo rilievo strutturale mettendo in evidenza, sin da subito, la presenza di eventuali elementi di pregio. Deve essere analizzato il contesto in cui la struttura è posizionata ed il rapporto della stessa con l'intorno, sia in termini naturali-paesaggistici che di relazioni con manufatti e servizi contigui.

- Caratterizzazione funzionale dell'edificio e dei suoi spazi: occorre effettuare un'analisi sull'evoluzione dell'edificio nel suo complesso ed in ogni sua singola parte; tale aspetto è fondamentale per comprendere gli interventi che esso ha subito nel corso degli anni e la presenza di eventuali segni di dissesto o degrado.

- Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti: occorre ricostruire, in modo dettagliato e ricorrendo alle informazioni presenti negli archivi, l'intera storia costruttiva del bene evidenziando ogni sua fase realizzativa e gli eventi subiti maggiormente significativi e traumatici.

- Rilievo geometrico: occorre rilevare, mediante apposite apparecchiature, le caratteristiche plano-altimetriche degli elementi costruttivi principali e rappresentare i risultati mediante piante, sezioni e dettagli costruttivi. La difficoltà di tale fase è relativa alla difficile accessibilità di ogni punto dell'edificio in esame ed alla presenza di beni (arredi, affreschi..) che limitano la visualizzazione della struttura; a tal proposito occorre ricorrere all'utilizzo di tecniche diagnostiche, quali termografia, georadar o endoscopia, che permettono il rilievo delle zone fisicamente non accessibili. Tale fase deve essere completata mediante il rilievo e la rappresentazione del quadro fessurativo. La conoscenza della geometria dell'edificio, ed in particolare delle caratteristiche degli elementi resistenti, è fondamentale per la realizzazione del modello e lo studio del comportamento strutturale.

- Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione: per individuare in modo completo lo schema resistente del manufatto occorre effettuare una ricerca approfondita sulla qualità e sullo stato di fatto dei materiali presenti; tali informazioni, in genere, sono acquisite mediante tecniche diagnostiche non distruttive. Per ottenere una conoscenza approfondita sarebbe necessario effettuare le prove in modo diffuso, tuttavia, per ragioni legate sia all'economia che all'impatto sul bene in esame, è

programmato il minor numero possibile di prove; per completare il quadro di informazioni i risultati di tali prove devono poi essere correlati e confrontati con la regola d'arte della zona in esame.

- Caratterizzazione meccanica dei materiali: le indagini non distruttive ed i rilievi visivi possono fornire una buona conoscenza dello stato di fatto dell'edificio ma lo studio del comportamento strutturale richiede, in particolare per la muratura, la conoscenza approfondita delle caratteristiche meccaniche di deformabilità e resistenza dei materiali. Occorre, quindi, effettuare delle prove debolmente distruttive o distruttive in porzioni limitate del manufatto; tali zone devono essere scelte con cautela facendo riferimento agli aspetti rilevati nelle altre fasi di conoscenza del manufatto.

- Terreno e fondazioni: la conoscenza del suolo in cui è posizionato il manufatto e delle relative fondazioni è fondamentale per valutare, in particolare in presenza di sisma, il comportamento della struttura. È necessario redarre una relazione geotecnica sulle caratteristiche della zona in esame ed effettuare uno studio sulla tipologia di fondazioni presenti; la conoscenza di tali aspetti non deve essere finalizzata solo allo stato attuale ma deve prendere in considerazione le modifiche avvenute nel corso degli anni.

- Monitoraggio: terminata la ricerca delle informazioni necessarie per una buona conoscenza del manufatto occorre programmare controlli periodici di monitoraggio che permettano di conservare e tutelare il bene sia in condizioni ordinarie che in situazioni di emergenza.

Completata la conoscenza del manufatto il progettista, in base al livello conoscitivo della struttura, assume un fattore di confidenza F_C , compreso tra 1 e 1,35; tale fattore di confidenza può essere valutato sulla base di diversi fattori parziali di confidenza associati al livello di approfondimento raggiunto in ogni categoria di indagine (Tab. 1.1):

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{CK} \quad (1)$$

Se la valutazione sismica viene effettuata utilizzando modelli che considerano la deformabilità e resistenza dei materiali e degli elementi strutturali il fattore di confidenza si applica alle caratteristiche dei materiali, al contrario, utilizzando modelli di corpo rigido, che non tengono in considerazione la resistenza dei materiali, si applica direttamente alla capacità della struttura.

Tabella 1.1: Fattori parziali di confidenza per i livelli di approfondimento raggiunti nelle diverse categorie di indagine.

Rilievo geometrico	Rilievo materico e dei dettagli costruttivi	Proprietà meccaniche dei materiali	Terreno e fondazioni
completo $F_{C1}=0,05$	limitato $F_{C2}=0,12$	desunte da dati già disponibili $F_{C3}=0,12$	limitate indagini ed assenza di dati geologici ed informazioni sulle fondazioni $F_{C4}=0,12$
completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi $F_{C1}=0$	esteso $F_{C2}=0,06$	desunte da indagini limitate $F_{C3}=0,06$	limitate indagini e disponibilità di dati geologici ed informazioni sulle fondazioni $F_{C4}=0,06$
	esaustivo $F_{C2}=0$	desunte da indagini estese $F_{C3}=0$	indagini estese ed esaustive $F_{C4}=0$

1.2 TECNICHE DIAGNOSTICHE NON DISTRUTTIVE UTILIZZATE

1.2.1 TERMOGRAFIA INFRAROSSA: Scopi, Strumentazione e Principi della tecnica

La termografia a IR è una tecnica diagnostica non distruttiva in grado di acquisire immagini nel campo dell'infrarosso sfruttando la diversa capacità dei materiali di condurre e trasmettere calore per irraggiamento. Le normative nazionali di riferimento sono la UNI 10824-1:2000 "*Prove non distruttive – Termografia all'infrarosso – Termini e definizioni*" e la UNI EN 13187:2000 "*Prestazione termica degli edifici – Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi – Metodo all'infrarosso*"; a supporto di tali testi è possibile far riferimento alle normative internazionali inerenti la tecnica in esame quali, ad esempio, la ASTM C1060: "*Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings*" e la DIN 54 190-1/2/3 "*Prove non distruttive – Esame termografico – Parte 1: Principi generali, Parte 2: Attrezzatura, Parte 3: Condizioni*".

Scopi

In principio la tecnica della termografia a IR ha trovato un'ampia diffusione in campo militare per la realizzazione di sensori notturni, sistemi di puntamento e sistemi guida per missili; in seguito, a partire dagli anni '70, è stata adottata anche in diversi settori della diagnostica medica (oculistica, oncologia..) e strutturale.

In particolare, nel campo dell'ingegneria civile, tale tecnica è utilizzata per la valutazione delle dispersioni termiche degli edifici, il rilievo delle diverse temperature presenti all'interno dell'involucro, l'individuazione della struttura portante e la localizzazione di perdite idrauliche e fessure; negli ultimi anni ha trovato un'ulteriore applicazione nel controllo di edifici esistenti di interesse storico e culturale in cui, talvolta, le informazioni inerenti le caratteristiche strutturali ed architettoniche del manufatto non sono soddisfacenti ed occorre eseguire un'indagine conoscitiva che sia il minor possibile invasiva.

La termografia infrarossa, a confronto con le altre tecniche diagnostiche non distruttive, permette una rapida ed immediata visualizzazione dei risultati in quanto non è necessaria l'elaborazione e l'interpretazione dei dati a posteriori.

Strumentazione e Principi della tecnica

In natura l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche è rappresentato dallo spettro elettromagnetico; le radiazioni elettromagnetiche sono onde caratterizzate da una propria lunghezza d'onda e frequenza e lo spettro è suddiviso arbitrariamente in "bande" in base alle diverse lunghezze d'onda. Visivamente si riescono a percepire solo lunghezze d'onda comprese tra 356-1200 nm, tale banda è stata denominata "luce visibile".

La termografia a IR utilizza la banda spettrale dell'infrarosso che, avendo una lunghezza d'onda molto grande, non è visibile per l'occhio umano ma è percepita sotto forma di calore (Fig. 1.1).

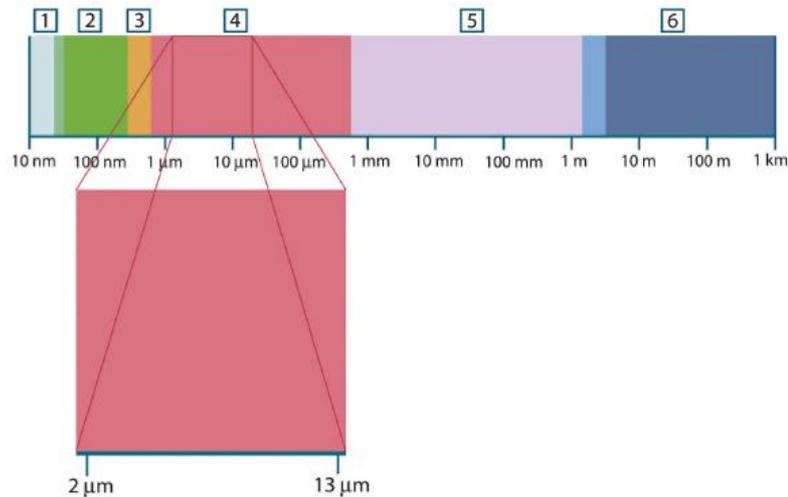


Figura 1.1: Spettro elettromagnetico: 1_raggi X, 2_ultravioletto, 3_luce visibile, 4_infrarosso, 5_microonde; 6_onde radio.

È noto che i corpi emettono energia radiante il cui potere P può essere valutato utilizzando la seguente formulazione empirica:

$$P = \sigma \varepsilon T^4 \quad (2)$$

ossia l'energia emessa dal corpo dipende dalla temperatura, dalla costante di Stefan-Boltzman σ e dall'emissività ε . L'emissività ε è una misura della capacità del materiale di irraggiare energia ed è compresa nel range 0-1; in particolare un corpo nero ha $\varepsilon = 1$ mentre un corpo completamente riflettente (ad esempio uno specchio) ha $\varepsilon = 0$. Nella realtà i valori di emissività sono compresi tra i due valori limite e variano a seconda del materiale in esame; metalli con superficie lucida hanno $\varepsilon < 0.1$ mentre materiali comuni quali legno, carta, acqua, granito, plastica, asfalto hanno $\varepsilon > 0.9$. A differenza della luce visibile, nel campo dell'infrarosso ogni corpo avente temperatura maggiore di 0°C emette calore; l'emissione di raggi infrarossi è direttamente proporzionale alla temperatura del corpo.

La termocamera (o telecamera termografica) è lo strumento in grado di rilevare e rappresentare la radiazione infrarossa emessa da un corpo; tale radiazione, essendo funzione della temperatura superficiale del corpo, permette allo strumento di misurare direttamente la temperatura dell'oggetto e fornire in output un'immagine digitale, detta termogramma, visibile in sito sul monitor dello strumento (Fig. 1.2-1.3).

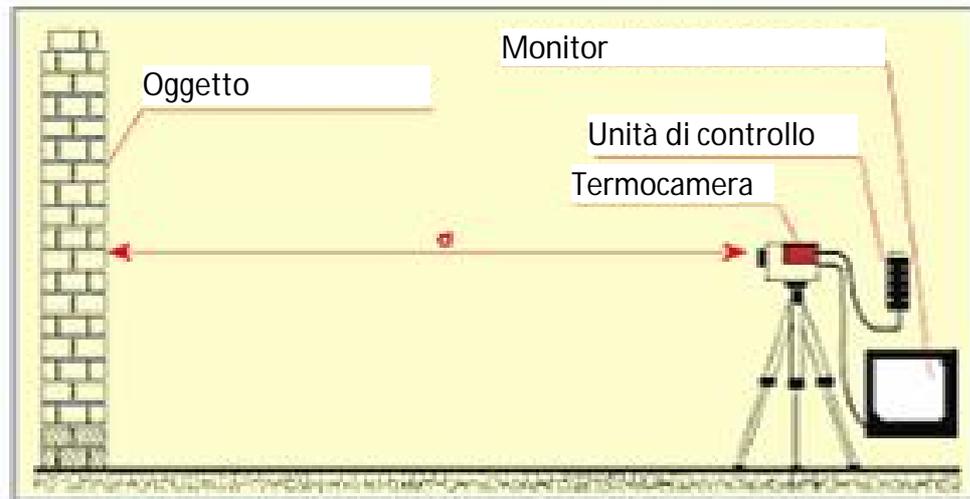


Figura 1.2: Strumentazione utilizzata nel rilievo termografico a infrarossi.

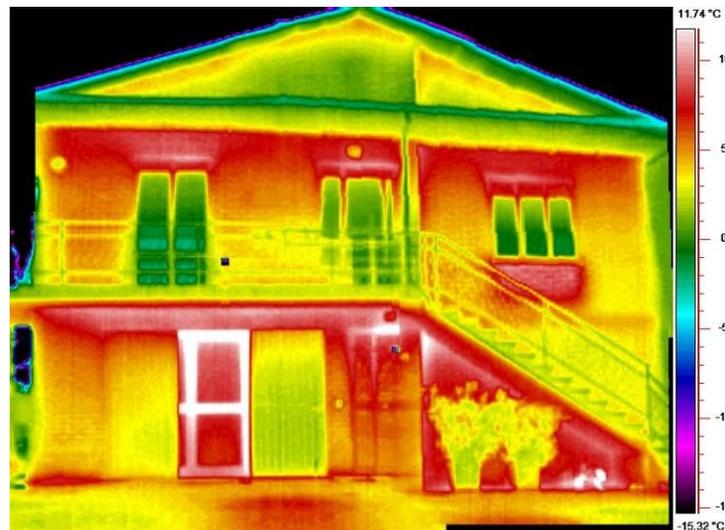


Figura 1.3: Esempio di un termogramma inerente un involucro edilizio.

Le principali caratteristiche che differenziano tra loro le termocamere sono il tipo di sensore utilizzato e la risoluzione geometrica. La tipologia di sensore ed il materiale costituente influenza fortemente la sensibilità termica dello strumento; per applicazioni comuni, in genere, è utilizzato un sensore non raffreddato di tipo microbolometrico a matrice piana realizzato in silicio amorfo o in ossido di vanadio, per applicazioni di ricerca e sviluppo sono utilizzati sensori raffreddati in quanto presentano una sensibilità termica superiore. La risoluzione geometrica influenza il campo di applicabilità della tecnica; termocamere con risoluzioni da 120×140 a 160×160 pixel sono utilizzate per effettuare una manutenzione predittiva, termocamere con risoluzioni da 240×240 a 324×324 pixel sono utilizzate nella maggior parte delle applicazioni e

termocamere con risoluzioni da 500×500 e superiori sono utilizzate per analisi ad elevata precisione.

1.2.2 GPR: Scopi, Strumentazione e Principi della tecnica

Le indagini geofisiche si possono classificare in *attive*, in cui occorre raccogliere ed analizzare fenomeni esistenti, e *passive*, in cui occorre analizzare la risposta a determinati fenomeni indotti; il GPR, tecnica che si basa sull'interpretazione dei segnali riflessi, appartiene a quest'ultimo gruppo. La panoramica generica sui principi base della tecnica, sull'acquisizione dei dati ed interpretazione dei risultati è contenuta all'interno delle norme ASTM D6432-99 (ultima revisione 2005).

Scopi

La tecnica del Ground Penetrating Radar, GPR, è utilizzata per individuare elementi presenti all'interno del mezzo in esame non visibili né raggiungibili dall'esterno; in particolare, è possibile rilevare disomogeneità, vuoti, lesioni, delaminazioni, concentrazione di sali ed umidità. Tale metodologia di indagine è vantaggiosa, rispetto ad altre tecniche, in quanto permette di realizzare analisi non distruttive, e facilmente ripetibili, su qualsiasi tipologia di superficie ed in svariati campi di applicazione.

Nello specifico, per l'ingegneria civile ed ambientale, la tecnica GPR è utilizzata per effettuare rilievi strutturali su pareti e pavimentazioni senza arrecare alcun danno al manufatto, localizzare armature in strutture di cemento armato, effettuare un rilievo dei differenti livelli stratigrafici presenti lungo il profilo di un edificio o di un infrastruttura viaria. Inoltre, un'altra interessante applicazione riguarda la ricerca e l'individuazione di strutture sepolte, quali impianti o strutture varie, ai fini di un'eventuale progettazione e pianificazione di opere di scavo.

Parallelamente a tale campo il GPR può essere utilizzato nelle applicazioni archeologiche per permettere una migliore conoscenza del patrimonio culturale tutt'oggi ancora sepolto (strutture murarie, manufatti, siti di sepoltura, reperti, tracciati di antiche strade) ed organizzare interventi di recupero che non arrechino danni irreparabili ad esso.

Strumentazione e Principi della tecnica

La strumentazione necessaria per svolgere un'indagine radar è composta principalmente da un'unità elettrica di controllo ed un'antenna emittente/ricevente (Fig. 1.4). L'unità di controllo permette di far scattare l'impulso che l'antenna radar trasmette al mezzo, effettuare il settaggio dei parametri principali prima dell'acquisizione dati, mostrare sul display il radargramma rilevato ed archiviare i dati su un disco fisso; l'antenna è un dipolo in grado di trasmettere e ricevere l'impulso elettrico sottoforma di onda elettromagnetica. La scelta dell'antenna da utilizzare nell'indagine è uno dei fattori principali in sede di analisi preliminare dell'intervento in quanto la frequenza dell'antenna è il parametro che, insieme alla tipologia del mezzo in esame, influenza la profondità di penetrazione del segnale e le dimensioni dei difetti rilevati. Più è elevata la frequenza dell'antenna utilizzata tanto più la porzione di solido indagato sarà maggiore e le dimensioni dei difetti colti minori (Tab. 1.2).



Figura 1.4: Unità di controllo ed antenna da 900 MHz.

Tabella 1.2: Scelta della tipologia di antenna in base al campo di applicazione.

<i>Applicazioni</i>	<i>Tipologia Antenna (Scelta Primaria)</i>	<i>Tipologia Antenna (Scelta Secondaria)</i>	<i>Range di profondità (stima)</i>
Structural Concrete, Roadways, Bridge Decks	2600 MHz	1600 MHz	0-0.3 m
Structural Concrete, Roadways, Bridge Decks	1600 MHz	1000 MHz	0-0.45 m

Structural Concrete, Roadways, Bridge Decks	1000 MHz	900 MHz	0-0.6 m
Concrete, Shallow Soils, Archaeology	900 MHz	400 MHz	0-1 m
Shallow Geology, Utilities, UST's, Archaeology	400 MHz	270 MHz	0-4 m
Geology, Environmental, Utility, Archaeology	270 MHz	200 MHz	0-5.5 m

Il principio di funzionamento della tecnica GPR è basato sulla propagazione di un fascio di onde elettromagnetiche, nel campo delle radiofrequenze, irradiate nel solido da indagare mediante un dipolo (antenna emittente/ricevente). Tale tecnica è in grado di individuare un target (riflettore) all'interno del solido mediante la misura del ritardo tra l'istante in cui viene emesso il segnale e quello necessario, alle onde riflesse dal bersaglio, per tornare all'antenna ricevente. In sintesi un'antenna emette un segnale di tipo impulsivo (onda), l'onda si propaga nel mezzo omogeneo e quando incontra una discontinuità (target) viene, in parte, respinta in superficie e captata dall'antenna ricevente (Fig. 1.5).

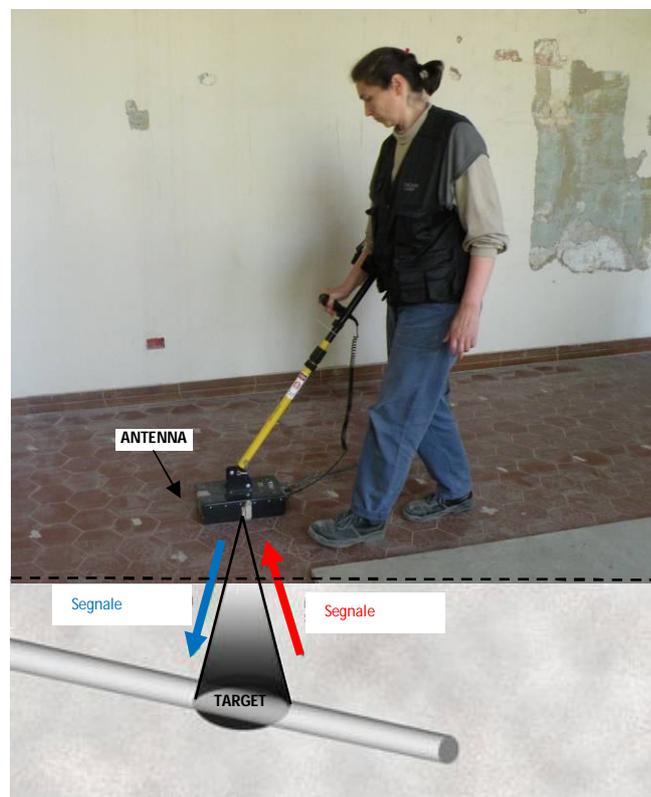


Figura 1.5: Principio di funzionamento della tecnica GPR.

L'elaborazione dei segnali riflessi durante l'avanzamento dell'antenna e da essa recepiti permettono di ottenere, in output, un'immagine perpendicolare alla direzione di avanzamento: il radargramma (Fig. 1.6). L'ascissa del radargramma presenta la distanza percorsa con la strumentazione mentre l'ordinata presenta l'asse dei tempi (ns), opportunamente trasformabile in profondità o scan. Uno scan è dato dall'insieme di tutti gli impulsi su una singola area e l'insieme di tutti gli scan compone il radargramma. Su di esso, inoltre, sono visualizzati i marks inseriti dall'operatore, in fase di acquisizione dati, e che forniscono un importante aiuto, in sede di analisi, per la localizzazione delle informazioni ottenute. All'interno del radargramma sono visibili diverse riflessioni le cui caratteristiche dipendono dall'oggetto rilevato; in particolare determinati corpi presentano la caratteristica forma ad iperbole (Fig. 1.7) in quanto il riflettore è colto dal fascio radar emesso dall'antenna in un intorno di spazio che precede e che segue la perpendicolare rispetto allo stesso; in tal modo la distanza antenna-oggetto tende prima a diminuire ed in seguito ad aumentare. Tale forma ad iperbole è caratteristica di bersagli posizionati ortogonalmente alla linea di scansione; al contrario, per corpi paralleli alla linea di scansione, il pattern prodotto presenta un andamento sub-orizzontale (Fig. 1.8). Per effettuare un'analisi completa, e cogliere la totalità dei corpi presenti nell'area indagata, occorre acquisire dati radar in entrambe le direzioni.

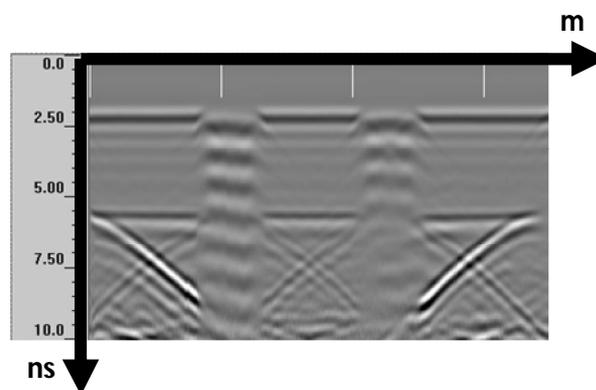


Figura 1.6: Radargramma.

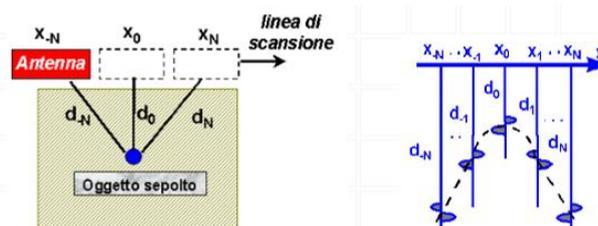


Figura 1.7: Creazione del profilo ad “iperbole” per la riflessione di un target puntuale.

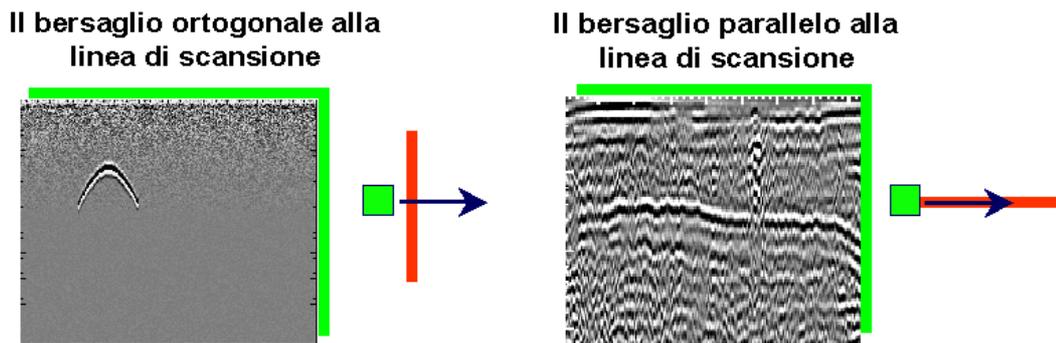


Figura 1.8: Riflessione visualizzata nel radargramma in funzione della direzione di acquisizione delle linee radar.

I parametri principali che regolano il fenomeno di trasmissione delle onde elettromagnetiche (Teoria di Maxwell), e quindi l'ampiezza della riflessione degli impulsi, sono la conducibilità σ , la costante dielettrica relativa ϵ e la permittività magnetica μ , che spesso assume un valore unitario e tende ad essere trascurata. La *conducibilità* σ è un parametro che può influenzare in maniera negativa le indagini in quanto un materiale fortemente conduttibile, ad esempio un metallo, tende ad assorbire il segnale e dar luogo ad una forte attenuazione del segnale. La *costante dielettrica relativa del materiale* ϵ è invece la caratteristica che maggiormente influenza la velocità di propagazione del segnale v in quanto può, con buona approssimazione, ritenersi valida la relazione:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

in cui c rappresenta la velocità nel vuoto dell'onda elettromagnetica pari a circa 0.3 m/ns. Più è elevata la differenza di costante dielettrica tra i diversi materiali attraversati dall'impulso tanto più la riflessione prodotta sarà forte; in genere la riflessione maggiore è data dall'interfaccia aria-calcestruzzo a cui seguono riflessioni più profonde meno significative (Tab. 1.3). Nella pratica la costante dielettrica relativa è un parametro fortemente incerto in quanto essa non dipende solamente dalle caratteristiche intrinseche del singolo materiale bensì anche da fattori ambientali esterni e dal comportamento globale dei diversi materiali che spesso coesistono nel mezzo analizzato.

La *velocità di propagazione del segnale* v può, tuttavia, essere ricavata anche mediante la seguente relazione che non implica la conoscenza a priori della costante dielettrica:

$$v = 2 \frac{s}{t} \quad (4)$$

in cui s rappresenta lo spazio attraversato dal segnale e t il tempo di volo dello stesso; il fattore 2 è legato al fatto che occorre considerare che lo spazio necessario all'onda per giungere dall'antenna emittente al riflettore e lo spazio necessario per tornare dal riflettore all'antenna ricevente. La conoscenza della velocità di propagazione è importante in quanto da essa è possibile ricavare la lunghezza d'onda del segnale e la *risoluzione*:

$$\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow \text{risoluzione} \cong \frac{1}{3} \lambda \quad (5)$$

dove f è la frequenza dell'antenna utilizzata. Inserendo il valore della frequenza centrale, fornito dal produttore, è possibile individuare la risoluzione media mentre inserendo il valore della frequenza massima, ricavata dal singolo radargramma, è possibile ricavare il valore della risoluzione minima. La conoscenza della risoluzione, in cm, è importante poiché fornisce la dimensione più piccola che la strumentazione riesce a rilevare.

Tabella 1.3: Riflessione del fascio elettromagnetico in funzione della differenza di costante dielettrica tra i materiali attraversati.

<u>Interfaccia</u>	<u>Contrasto Dielettrico</u>	<u>Riflessione</u>
Asfalto - Cls	medio	media
Cls - Aria	alto	intensa
Solaio – Trave in cls	nessuno	no riflessione
Cls - metallo	alto	intensa
Cls - Acqua	alto	intensa
Cls - PVC	basso - medio	debole

1.2.3 BLOWER DOOR TEST: Scopi, Strumentazione e Principi della tecnica

Il Blower Door Test, o “test della porta che soffia” è una tecnica diagnostica necessaria per effettuare la verifica di permeabilità all'aria di un involucro edilizio, o

delle sue parti maggiormente significative, secondo quanto riportato nella normativa EN 13829/2000: "*Prestazione termica degli edifici - Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore*" recepita in Italia dalla UNI EN 13829/2002.

Scopi

Il Blower Door Test permette di valutare le “perdite di aria” presenti e di stimare, nello stato di fatto, l’ermeticità dell’edificio. Nello specifico la prova fornisce come risultato il numero di ricambi d’aria orari necessari per la zona analizzata; l’edificio risulterà tanto più efficiente quanto più è basso il numero di ricambi orari. L’esecuzione del test consente di valutare, in correlazione al numero di ricambi d’aria, le perdite per ventilazione durante una qualsiasi diagnosi energetica e di considerare l’opportunità di intervenire sugli impianti ed elementi dell’intero involucro al fine di migliorare la salubrità interna, le condizioni termoigrometriche e prevenire la formazione di muffe e condense. È importante che ogni involucro edilizio sia realizzato in modo tale da presentare uno strato continuo impermeabile all’aria; la permeabilità all’aria provoca infatti correnti fastidiose che propagano rumori, odori e polvere, e permettono l’ingresso incontrollato di materiali inquinanti e nocivi quali, ad esempio, il fumo. Individuate le infiltrazioni d’aria presenti nell’edificio, ulteriore scopo di tale test, è quello di prevenire eventuali sprechi energetici per mantenerlo riscaldato in inverno e raffrescato d’estate; focalizzati i punti critici dell’ambiente si agisce direttamente su di essi evitando di generare ulteriori situazioni sfavorevoli.

La moderna tecnologia ha permesso di massimizzare l’isolamento degli edifici ed di ridurre il fabbisogno energetico teorico, tuttavia anche difetti di piccola entità, se situati in punti strategici o distribuiti in tutto il perimetro dell’involucro, possono influenzare pesantemente sia l’andamento della temperatura che il comfort interni. Tali difetti possono derivare, ad esempio, da giunti in cui sono presenti infiltrazioni, da materiale isolante ed impianti installati in modo non corretto, da infissi non propriamente ermetici, da eventuali canne fumarie e prese elettriche o dall’azione del vento ove significativa (Fig. 1.9); nell’individuazione dei punti critici un importante ausilio al Blower Door Test è fornito dalla termografia.

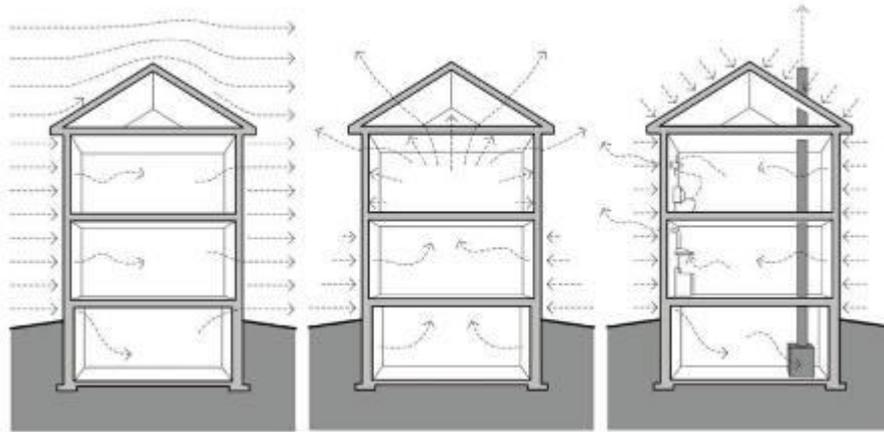


Figura 1.9: Principali cause di perdite d'aria in un edificio.

In fase progettuale è difficile valutare se l'isolamento termico previsto per l'edificio sarà correttamente funzionante al termine della realizzazione dell'opera in quanto durante la fase costruttiva vi sono diversi fattori, dovuti sia al cantiere che ai singoli componenti, che possono influenzare il risultato finale. Una volta terminato l'edificio, per garantire un buon livello e dimostrare che gli obiettivi sono stati rispettati è necessario eseguire il Blower Door Test, tale test fornirà risultati corretti ed attendibili sul reale stato dell'opera.

Negli ultimi anni il Blower Door Test ha conosciuto un notevole sviluppo in quanto è strettamente legato a temi sociali dominanti quali l'inquinamento, il rispetto ambientale e la sostenibilità energetica; inoltre tale test è una verifica di tenuta all'aria obbligatoria per ottenere la certificazione energetica Casa Clima, secondo quanto espresso nella direttiva tecnica 2010. Tale certificazione è uno strumento indispensabile per la valutazione dell'efficienza energetica complessiva dell'edificio e la sostenibilità ambientale dello stesso ed attualmente sta ottenendo una notevole attenzione in diverse regioni italiane. Il Blower Door Test è, dunque, attualmente, una delle poche prove a cui sottoporre un edificio per valutarne l'effettiva costruzione a regola d'arte, ciò rappresenta un ulteriore passo verso un impiego razionale dell'energia ed un'edilizia di qualità.

Strumentazione e Principi della tecnica

La prova consiste nel misurare il volume di aria interna che viene scambiata, in un'ora, con l'aria esterna, quando la differenza di pressione tra interno ed esterno è di 50 Pa, al fine di ricavare la Building Leakage Curve ossia la curva caratteristica di

permeabilità dell'edificio esaminato. La strumentazione necessaria per lo svolgimento del test è composta, oltre che da un telaio con aste telescopiche contenente il ventilatore, da dispositivi di misurazione della pressione e da un'unità esterna di acquisizione ed elaborazione dati che fornisce in output il valore dei ricambi d'aria orari (Fig. 1.10). Il volume di aria che riesce a fluire attraverso il ventilatore corrisponde al volume di aria che penetra attraverso le aperture e le fessure dell'edificio; dividendo il volume orario del flusso di aria con il volume netto dell'edificio si calcola l'indice di permeabilità all'aria:

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V_{\text{int}}}$$

(6)

in cui V_{50} rappresenta la portata volumetrica di permeabilità all'aria e V_{int} il volume interno della zona analizzata (Fig. 1.11).

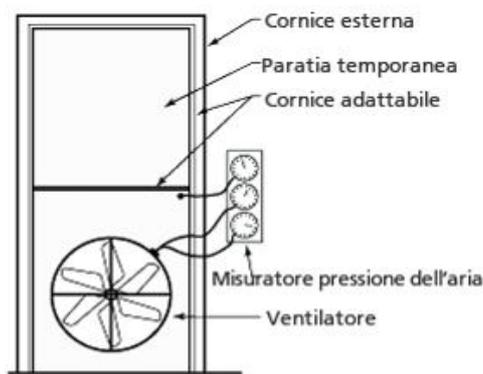


Figura 1.10: Strumentazione necessaria per lo svolgimento del Blower Door Test.

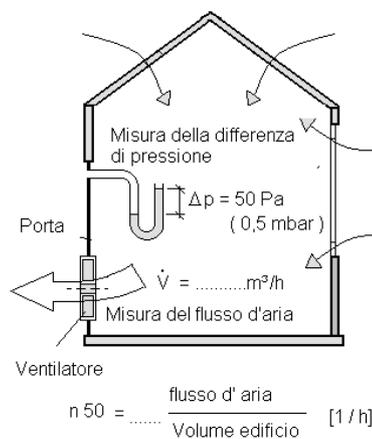


Figura 1.11: Informazioni relative al calcolo del numero di ricambi orari n_{50} .

Il valore di differenza di pressione necessario per eseguire il test è funzione del numero di giri del ventilatore, essi vengono appositamente regolati al fine di stabilire la pressione voluta. Per singole abitazioni o piccoli edifici è prescritto il valore massimo e minimo di Δp a cui eseguire il test che è pari, rispettivamente, a 100 Pa e 50 Pa; per grandi edifici aventi volumetria superiore a 4000 m³ è possibile eseguire il test ad un valore di $\Delta p < 50$ Pa.

Per un corretto svolgimento del test è necessario controllare che tutte le aperture verso l'esterno siano chiuse e che eventuali porte interne alla zona in esame siano aperte, onde mettere in comunicazione tutte le stanze interne. Parametri inoltre essenziali per l'analisi sono la conoscenza delle superfici e volumetrie dell'edificio e delle condizioni ambientali esterne ed interne.

L'esecuzione del test si può riassumere in tre distinte fasi (non necessariamente consequenziali tra loro):

- 1) Nella prima fase, denominata "cruise", viene creata e mantenuta all'interno dell'ambiente in esame una depressione costante pari al valore $\Delta p = |p_{int} - p_{est}| = 50$ Pa (Norma UNI EN 13829); in tali condizioni si ispeziona l'involucro alla ricerca delle perdite di aria ossia dei punti non ermetici. Tali infiltrazioni possono essere colte mediante l'ausilio di strumenti quali l'anemometro, la termocamera o dei generatori di fumo; è possibile identificare le perdite maggiori con il solo utilizzo delle mani. Tale fase può essere interposta tra le due fasi successive o essere eseguita direttamente al termine del test.
- 2) Nella seconda fase si esegue il test in depressione ossia si sottopone l'ambiente ad una depressione decrescente ad intervalli prefissati; il software effettua 100 misurazioni per ogni passo Δp e fornisce in output un valore della Building Leakage Curve. La depressione viene realizzata mediante l'installazione, su un infisso esterno, di un telaio mobile al cui interno è posizionato un ventilatore che soffia aria all'esterno dell'involucro. All'inizio ed al termine di tale test viene richiesto di coprire il ventilatore con l'apposita copertura in nylon ed il software effettua 30 misurazioni a macchina ferma.
- 3) Nella terza fase si esegue il test in pressione ossia, invertendo il flusso del ventilatore che, in tal caso, soffia aria all'interno dell'involucro stesso, si sottopone l'ambiente ad una pressione decrescente ad intervalli prefissati;

il software effettua 100 misurazioni per ogni passo Δp e fornisce in output un valore della Building Leakage Curve. All'inizio ed al termine di tale test viene richiesto di coprire il ventilatore con l'apposita copertura in nylon ed il software effettua 30 misurazioni a macchina ferma.

Il risultato del test, in termini di ricambi d'aria orari riferiti ad una differenza di pressione pari a 50 Pa, è calcolato in automatico dal software mediante il rilievo del flusso di aria all'interno del ventilatore. Sono riportati (Tab. 1.4) il numero di ricambi d'aria massimi previsti dalla normativa tedesca DIN 4108-7 e dalla normativa italiana UNI EN 13829 in correlazione alla tipologia di edificio.

Tabella 1.4: Limitazioni normative inerenti il numero di ricambi orari n_{50} .

TIPOLOGIA EDIFICIO	n_{50} (1/h)	NORMATIVA
Casa Clima ORO	0.6	UNI EN 13829/2002
Casa Clima Classe A	1	UNI EN 13829/2002
Casa Clima Classe B	2	UNI EN 13829/2002
Casa Clima Classe C	2	UNI EN 13829/2002
Senza ventilazione meccanica (ventilazione naturale/manuale)	3	DIN 4108-7: 2001-08
Con aspirazione meccanica dell'aria senza recupero di calore	1.5	DIN 4108-7: 2001-08

2 STATO DELL'ARTE DELLE TECNICHE DIAGNOSTICHE NON DISTRUTTIVE UTILIZZATE

2.1 Termografia infrarossa applicata ad edifici storici in muratura: stato dell'arte della tecnica

Nel corso degli anni sono stati effettuati importanti studi inerenti la diagnostica e la conservazione del patrimonio culturale esistente utilizzando la tecnica della termografia infrarossa (Colantonio, 1997).

Uno dei primi monumenti storici, presenti sul territorio italiano, monitorato attraverso tale tecnica è stata la Cappella degli Scrovegni a Padova contenente il “Giudizio Universale”, famoso affresco di Giotto. Nella Cappella in esame sono state effettuate ulteriori analisi al fine di dimostrare i recenti miglioramenti della termografia, applicata nello specifico alle opere d'arte, e la possibilità di realizzare mediante essa un completo monitoraggio sia della struttura sia del microclima interno (Grinzato et al., 2002).

In primis è stata utilizzata la termografia per rilevare, in modo semplice e non invasivo, le strutture nascoste dietro le pareti e caratterizzate da un diverso materiale; tali elementi sono estremamente importanti per una completa conoscenza del manufatto e dello stato di fatto dello stesso (Fig. 2.1). Inoltre è anche possibile localizzare piccole mancanze di aderenze del gesso, le diverse stratificazioni degli affreschi ed eventuali restauri o ritocchi che essi hanno subito negli anni.

Sebbene può essere applicata qualitativamente la termografia a tal fine, è importante ricorrere anche, in parallelo, ad un'accurata modellazione matematica della costruzione analizzata che permette di effettuare prove diagnostiche nel modo corretto ed evitare errori e dispendio di risorse.

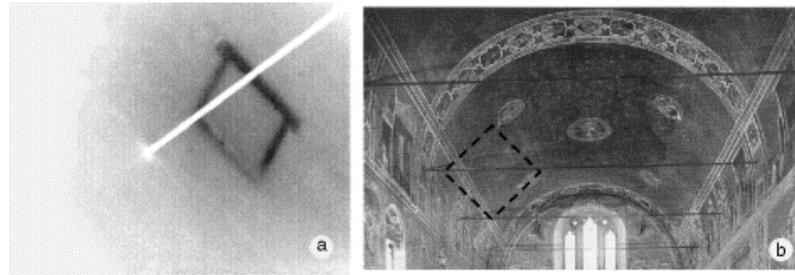


Figura 2.1: Apertura rilevata mediante termografia (a) non visibile ad occhio nudo (b).

Un ulteriore aspetto approfondito in tale analisi è stato il rilievo della profondità delle fessure sulla muratura; talvolta le discontinuità presenti sul rivestimento sono anche visibili ad occhio nudo ma per valutare esattamente quanti e quali strati sono interessati da tale difetto occorre effettuare ulteriori approfondimenti. Questa valutazione può essere svolta mediante l'analisi dei dati termici o delle diverse temperature del flusso d'aria trasferito alle superfici; in particolare è stato notato che monitorando le temperature di una superficie orizzontale interna e dell'aria esterna è possibile rilevare la profondità di estensione della fessura (Fig. 2.2).

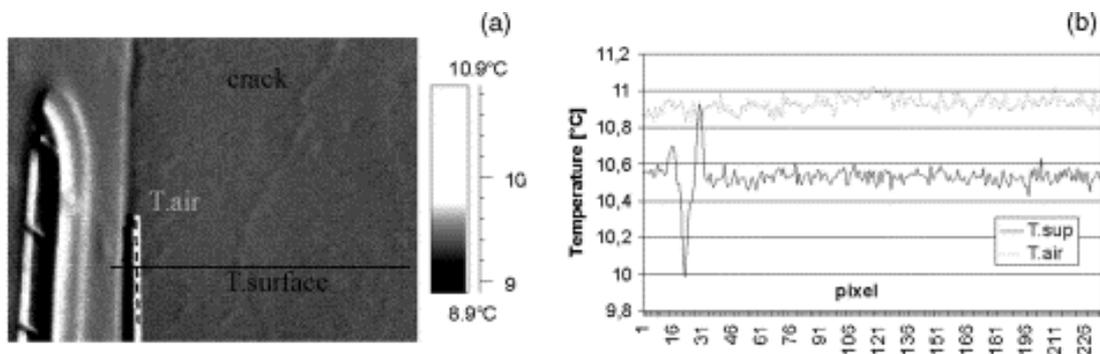


Figura 2.2: Termogramma di una fessura (a) presente sul “Giudizio universale” e barra orizzontale che permette il monitoraggio continuo dell'aria con relativi profili delle temperature (b).

Infine è stato effettuato uno studio sul monitoraggio delle condizioni microclimatiche interne e prevedere possibili rischi per l'integrità del monumento; a tal fine la termografia risulta molto utile poiché permette una visione dettagliata sulla distribuzione delle temperature nello spazio e mediante l'utilizzo di barre di riferimento poste a 100 mm dalla parete affrescata è stato possibile ottenere profili in continuo della temperatura dell'aria. Inoltre sono stati individuati i ponti termici, dove la bassa temperatura superficiale può favorire la condensazione del vapor acqueo generato dai

visitatori; è stato dimostrato che il rischio di condensa è maggiore nei ponti termici situati in prossimità di infissi dai quali può entrare aria umida.

Circa la possibilità di indagare sulla reale struttura di un involucro edilizio è stato svolto un ulteriore studio a Palazzo Pitti (Firenze) avente come scopo la ricostruzione dell'ambiente originario della "Sala delle nicchie" realizzata dall'architetto Bartolomeo Ammannati tra il 1561 ed il 1562 (Imposa, 2010). Fonti storiche certe riferiscono della presenza di 10 nicchie che probabilmente sono state murate e ricoperte con pannelli in legno decorato ma non viene fornita alcuna indicazione circa la loro posizione. L'analisi è stata effettuata mediante la termografia a infrarossi che ha permesso di indagare su un'area piuttosto ampia in poco tempo e non ha danneggiato gli affreschi presenti sulle pareti; essa è stata utilizzata inoltre per studiare la composizione delle pareti nei primi centimetri rilevando il differente comportamento termico dei materiali. Dai rilievi eseguiti sono state identificate, con certezza, almeno 3 nicchie la cui presenza non è visibile dall'esterno ma è nettamente confermata dalle immagini termografiche che evidenziano una notevole differenza di temperatura e tessitura con le pareti circostanti (Fig. 2.3).

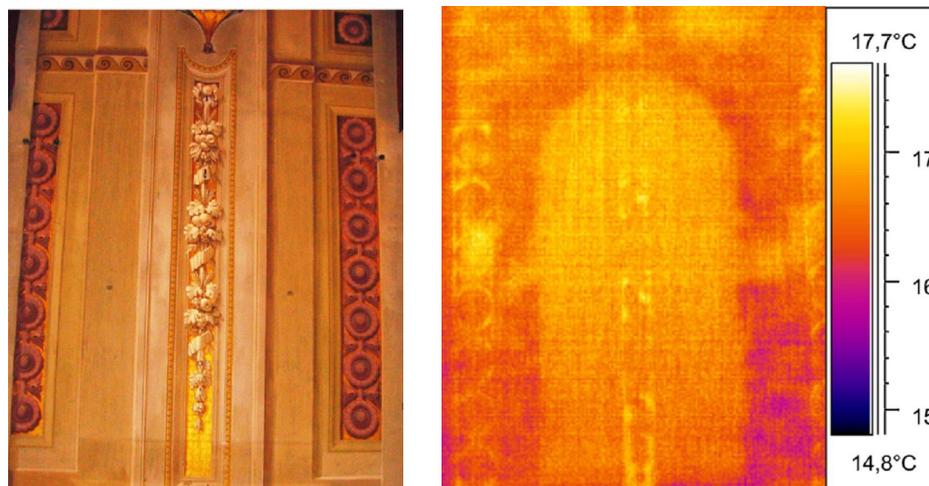


Figura 2.3: Immagini della posizione di un'ipotetica nicchia (a) e relativo termogramma (b).

Tuttavia, nonostante le numerose applicazioni che ricorrono alla termografia per determinare le caratteristiche principali di un involucro edilizio, la sua applicazione ai materiali da costruzione, in particolare alla muratura, non è stata ancora ben approfondita e non sono del tutto chiari i parametri che possono influenzare i dati acquisiti. A tal proposito è stato effettuato uno studio (Barreira et al., 2007) mirato alla

valutazione dell'applicabilità di tale tecnica sui diversi materiali utilizzati nel campo delle costruzioni mediante semplici esperimenti condotti presso il Laboratorio di Fisica della Facoltà di Ingegneria di Porto. In particolare per valutare come le misure possano essere influenzate dal valore dell'emissività sono stati immersi in acqua due campioni identici di calcestruzzo e poi sono stati fatti essiccare in due camere climatiche a differente temperatura; durante entrambe le fasi sono state rilevate delle immagini termiche con differenti valori di emissività ($\epsilon = 0.62, 0.85, 0.91$ e 0.95). Osservando le immagini (Fig. 2.4) è possibile notare come esse siano molto differenti tra loro ed il termogramma maggiormente chiaro risulta essere quello acquisito con emissività pari a 0.85 ; per un'analisi qualitativa sui differenti valori di temperatura superficiale il valore di emissività non risulta essere un parametro fondamentale, tuttavia, considerare il valore corretto di tale parametro può semplificare l'interpretazioni delle immagini termiche e dei risultati.

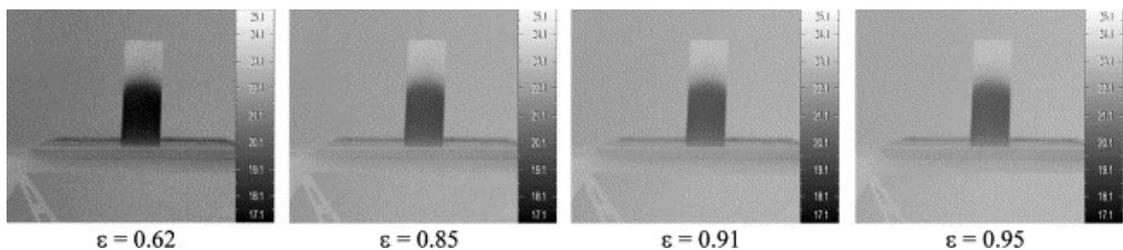


Figura 2.4: Termogrammi acquisiti con differenti valori di emissività relativi a campioni di calcestruzzo immersi in acqua e lasciati essiccare.

Durante lo svolgimento della prova è stato inoltre notato che al termine del periodo di essiccazione il bordo del calcestruzzo non risultava più essere distinto dal fondo dell'immagine essendo le loro temperature molto simili; è possibile rilevare le temperature di oggetti che differiscono di almeno 1°C dalla temperatura ambientale. Ulteriori parametri che possono incidere sulle acquisizioni termografiche sono la riflettività ed il colore degli oggetti in esame; entrambi i fattori possono mascherare eventuali difetti presenti nei materiali o indurre una variazione maggiore di temperatura superficiale a causa dei riflessi termici.

In particolare è stato notato che l'influenza legata al colore risulta essere maggiore nelle ore centrali della giornata, quando le differenze di temperature sono più pronunciate, per poi diminuire con l'arrivo della sera.

Recentemente è stato effettuato uno studio sul ruolo della temperatura e dell'umidità nella conservazione del patrimonio culturale esistente e sull'importanza di indagare su tali fattori mediante tecniche non distruttive quali la termografia ad infrarossi (Camuffo et al., 2010). In particolare sono state messe in luce alcune problematiche, teoriche e pratiche, inerenti il rilievo delle temperature all'interno di edifici di elevato valore artistico spesso soggetti alla tutela dei Beni Culturali; non tutte le tematiche affrontate hanno trovato una soluzione ma forniscono uno spunto per eventuali progressi futuri. Per ovviare, ad esempio, al fatto che non è possibile utilizzare la termografia per rilevare le temperature di corpi ad alta riflettività o bassa emissività (vetro, aria...) è stato proposto di installare la carta su tali superfici in quanto essa possiede una capacità termica trascurabile ed i pezzi di carta assumono, di fatto, la temperatura della superficie in esame e risultano essere visibili nei termogrammi. Nello specifico, è stata installata una striscia di carta, da pavimento a soffitto, nella navata di una chiesa; dal relativo termogramma (Fig. 2.5) sono visibili sia la striscia di carta sulla quale è possibile rilevare la temperatura dell'aria sia i diversi oggetti e corpi presenti nell'ambiente.



Figura 2.5: Mappa delle temperature presenti all'interno di una chiesa e striscia di carta installata per rilevare la temperatura dell'aria.

È stato inoltre studiato il fenomeno dei moti dell'aria presenti all'interno di un ambiente mediante la realizzazione di un semplice esperimento; sono state appese al muro una serie di chiavi in metallo e sono state lasciate in tale posizione per diversi giorni. Tra le chiavi, la parete e l'aria interna è presente una differenza di temperatura

non trascurabile che da luogo a continui movimenti di aria; tali movimenti sono gli stessi responsabili dello spostamento di particelle fini quali ad esempio la polvere. Quando le forze d'inerzia delle particelle superano la resistenza viscosa dell'aria esse si depositano sulle pareti circostanti creando la sagoma delle chiavi stesse sul muro. Tale fenomeno naturale, che assume un ruolo primario nella conservazione dei beni culturali, è stato confermato dal termogramma acquisito che mostra la reale differenza di temperatura tra gli oggetti in esame ed una particolare striscia più fredda dovuta all'interfaccia parete-soffitto (Fig. 2.6).

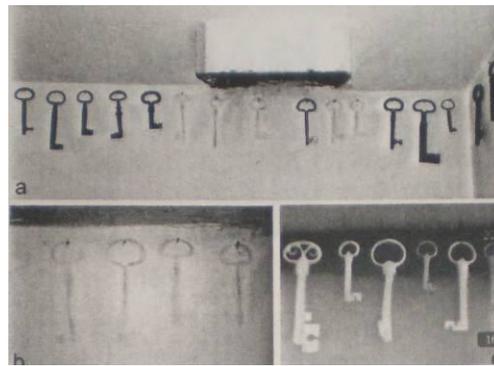


Figura 2.6: Serie di chiavi in metallo appese al soffitto (a), impronta delle chiavi sul muro dovuta al movimento dell'aria e di particelle fini (b) e relativo termogramma che conferma il notevole gradiente di temperatura responsabili di tali movimenti (c).

2.2 Ground Penetrating Radar applicato ad edifici storici in muratura: stato dell'arte della tecnica

La prima applicazione di ricerca elettromagnetica inerente elementi situati in profondità, e non visibili dall'esterno, risale all'inizio del secolo: Hulsmeyer nel 1904 utilizzò la tecnica del ground penetrating radar per individuare dei tubi metallici nascosti nel terreno; da allora lo sviluppo sia strumentale sia conoscitivo è stato crescente e negli ultimi anni c'è stato il vero boom dell'utilizzo del GPR in diverse discipline.

Nel campo dell'ingegneria civile tale tecnica ha iniziato a svilupparsi intorno agli anni '80 con i primi utilizzi focalizzati allo studio dei manti stradali e delle fondazioni in calcestruzzo (Bungey et al., 2004); in seguito è stata progressivamente impiegata per applicazioni ambientali ed archeologiche e successivamente, con lo

sviluppo di sistemi ad elevata frequenza, si è affermata nel settore delle indagini non distruttive per la diagnostica di involucri edilizi. Attualmente l'obiettivo della ricerca è quello di produrre delle linee guida per una procedura tecnica finalizzata all'acquisizione ed interpretazione delle tracce radar per rilevare inclusioni, vuoti, difetti e presenza di umidità nella muratura.

I primi risultati di prove GPR svolte in sito su edifici storici (Binda et al., 1998) riguardano alcune indagini realizzate nell'Italia settentrionale; in particolare alcune applicazioni di tale tecnica, mirate alla calibrazione del metodo, sono state eseguite al Castello di Malpaga (Bergamo), la cui morfologia e struttura risulta essere sconosciuta essendo stato costruito nel corso di diverse epoche e con differenti tecnologie costruttive. Mediante l'acquisizione dati con un'antenna da 1 GHz, e successive elaborazioni, è stato possibile rilevare e localizzare disomogeneità all'interno della muratura, individuare la struttura portante composta da telai in legno ed elementi metallici ed individuare la presenza di porte, probabilmente tamponate con materiale in muratura, dietro gli affreschi presenti sulle pareti (Fig. 2.7); tali aspetti sono stati confermati da un'analisi termografica successivamente svolta.

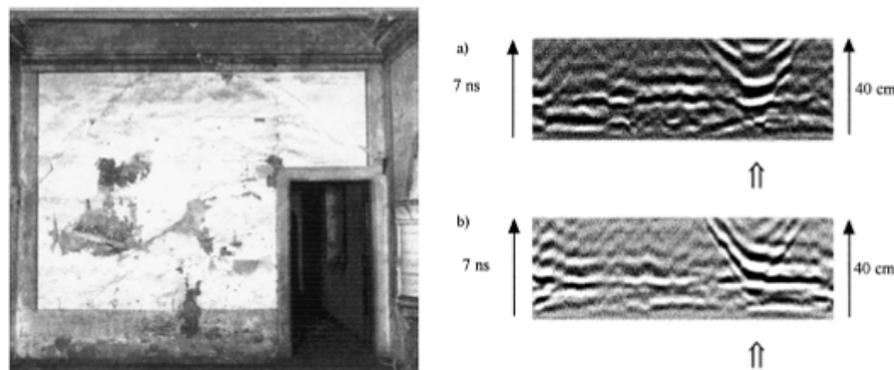


Figura 2.7: Particolare del muro del castello di Malpaga e relativi radargrammi contenenti l'indicazione dei difetti metallici individuati nel telaio in legno.

Un ulteriore prova è stata eseguita sulle mura di un castello del 14° secolo situato ad Este (Padova) per valutare, mediante il GPR, l'efficienza delle riparazioni; il muro infatti essendo caratterizzato da lesioni e discontinuità diffuse è stato sottoposto ad un trattamento di cicli di iniezioni con malta cementizia. Sono stati acquisiti profili radar sul muro in esame sia prima sia dopo il trattamento di riparazione ed i risultati ottenuti mostrano una netta diminuzione dei vuoti ed un aumento dell'omogeneità

globale della parete (Fig. 2.8); l'intervento di iniezione di malta cementizia, seppur non perfetto, può considerarsi di successo.

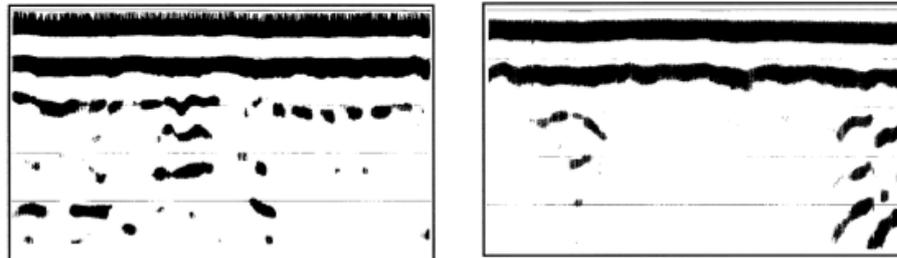


Figura 2.8: Radargrammi rilevati sul muro del castello di Este prima e dopo l'intervento di riparazione mediante l'iniezione di malta cementizia.

Il GPR è una tecnica molto utile per indagare su tutti quegli edifici di importanza storica e culturale, sottoposti a tutela, in cui non è possibile intervenire con metodi diretti ed invasivi e, negli ultimi anni, sono aumentate in modo consistente le applicazioni in tal senso. Recentemente è stata effettuata un'analisi mediante GPR (Imposa et al., 2009) sulla chiesa Sant'Agata alla Badia, uno dei principali monumenti barocchi di Catania, costruita nel 1760-1770 sopra le rovine di un antico monastero crollato durante il terremoto della Val di Noto.

In particolare, l'obiettivo di tale studio è stato quello di indagare, mediante tecniche non distruttive, sullo stato delle fondazioni della chiesa e sull'individuazione di possibili strutture sepolte al di sotto di essa al fine di contribuire alla programmazione di eventuali lavori futuri di ristrutturazione e manutenzione.

L'indagine georadar è stata eseguita acquisendo dati lungo dieci profili tracciati sul pavimento della chiesa, per una lunghezza complessiva di 175 metri; per cercare di focalizzare l'attenzione sui primi metri di profondità è stato deciso di utilizzare, per tutti i profili, un'antenna da 500 MHz ed un intervallo di tempo di acquisizione variabile da 40-80 ns. I radargrammi acquisiti, ed opportunamente elaborati, hanno messo in mostra la presenza di varie anomalie quali, ad esempio, aree con differente costante dielettrica, presenza di vuoti o strutture sepolte, differenza dello stato di aggregazione e variazioni di umidità (Fig. 2.9). I difetti sono stati riscontrati sotto tutti i profili radar realizzati e, nello specifico, sono state individuate discontinuità nel primo metro di profondità dovute al contatto pavimento-massetto, a circa 2-3 metri di profondità legate alla presenza di macerie e materiale vulcanico, aventi differente stato di aggregazione, ed intorno ai 6 metri per la presenza di vuoti nel terreno vulcanico presente in sito. Tali dati

raccolti durante l'analisi georadar, e confermati da un'indagine stratigrafica realizzata mediante perforazioni meccaniche nei primi 4-5 metri di profondità, sono stati opportunamente riportati sulla planimetria della chiesa (Fig. 2.10) e forniscono un'ottima base per l'ottimizzazione di analisi e studi futuri.

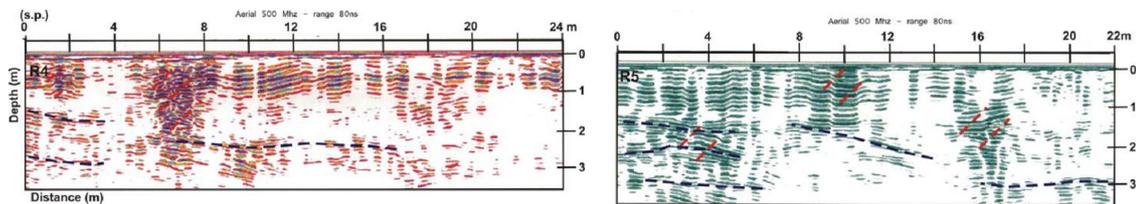


Figura 2.9: Radargrammi acquisiti sul pavimento della chiesa di S. Agata della Badia (profilo R4 ed R5) ed anomalie individuate in essi.

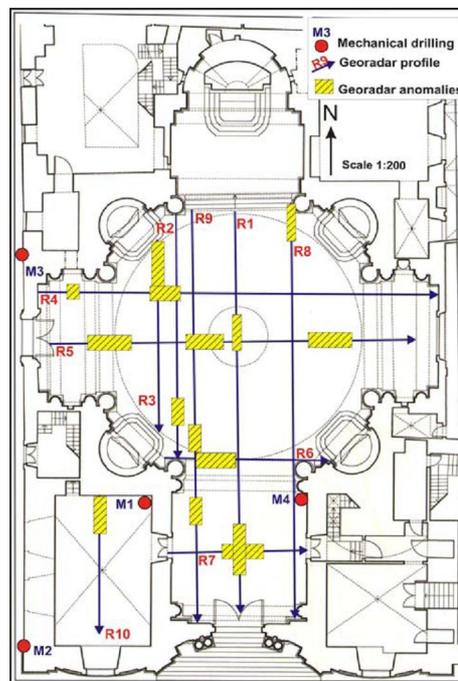


Figura 2.10: Planimetria della chiesa di S. Agata della Badia con mappatura dei difetti individuati mediante l'indagine georadar.

Un'ulteriore studio inerente l'applicazione della tecnica GPR sui beni architettonici è stato svolto presso la Basilica di San Pietro e Duomo di Milano (Giunta, 2009); in particolare è stato cercato di realizzare un quadro complessivo circa lo stato di fatto di entrambe le costruzioni e fornire elementi di approfondimento utili alla progettazione di interventi correttivi. Per i rilievi è stata impiegata prevalentemente un'antenna da 900 MHz, integrando le acquisizioni con quella da 1.5 GHz per ottenere

maggior risoluzione spaziale nelle parti superficiali, e con quella da 400 MHz quando si è resa necessaria una maggior profondità d'indagine. Effettuando esperimenti preliminari su campioni è stato possibile ricavare la velocità di propagazione radar e le costanti dielettriche dei materiali presenti (Tab. 2.1). La profondità investigata è stata di $0.5 \div 3$ m e la velocità di scansione di circa 1 metro/minuto.

Tabella 2.1: Proprietà dielettriche dei materiali investigati.

Materiale	Costante dielettrica ϵ_r	Velocità radar v_r ($\times 10^8$ m/s)
Travertino	8	0.866
Marmo	12	1.061
Muratura	6.5	1.177

Nella Basilica di San Pietro sono stati acquisiti dati radar sulla Facciata principale e sulle Grandi Colonne al fine di investigare circa la presenza di fessure e distacchi di materiale; nella parte sinistra della facciata è stata confermata la presenza di significative lesioni verticali, già documentate nell'archivio della Fabbrica dal 1790, mentre lungo i profili delle colonne sono state ottenute buone informazioni sullo spessore dei blocchi di travertino e sullo stato di degrado della muratura (frammenti di laterizio e tufo, mescolati con calce e pozzolana) a ridosso dei blocchi (Fig. 2.11).

Nella facciata del Duomo sono stati investigati 4510 blocchi di marmo, contrafforti e guglie con spessore variabile da 7-85 cm; congruentemente con le caratteristiche strutturali della costruzione, gli spessori maggiori dei blocchi di marmo sono stati rilevati nella parte inferiore dei contrafforti i quali hanno il compito di sopportare la compressione dovuta al peso proprio e contenere la spinta della facciata verso la piazza. Sono state inoltre localizzate numerose zone critiche caratterizzate da piccoli spessori (inferiori a 10 cm) dei blocchi di marmo, detti in tal caso "cartelle"; in presenza di movimenti di assestamento statico queste zone possono infatti innescare una frattura essendo distribuiti in modo non omogeneo gli sforzi sul paramento in marmo avente funzione portante (Fig. 2.12).

I risultati ottenuti hanno quindi permesso di ampliare ulteriormente la documentazione sullo stato di conservazione di entrambi i monumenti ed hanno messo in luce i principali punti critici su cui porre particolare attenzione in sede di restauro e ristrutturazione.

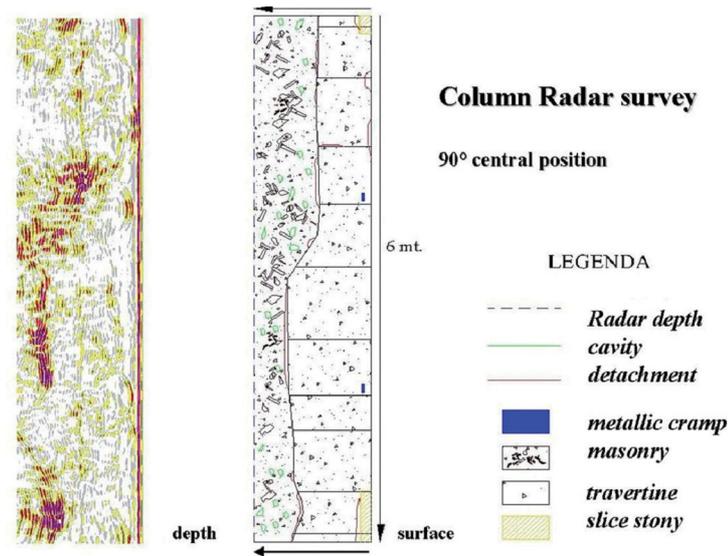


Figura 2.11: Radargramma verticale (900 MHz) su una colonna di San Pietro e relativa interpretazione.

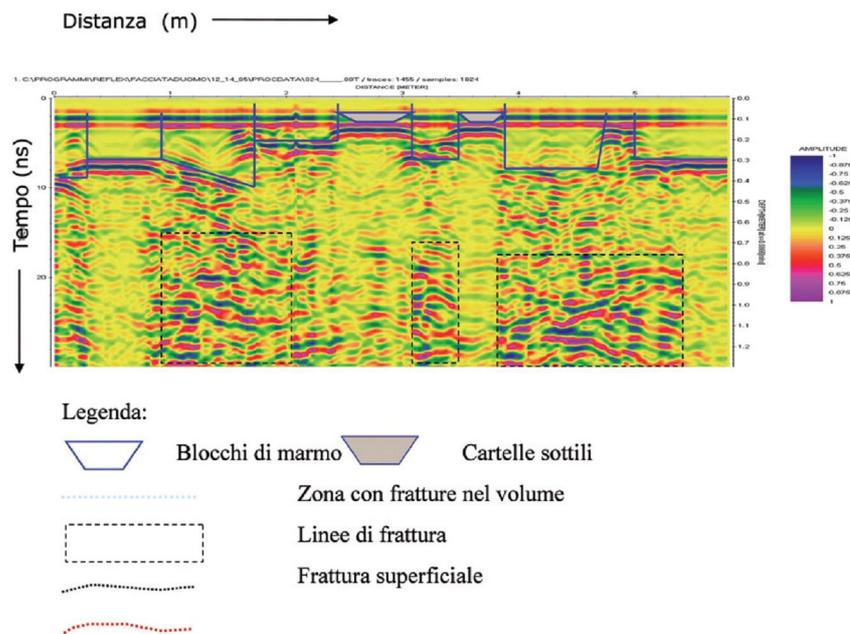


Figura 2.12: Radargramma processato (900 MHz) acquisito su una campata del Duomo di Milano ed interpretazione dei dati ottenuti.

Sono riportati inoltre due studi svolti su edifici, oggetto di ristrutturazione, situati nel centro di Roma (Cassioli et al., 2009); data la loro importanza storica e culturale è stato fatto ricorso all'utilizzo della metodologia radar non essendo permesso intervenire mediante tecniche dirette ed invasive. Nel primo edificio, costruito nel Seicento ed ampliato agli inizi del Novecento, sono state rilevate delle scansioni GPR

sulle lastre di marmo di un portale (Fig. 2.13) al fine di individuare eventuali lesioni e strati di ammaloramento; mediante l'elaborazione dei dati acquisiti è stato possibile individuare l'interfaccia marmo-malta, e quindi stimare lo spessore delle lastre di marmo, la presenza di laterizi forati alla base delle lastre, i vuoti intergranulari presenti nella muratura di sostegno e gli elementi metallici (perni) che sostengono le lastre (Fig. 2.14).



Figura 2.13: Portale esaminato.

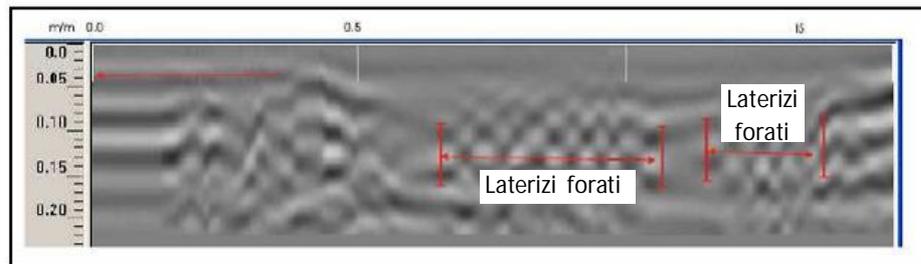


Figura 2.14: Radargramma della lastra di marmo decorazione prospetto frontale.

Nel secondo edificio, costruito nel Settecento sulle rovine di un palazzo del Quattrocento, l'intento specifico era quello di indagare sulla struttura dei solai della biblioteca presente al primo ed al secondo piano; a tal fine sono state effettuate delle acquisizioni radar sui pavimenti in esame seguendo sia profili longitudinali sia trasversali. Principalmente è stata utilizzata un'antenna da 1000 MHz per ottenere delle informazioni maggiormente dettagliate nei primi 2 m di profondità; in alcuni casi particolari è stato fatto ricorso ad un'antenna da 400 MHz per ottenere una visione più globale dell'area investigata. Osservando un radargramma post-processato (Fig. 2.15) è possibile notare la presenza, nei primi 20 cm di spessore, di riflessioni puntuali attribuibili ai travetti del solaio, disposti perpendicolarmente alla sezione acquisita ed aventi interasse di circa 80 cm. Al di sotto di essi è evidenziata la presenza di vuoto che tende a rastremarsi procedendo verso la zona centrale dell'edificio; alla base del vuoto

si notano riflessioni attribuibili ad uno strato di riempimento di varia natura (in alcuni punti sono riconoscibili i tavelloni) che, al contrario, tende ad assottigliarsi procedendo verso le pareti esterne dell'edificio. È ben visibile infine, al centro dell'edificio, la presenza di un arco di volta coincidente con un corridoio; al di sopra della volta vi è uno strato di circa 55 cm di spessore di materiale omogeneo al cui interno non sono presenti né vuoti né ferro.

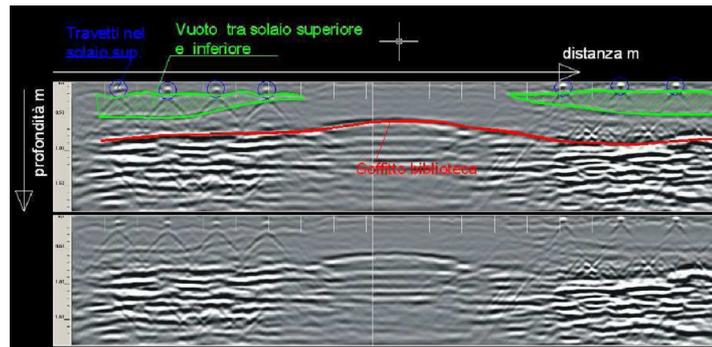


Figura 2.15: Radargramma acquisito con antenna da 1000 MHz.

Un importante aspetto da non sottovalutare, nel campo della diagnostica strutturale, è associato alla tematica della carbonatazione del calcestruzzo ed alla penetrazione di cloruri in esso; superato infatti un certo valore di soglia del pH, in combinazione con acqua ed ossigeno, può essere distrutto il normale strato di pellicola protettiva presente sulle barre di armatura e può avvenire la corrosione delle stesse (Montemor et al., 2003). Tale aspetto può rivelarsi pericoloso poiché i prodotti della corrosione occupano uno spazio maggiore rispetto a quello occupato dalla barra originaria di acciaio e ciò può, a lungo termine, causare distacchi e fratture, ed inoltre la sezione trasversale delle barre di armatura risulta ridotta e ciò abbatte la sua capacità portante. La corrosione delle armature risulta essere una delle cause principali del deterioramento delle strutture ed è responsabile quindi di una grande parte del costo necessario per la riabilitazione delle stesse.

Le prime applicazioni, in tal senso, sono state condotte su modelli in scala all'interno del Politecnico di Milano in collaborazione con ESEM e ICITE (Binda et al., 1998). I modelli in muratura sono stati realizzati in modo da avere un gradiente termico-igrometrico interno simile a quello di normale edificio residenziale; è stato inoltre provocato, in alcune zone, un decadimento artificiale mediante il posizionamento alla base dei campioni di contenitori con soluzione salina e la risalita di acqua dal sottosuolo

è stata riprodotta mediante l'utilizzo di 5 piezometri. I dati radar, rilevati attraverso linee verticali, mostrano gli effetti dovuti alla risalita capillare dell'acqua nella parte inferiore della struttura; tale situazione produce un sensibile aumento del tempo di riflessione e l'abbattimento dell'ampiezza del segnale (Fig. 2.16).

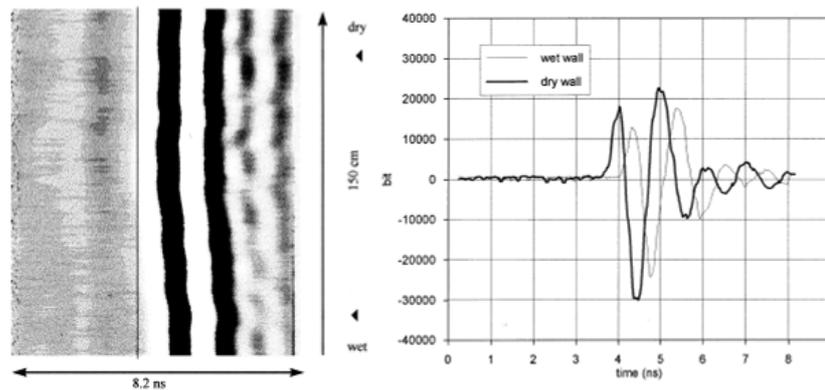


Figura 2.16: Presenza di acqua visibile nella parte inferiore del radargramma e confronto del segnale riflesso tra una zona asciutta ed una zona umida.

Recentemente, circa tali tematiche, è stato effettuato uno studio su 9 campioni in calcestruzzo aventi ugual volume e differente concentrazione di cloruri (NaCl); la base di ciascun provino è stata rivestita da un foglio di alluminio per simulare la presenza di barre riflettenti (Hugenschmid et al., 2008). Su tali campioni, sottoposti a diversi valori di umidità e lasciati maturare 99 giorni, sono state effettuate rilevazioni radar mediante l'utilizzo dell'antenna "4205 horn" ed in seguito sono stati analizzati i risultati ottenuti; in particolare è stata valutata l'ampiezza della riflessione del segnale sul calcestruzzo e sull'alluminio per tutti i provini in esame al fine di quantificare l'influenza dell'umidità e della presenza di cloruri su di essa (Fig. 2.17). I risultati ottenuti mostrano che entrambi i fattori influiscono fortemente sull'ampiezza della riflessione del segnale radar e, nello specifico, essa subisce una variazione stimata pari al 18% sulla superficie del calcestruzzo e pari al 48% sulla superficie del foglio di alluminio situato alla base dei provini. Tali risultati, seppur ottenuti in laboratorio mediante l'utilizzo di modelli semplificati, offrono un importante contributo a tale problematica e rappresentano una buona base di partenza per applicare tali sperimentazioni su strutture reali.

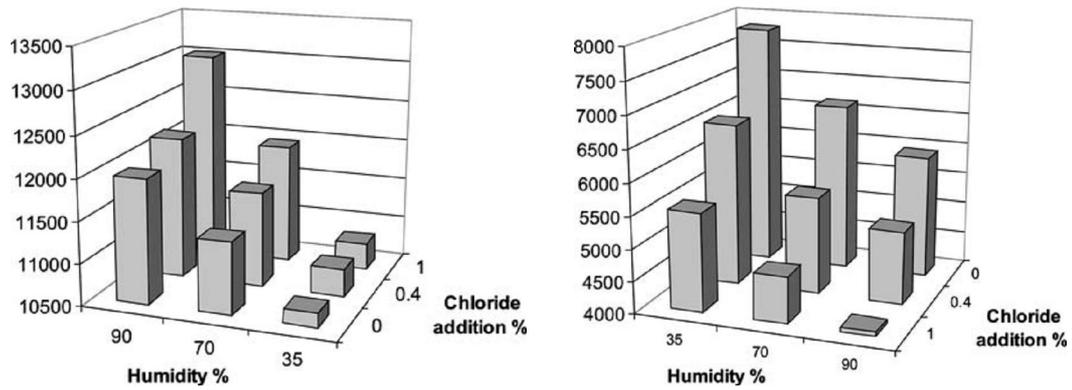


Figura 2.17: Ampiezza delle riflessioni sulla superficie, rispettivamente, del calcestruzzo e del foglio di alluminio situato sotto la base dei provini.

Ulteriori indagini GPR effettuate su 72 campioni di calcestruzzo aventi differente rapporto acqua/cemento ($w/c = 0.5-0.8$) e sottoposti a differente saturazione (20-100%) hanno dimostrato che un segnale fortemente attenuato è un ottimo indice sia di fenomeni corrosivi sia di zone ricche di umidità; la presenza di acqua aumenta notevolmente la costante dielettrica di un materiale e di conseguenza riduce la velocità di propagazione del segnale (Tab. 2.2) (Sbartai et al., 2006).

Tuttavia, occorre ricordare che nell'applicazione della metodologia GPR il risultato finale è fortemente dipendente dalle caratteristiche del mezzo indagato in quanto in determinate condizioni, quali, ad esempio, in terreni limosi-argillosi o in presenza di falde acquifere, non è possibile rilevare neppure la presenza di un oggetto posto in superficie.

Tabella 2.2: Valori di costante dielettrica relativa ed attenuazione caratteristici dei materiali più comuni.

Materiale	Attenuazione (in dB/m)		Costante dielettrica	
	Secco	Bagnato	Secco	Bagnato
Asfalto	2-15	2-20	2-4	6-12
Argilla	10-20	20-100	2-10	4-40
Granito	0,5-3	2-5	5	7
Calcare	0,5-10	10-25	7	8
Sabbia	0,01-1	0,03-0,3	4-6	10-30
Cemento/mattoni	2-12	10-25	4-10	10-20
Terreno sabbioso	0,1-2	1-5	4-6	15-30
Terreno argilloso	0,3-3	5-30	4-6	10-15

Essendo il georadar una tecnica relativamente recente il suo sviluppo non è ancora concluso e le continue innovazioni inerenti la sua tecnologia la rendono sempre più versatile ed idonea per diversi utilizzi (Zanzi et al., 2009).

Ad esempio negli ultimi anni, a seguito dell'avvento di nuovi sistemi e software, si è assistito ad un graduale sviluppo dell'indagine radar mediante la modalità 3D che ha in parte sostituito l'ormai rodato utilizzo della tecnologia GPR per le acquisizioni lineari, da cui è possibile ricavare le sezioni bidimensionali dell'oggetto investigato ed interpretare i risultati ottenuti (Fig. 2.18) (Binda et al., 2003).

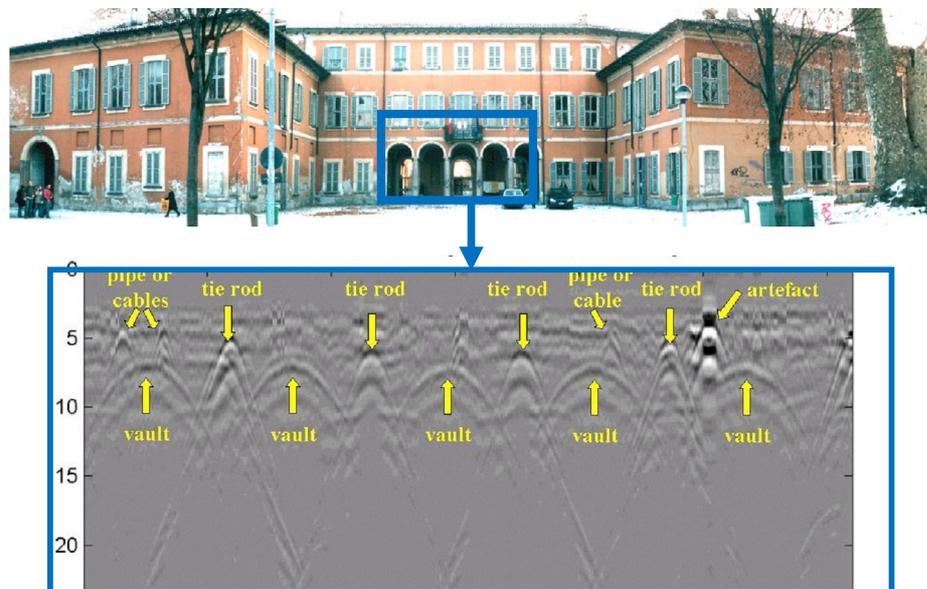


Figura 2.18: Esempio di sezione 2D e relativa interpretazione dei risultati ottenuti mediante l'individuazione delle riflessioni delle volte, le diffrazioni dei tiranti in metallo ed alcuni cavi elettrici che corrono sotto la pavimentazione.

La tecnologia 3D, seppur più onerosa in termini di tempo e costi rispetto al 2D, presenta numerosi vantaggi poiché, fornendo una rappresentazione spaziale dell'oggetto indagato, mostra in modo maggiormente chiaro i dati acquisiti e facilita notevolmente l'interpretazione dei risultati (Fig. 2.19); inoltre essa è fondamentale per l'interpretazione di difetti isolati la cui localizzazione e comprensione è semplificata dalla visione dell'intero vano di volume che li circonda (Zanzi et al., 2009). Il successo della metodologia 3D ha incrementato notevolmente la domanda di indagini di tale tipo e, di conseguenza, è aumentata la pressione sulle case produttrici per lo sviluppo della tecnologia correlata (nuovi software, sistemi ad array di antenne, antenne bipolari, etc.).

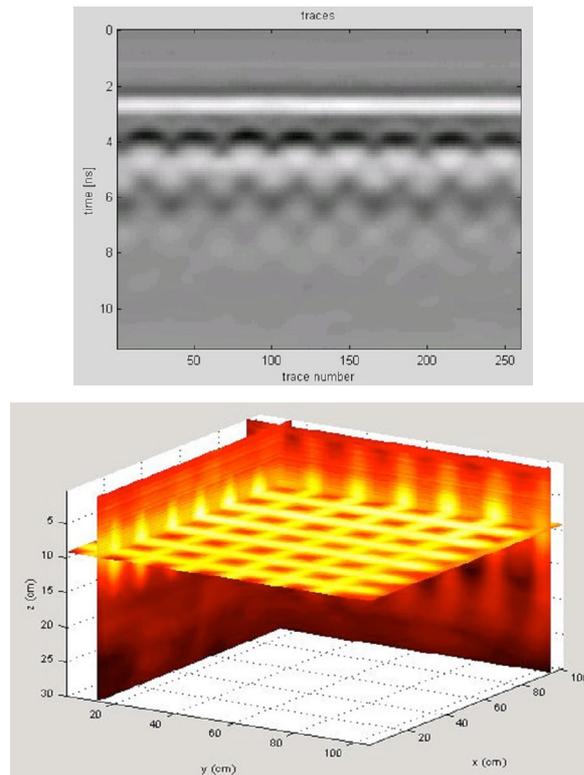


Figura 2.19: Confronto tra un profilo radar 2D ed una rappresentazione radar 3D acquisiti, mediante un'antenna da 1GHz, sulla medesima soletta armata.

2.3 Valutazione della tenuta all'aria degli edifici mediante il Blower Door Test: stato dell'arte della tecnica

Nell'ultimo decennio nel continente americano sono stati svolti numerosi studi inerenti l'applicazione del Blower Door Test per l'analisi della tenuta all'aria degli involucri edilizi; i dati ottenuti sono stati opportunamente raccolti e catalogati al fine di realizzare un database contenente le principali cause di infiltrazione dell'aria ed i relativi interventi proposti per ogni casistica in esame.

Ad esempio, è stata svolta un'interessante analisi (DePani et al., 2005) su edifici residenziali costituiti da più vani, non di nuova costruzione e non sottoposti ad una corretta manutenzione nel corso degli anni (Fig. 2.20). È stato svolto il test di permeabilità all'aria utilizzando un solo ventilatore piuttosto che più ventole disposte su ciascun vano dell'edificio in esame; i risultati ottenuti, in termini di perdita di aria equivalente (ELA) hanno confermato l'importanza di tale intuizione.

Effettuare il test utilizzando un solo ventilatore fornisce infatti risultati attendibili e permette l'abbattimento sia dei costi della strumentazione sia della manodopera specializzata.

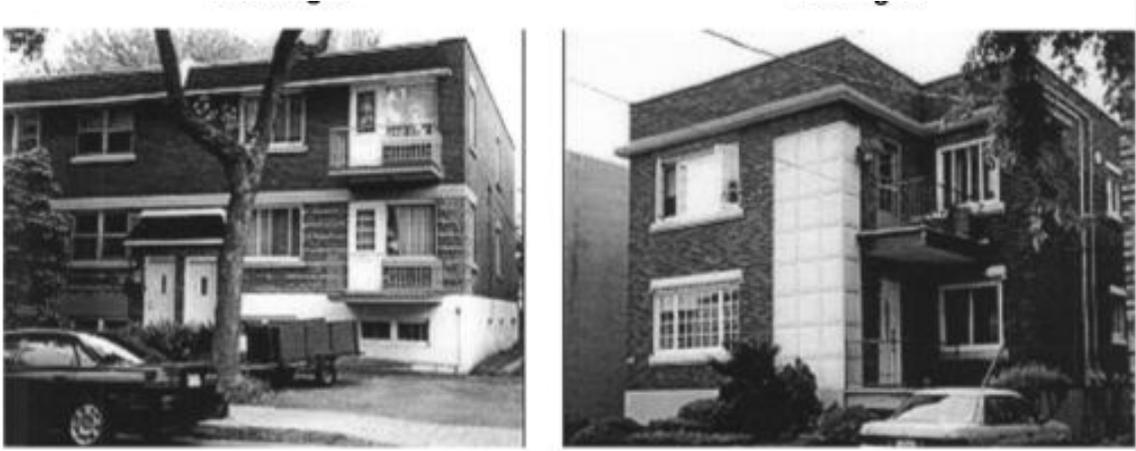


Figura 2.20: Edifici residenziali, costituiti da più vani, sottoposti al Blower Door Test mediante l'utilizzo di un solo ventilatore.

Al contrario in Europa la situazione, sotto tale aspetto, risulta essere maggiormente carente ed i dati a disposizione, frutto di sporadici ed isolati studi svolti, non risultano essere sufficienti al fine di produrre risultati che possano avere valenza globale. Nel 2005 è stato svolto uno studio mirato alla caratterizzazione delle perdite di aria presenti negli edifici tipici del Sud-Europa (Sfakianaki et al, 2008); tali abitazioni presentano grandi aperture sfruttate spesso per la ventilazione naturale; tuttavia, a causa della continua crescita del fenomeno “dell'isola di calore” e la grave diminuzione del vento nei centri abitati occorre ricorrere sempre più all'utilizzo di sistemi di condizionamento e la tenuta all'aria, in tale ambito, assume un ruolo maggiormente di rilievo.

In particolare sono state testate 20 abitazioni greche (Tab. 2.3), situate nella regione dell'Attica, mediante il Blower Door Test ed il “Tracer gas decay method”, metodo che consiste nell'iniettare un gas (nello specifico N_2O) negli ambienti in esame, opportunamente isolati dall'esterno, e misurare la variazione della concentrazione del gas nel tempo.

Al termine della prova gli edifici testati sono stati classificati in 3 diverse categorie (bassa-media-alta) in base ai risultati ottenuti circa il tasso di infiltrazione

dell'aria ACH ricavato per un Δp tra interno ed esterno pari a 50 Pa secondo le prescrizioni previste dalla normativa EN ISO 13790 (Tab. 2.4).

Tabella 2.3: Principali caratteristiche strutturali delle 20 abitazioni sottoposte al test.

Abitazione	Vol. (m ³)	H edificio (m)	N° facciate esterne	N° piani
1	565	6.0	3	3
2	445	9.0	4	4
3	444	9.0	4	4
4	120	3.5	4	1
5	168	4.5	4	1
6	573	6.0	4	2
7	149	3.5	4	1
8	97	3.0	3	1
9	147	6.0	4	1
10	261	6.0	4	1
11	247	6.0	4	1
12	691	6.0	3	3
13	390	6.0	3	3
14	191	6.0	2	1
15	500	7.5	4	4
16	458	4.0	4	2
17	828	7.5	4	4
18	205	6.0	3	1
19	116	3.0	3	1
20	141	4.5	4	1

Tabella 2.4: Risultati forniti dal test e classificazione degli involucri edilizi analizzati in base al livello di ermeticità raggiunto.

Abitazione	V vento (m/s)	$\Delta T_{int-est}$ (°K)	ACH ₅₀	Ermeticità
1	1.95	1.1	1.87	alta
2	4.15	1.0	5.72	bassa
3	2.05	0.5	5.40	media
4	2.58	0.8	8.52	media

Abitazione	V vento (m/s)	$\Delta T_{int-est}$ (°K)	ACH ₅₀	Ermeticità
5	3.46	0.6	11.30	bassa
6	1.58	2.3	2.22	alta
7	3.79	2.5	7.51	media
8	4.02	1.3	8.50	media
9	3.22	1.9	11.12	bassa
10	1.24	5.3	9.58	media
11	1.95	7.4	8.86	media
12	0.81	4.4	1.98	alta
13	1.77	0.1	2.44	alta
14	1.21	2.5	2.69	alta
15	1.50	3.4	10.49	bassa
16	4.18	1.9	8.29	media
17	2.10	1.0	6.39	media
18	1.12	1.4	7.68	media
19	3.96	0.6	5.94	media
20	3.92	2.6	9.30	media

Al fine di indagare circa i parametri che maggiormente influenzano il tasso di infiltrazione dell'aria gli edifici testati sono stati ulteriormente suddivisi in diversi gruppi in base sia ai risultati ottenuti sia alle caratteristiche edilizie. In particolare è stata cercata una correlazione tra il numero di ricambi orari ACH₅₀ e la lunghezza del telaio degli infissi mediante la definizione del fattore FLF:

$$FLF = \frac{L_{TELAIO}}{V_{NETTO,EDIFICIO}}. \quad (1)$$

È stato notato che la correlazione tra tali parametri è fortemente influenzata dalla tenuta all'aria dell'involucro edilizio; in un edificio caratterizzato da una scarsa tenuta all'aria tale correlazione è infatti molto più netta rispetto ad un edificio caratterizzato da una buona/ottima tenuta all'aria (il coefficiente di correlazione R^2 è pari a 0.93 nel primo caso e 0.40 nel secondo) (Fig. 2.21).

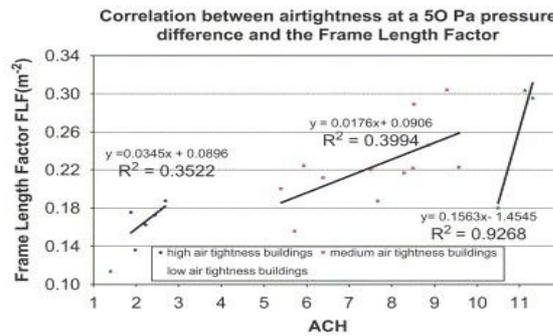


Figura 2.21: Correlazione lineare tra la tenuta all'aria, valutata in termini di ACH, ed il fattore FLF relativo alla lunghezza del telaio degli infissi presenti.

Ulteriori studi, inerenti il territorio europeo, riguardano l'analisi delle infiltrazioni di aria in edifici sottoposti a climi rigidi; infatti nelle regioni fredde, a maggior ragione, è molto importante approfondire la tematica della tenuta all'aria dell'involucro edilizio in quanto il contenuto di umidità all'interno è molto maggiore rispetto all'esterno e le conseguenze di eventuali infiltrazioni d'aria non possono essere trascurate. In passato alcuni studiosi, approfondendo tale aspetto, avevano messo in risalto l'aumento sostanziale di consumo energetico per gli edifici con scarsa tenuta all'aria situati in ambienti freddi; in particolare se un edificio passa da un numero di ricambi orari di 1 h^{-1} a 10 h^{-1} il fabbisogno energetico aumenta in media del 21% (Jokisalo et al., 2002); è stato inoltre rilevato che più del 53% dell'energia utilizzata per la ventilazione meccanica viene persa a causa delle infiltrazioni consistenti di aria (Binamu, 2002).

Dal 2003 al 2005 è stata svolta un'analisi sulla tenuta all'aria di villette monofamiliari ettoni (Kalamees, 2007); la maggior parte degli edifici presenti sul territorio sono stati realizzati secondo gli standard contenuti nelle linee guida EVS837-1 e sono rispettati, nello specifico, i valori massimi della conduttanza termica U fissati per ogni elemento strutturale:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{PARETI}} &\leq 0.28 \frac{W}{m^2 K}; \\
 U_{\text{TETTI,PAV}} &\leq 0.22 \frac{W}{m^2 K}; \\
 U_{\text{INFISSI}} &\leq 0.21 \frac{W}{m^2 K}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Tuttavia, seppur un edificio è caratterizzato da una bassa conduttanza termica la tenuta all'aria non è assicurata. Lo studio in esame è atto a valutare, in sito, la permeabilità all'aria di 32 villette monofamiliari concentrate nella zona di Tallin; tali

edifici sono caratterizzati da una leggera struttura portante in legno e lana minerale utilizzata come isolante principale. In tabella 2.5 sono raccolti i risultati dell'analisi svolta mediante l'utilizzo di un ventilatore Minneapolis 4; il valore di ricambi orari riferiti ad un Δp pari a 50 Pa varia da un minimo di 0.71 h^{-1} fino ad un massimo di 13.6 h^{-1} .

Tabella 2.5: Risultati forniti dal Blower Door Test per le 32 villette analizzate.

	Number of houses	Air leakage at 50 Pa ($\text{m}^3/(\text{h m}^2)$)		Air change rate at 50 Pa, n_{50} (1/h)	
		Average	St. dev.	Average	St. dev.
All measured data	32	4.2	3.3	4.9	3.5
One-storey house	9	1.9***	0.8	2.3***	0.7
Two-storey house	23	5.1***	3.5	5.9***	3.5
House built under professional supervision	23	3.0*	1.8	3.5**	2.1
House built without professional supervision	9	7.2*	4.5	8.4**	3.7
Constructed on site	17	5.3*	4.0	6.0*	3.9
House with pre-fabricated wall or room elements	15	2.9*	1.8	3.5*	2.1
Natural ventilation	4	10.1*,*	5.2	11.0**,**	2.4
Mechanical exhaust ventilation	16	3.5*	2.0	4.4**	2.9
Balanced ventilation with heat recovery	12	3.1*	2.0	3.5**	2.1

È stato notato, in particolare, che il numero di ricambi orari è direttamente proporzionale al numero di piani presenti nelle villette; tale aspetto è probabilmente legato al nodo pavimento-soffitto in cui sono presenti elevate perdite di aria (Fig. 2.22) ed una maggiore superficie di pareti a contatto con l'ambiente esterno.

Ulteriori aspetti che peggiorano nettamente la tenuta all'area dell'involucro sono l'utilizzo di elementi prefabbricati e la preferenza di sistemi di ventilazione naturale piuttosto che meccanica; in tali territori inoltre è molto diffuso il fenomeno dell'auto-costruzione e, talvolta, gli involucri edilizi vengono realizzati senza il supporto di figure professionali esperte del settore.

Analizzando i dati ottenuti è stato possibile affermare che solo il 41% dei casi in esame possiede i requisiti minimi per una accettabile tenuta all'aria; tale risultato, seppur inerente un numero ristretto di campioni, è comunque rappresentativo di un disagio reale ed è utile al fine di porre maggiore attenzione, nel futuro, su tali tematiche.

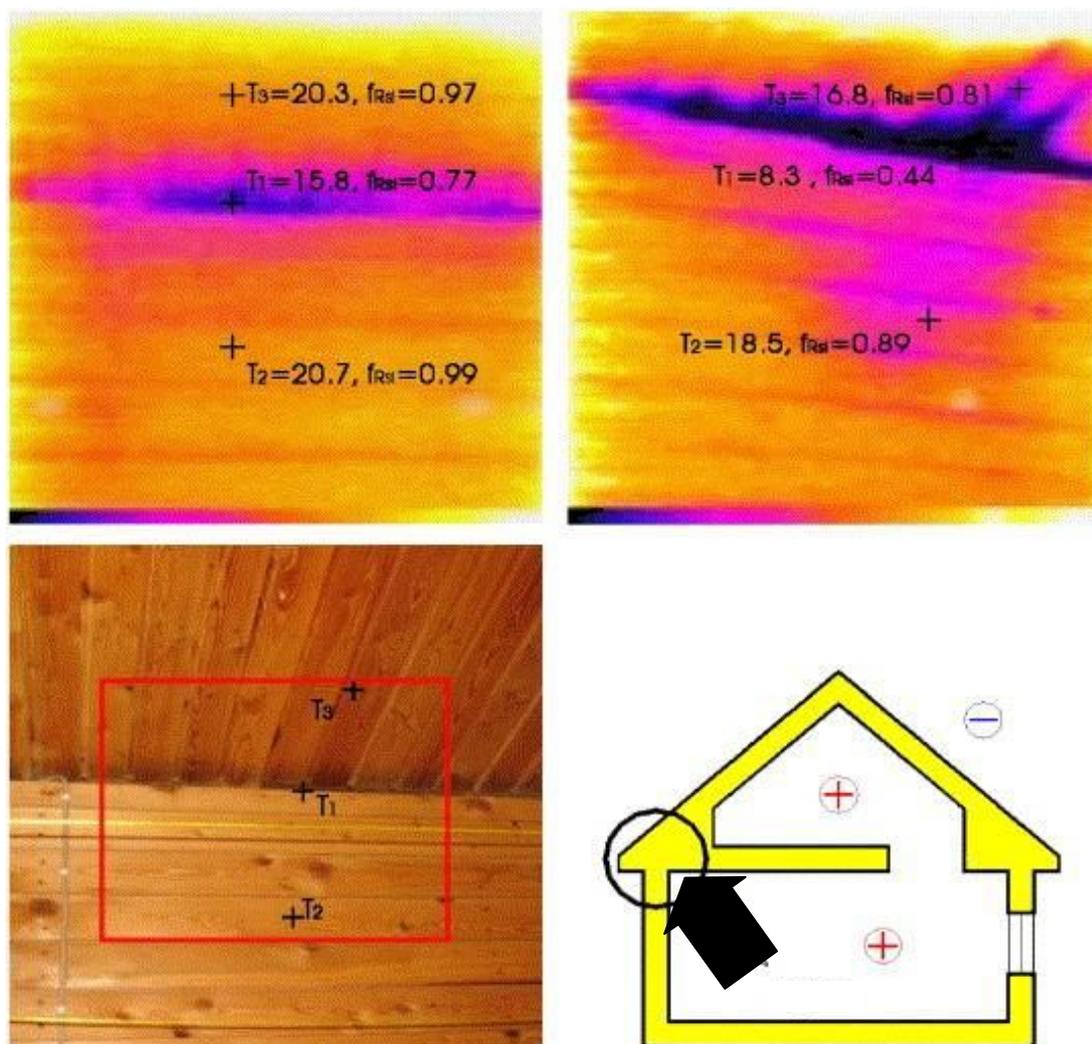


Figura 2.22: Esempio di infiltrazioni di aria sulla giunzione del soffitto durante l'esecuzione del Blower Door Test.

3 PROGETTI EUROPEI E RELATIVI CASI STUDIO

Gli edifici storici costituiscono una parte importante del patrimonio culturale di ogni società e rappresentano più del 50% delle costruzioni presenti sia sul territorio italiano sia europeo. È dovere e compito imprescindibile di ogni cittadino, ed in particolare di governatori ed esperti del settore, salvaguardare tale patrimonio e far sì che esso possa essere tramandato alle generazioni future mantenendo intatta l'autenticità della loro architettura. Gli edifici storici, difatti, rappresentano un vero e proprio marchio di unicità per molteplici realtà sociali dislocate in tutto il continente europeo e riflettono l'indole e la ricchezza della società in cui sono inglobati. A tal proposito, l'Unione Europea finanzia specifici progetti che hanno il compito di proteggere il patrimonio storico esistente combattendo l'alto livello di inefficienza energetica che caratterizza tali manufatti ed il degrado ambientale a cui essi, spesso, sono sottoposti. Da qui nasce l'esigenza di proporre nuove sfide scientifiche al fine di riuscire a salvaguardare tali costruzioni che, se non costantemente monitorate in modo opportuno, possono tramutarsi in reali minacce per i cittadini e per l'ambiente; una cattiva gestione di tale parte del patrimonio può, inoltre, ulteriormente gravare sulla crisi economica presente su tutto il continente.

3.1 PROGETTO EUROPEO 3ENCULT: SCOPI ED OBIETTIVI

Il progetto europeo 3ENCULT, Efficient Energy for EU Cultural Heritage, ha lo scopo principale di colmare il gap tra la conservazione degli edifici storici e le problematiche inerenti le condizioni ambientali e climatiche del nostro pianeta. Il progetto pone particolare attenzione al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici storici in quanto è stato constatato che tale parte di patrimonio edilizio è fortemente carente sotto tale aspetto e che esso potrà conservare la propria funzionalità, nel futuro, solo se mantenuto come spazio vitale per la società in cui è collocato. Gli edifici storici, infatti, sono stati realizzati in epoche in cui non erano presi in

considerazione gli aspetti legati all'efficienza energetica ed alla tutela dell'ambiente; applicare tali criteri solo alle nuove costruzioni del patrimonio edilizio permette di contenere i consumi ma non riesce ad incidere in modo significativo sul risparmio energetico complessivo. Da tale situazione reale del continente europeo nasce la sfida di riuscire a realizzare il risanamento energetico degli edifici storici conciliando i recenti studi e le moderne tecnologie agli elementi architettonici caratterizzanti tali manufatti e sottoposti alla tutela delle Belle Arti. Obiettivi specifici del progetto sono la definizione di esplicite metodologie di indagine e strumenti di monitoraggio che riescano ad accertare lo stato di fatto dell'edificio e permettano la programmazione di interventi e migliorie ove necessario; in seguito alle analisi svolte sarà inoltre possibile suggerire eventuali integrazioni, o modifiche, del quadro regolamentare attualmente vigente.

Il compito di conservazione del patrimonio culturale esistente e miglioramento dell'efficienza energetica è altamente interdisciplinare; tale sfida è stata, infatti, raccolta da un team composto da 22 partner provenienti da dieci paesi europei e da diversi ambiti di attività, tra cui la stessa Università di Bologna. A tale progetto partecipa un team di tecnici, imprenditori, urbanisti, architetti ed ingegneri che a partire da ottobre 2010 fino a marzo 2014 si sono impegnati a mettere a disposizione le proprie capacità ed idee al fine di raggiungere tale obiettivo comune. All'interno del progetto sono presenti otto casi studio che raccolgono diversi edifici storici dislocati su tutto il territorio europeo ed hanno lo scopo di dimostrare e verificare che le soluzioni a cui si perviene sono applicabili alla maggior parte degli altri manufatti del patrimonio edilizio europeo; in Italia, nello specifico a Bologna, sono presenti due casi studio inerenti, rispettivamente, la Palazzina della Viola e Palazzo D'Accursio. Il progetto europeo 3ENCULT propone le linee guida da seguire per l'analisi di ciascun caso studio al fine di partire dall'analisi del manufatto (WP2) e studiare soluzioni e tecniche per la valorizzazione energetica (WP3-WP4) la cui validità dovrà essere opportunamente dimostrata (WP5) e dovrà fornire stimoli per lo sviluppo di ulteriori soluzioni successive (WP6). Dovrà, inoltre, essere assicurata la qualità sia durante lo svolgimento del progetto che in seguito (WP7) ed i risultati dovranno essere illustrati ad un ampio insieme di soggetti interessati a tali aspetti (WP8) (Fig. 3.1). È facilmente intuibile che ogni edificio storico è di per sé una costruzione unica e differente dalle altre per cui i risultati ottenuti non saranno una soluzione da applicare in modo universale ma le scelte effettuate e le tecniche utilizzate, riportate e descritte nei minimi dettagli, forniranno

uno spunto utile per realizzare migliorie e modifiche di ogni singolo edificio.

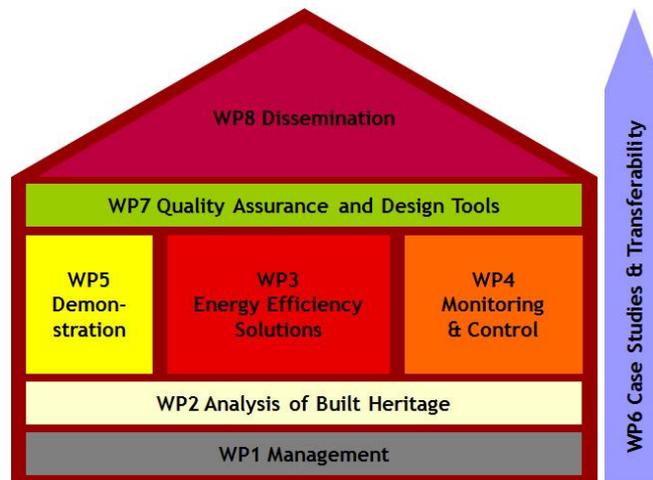


Figura 3.1: Punti chiave da seguire per ciascun caso studio inerente il progetto europeo 3ENCULT.

3.1.1 Palazzina della Viola (Bologna): cenni storici

La Palazzina della Viola è stata costruita intorno al 1497 per volere di Annibale, figlio di Giovanni II Bentivoglio, signore di Bologna, come “casino...per li secreti e solitari piaceri” così come è descritta, nelle sue opere, dal poeta di corte Sabadino degli Arienti. La Palazzina deve il suo nome al giardino esterno, ricco di fiori e piante odorose in cui primeggiavano le viole, ed è situata a ridosso delle mura cittadine in una zona verde allora “periferica”. L’edificio, a pianta quadrangolare e disposto su due piani, presenta un doppio porticato che si estende sia nella facciata centrale che nelle facciate laterali (Fig. 3.2).



Figura 3.2: Vista aerea della Palazzina della Viola, Bologna.

Caduti i Bentivoglio la Palazzina fu acquisita, nel 1540, dal Cardinale Bonifacio Ferrerio e fu adibita a sede dell'omonimo collegio universitario per studenti piemontesi che ebbe dimora in questa sede per alcuni secoli fino alla soppressione in epoca napoleonica. Negli anni seguenti la Palazzina fu sede di differenti mansioni e nel 1803 fu acquisita dal Governo della Repubblica Italiana ed adibita, insieme al terreno contiguo, a sede della Facoltà di Agraria. Dai primi anni del '900 la locale Cassa di Risparmio si fece carico di interventi di restauro della Palazzina a cui seguirono, negli anni 1946-47, lavori di ricostruzione dell'angolo nord-est dell'edificio centrato, durante la guerra mondiale, da un bombardamento aereo (Fig. 3.3). Attualmente la Palazzina della Viola, di proprietà dell'Università di Bologna, è inserita come caso studio all'interno del progetto europeo 3ENCULT che prevede, per tale edificio, un intervento di riqualificazione e restauro (Fig.3.4).

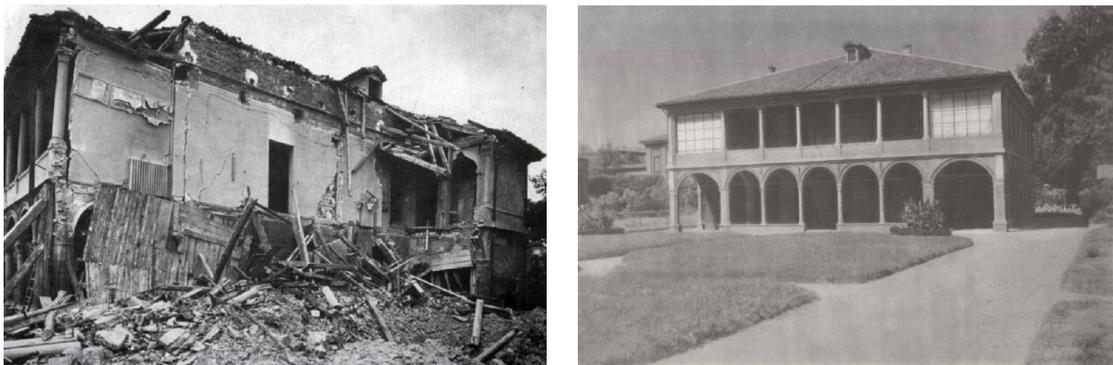


Figura 3.3: Palazzina della Viola dopo i bombardamenti (Barbacci, 1977) e dopo il successivo restauro (Zucchini,1935).



Figura 3.4: Prospetto attuale della facciata principale della Palazzina della Viola.

La Palazzina della Viola è stata, da sempre, un notevole patrimonio culturale sia per l'imponenza della sua costruzione che per la ricchezza delle sue decorazioni. Attualmente degli affreschi interni della scuola del Francia, citati anche in una famosa lettera da Isabella d'Este, non è rimasta traccia, tuttavia sono ancora visibili gli affreschi post-rinascimentali di artisti quali Innocenzo da Imola, Prospero Fontana, Nicolò dell'Abate ed altri ancora. In particolare nel salone situato al primo piano, luogo centrale dell'intero edificio, è presente una vasta decorazione di Prospero Fontana (1550 d.c.) in cui sono rappresentate le storie dell'imperatore Costantino e di papa Silvestro (Fig.3.5); è facilmente intuibile una correlazione tra il tema del dipinto ed il nuovo ruolo attribuito alla Palazzina che, acquisita dal cardinale Ferrerio nel 1540, fu trasformata da casino delle delizie a collegio studentesco. Inoltre nelle pareti delle logge esterne del primo piano sono rappresentate varie scene mitologiche affrescate da Innocenzo da Imola, (Diana e Atteone, Endimione e Selene, Apollo e Marsia, Venere e Amore), ed al pian terreno è presente un soffitto a cassettoni, decorato con teste ed altri soggetti, attribuito alla tarda attività di Amico Aspertini.



Figura 3.5: Affresco “Storie di Costantino e papa Silvestro” nel 1934 (Archivio Storico dell’Università di Bologna).

3.1.2 Palazzo D’Accursio (Bologna): cenni storici

Palazzo D’Accursio (Fig. 3.6) è uno degli edifici principali che si affacciano su Piazza Maggiore, centro economico e culturale della vita bolognese, ed il suo nome deriva dal primo proprietario del più antico nucleo del palazzo, Francesco Accursio, giurista bolognese e maestro di diritto. Tale palazzo, infatti, è costituito da un insieme di edifici che, nel corso dei secoli, sono stati uniti al nucleo principale, composto

dall'appartamento del giurista D'Accursio, ed acquisito dal Comune alla fine del Duecento.



Figura 3.6: Facciata di Palazzo D'Accursio, Bologna.

Inizialmente il Palazzo fu destinato a raccogliere le pubbliche riserve granaie ed alcuni uffici municipali ma, nel 1336, divenne sede della residenza degli Anziani assumendo lo scettro del governo della città. Nella prima metà del Quattrocento il Palazzo fu ampliato e rinnovato ad opera dell'architetto Fioravante Fioravanti e fu ulteriormente arricchito con l'aggiunta dell'orologio nella torre D'Accursio ed alcuni caroselli in legno (Madonna con Bambino e corteo dei Magi) rimossi nel 1796 ma ancora in parte conservati nel museo interno. La forte presenza del potere papale in città è rappresentata dalla statua in rame di Bonifacio VIII, risalente al 1301 e conservata all'interno del Museo Medievale, e da numerose revisioni architettoniche fatte apportare da papa Giulio II che si stanziò in città a partire dal 1506, dopo la caduta della signoria dei Bentivoglio. In particolare, a tale periodo, appartengono la Madonna con Bambino di Niccolò dell'Arca (1478) ed il progetto delle due rampe di scale, attribuito al Bramante, che furono ideate per l'ascesa al secondo piano dei governatori della città mediante l'uso di cavalli. La facciata fu in seguito arricchita, a metà Cinquecento, dal portale di Galeazzo Alessi sopra il quale, nel 1580, fu posta la grande statua in bronzo di papa Gregorio XIII realizzata dallo scultore Alessandro Menganti in onore di tale pontefice appartenente alla famiglia bolognese dei Boncompagni (Fig.3.7).



Figura 3.7: Portale di Palazzo D'Accursio e statua in bronzo di papa Gregorio XIII.

La maestosità esterna di Palazzo D'Accursio viene a sua volta arricchita dalle illustri opere presenti al suo interno che sono in grado di rendere memoria ai principali momenti storici e politici che hanno caratterizzato la vita della società bolognese nel corso dei secoli. In particolare, al primo piano, sono presenti numerose sale di rilevante importanza culturale quali, ad esempio, la Sala Rossa e la Sala del Consiglio Comunale (Fig. 3.8), la cui volta fu affrescata, nel Seicento, mediante allegorie che alludono alla storia bolognese. Al secondo piano, invece, sono presenti la grande Sala Farnese, la Cappella del Legato (Fig. 3.9), in cui nel 1530 si tenne la solenne incoronazione dell'imperatore Carlo V, il museo Morandi, inaugurato nel 1993 per raccogliere le opere donate al municipio dalla famiglia dell'artista, e le Collezioni Nazionali D'Arte, fondate nel 1936 nell'area che, dal XVI al XIX secolo, fu sede degli appartamenti del Cardinale Legato. All'interno delle Collezioni Nazionali sono contenute, oltre agli affreschi commissionati dai Legati, opere risalenti al vasto periodo compreso tra il Medio Evo e l'Ottocento ed attribuibili a noti artisti, tra i quali Pelagio Pelagi, Cincinnato Baruzzi, Pepoli, Aspertini ed Hayez.

Negli ultimi anni, seppur molti degli uffici comunali sono stati trasferiti nel nuovo complesso, Palazzo D'Accursio è riuscito a mantenere inalterata la sua definizione di Palazzo Comunale per eccellenza ed al suo interno risiedono, tutt'ora, il Sindaco e la giunta comunale. Attualmente il Palazzo rappresenta uno dei casi studio contemplati nel progetto europeo 3ENCULT al fine di effettuare un'analisi esaustiva inerente l'efficienza energetica mediante l'utilizzo di tecniche diagnostiche non distruttive.



Figura 3.8: Sala del Consiglio Comunale situata al primo piano di Palazzo D'Accursio, Bologna.



Figura 3.9: Sala Farnese e Cappella del Legato situate al secondo piano di Palazzo D'Accursio, Bologna.

3.2 PROGETTO EUROPEO SMOOHS: OBIETTIVI E PRINCIPALI APPLICAZIONI

Il progetto europeo SMooHS, Smart Monitoring of Historic Structures, iniziato alla fine del 2008 ed avviato verso la conclusione prevista per dicembre 2011, è centrato sul tema del monitoraggio diagnostico intelligente degli edifici storici. L'obiettivo principale del progetto è quello di realizzare complessi sistemi di monitoraggio mediante l'utilizzo di reti wireless e sensori innovativi che, installati in modo il più impossibile non invasivo, siano in grado di rilevare la temperatura, l'umidità, la velocità dell'aria, le emissioni acustiche, le vibrazioni, i livelli di luce ambientale o dei raggi UV e degli agenti chimici o biologici delle strutture, di elevato spessore storico-culturale, sulle quali saranno applicati. Parallelamente a tali sistemi dovranno essere sviluppati anche software specifici per la gestione di tali informazioni che siano di facile utilizzo e gestione al fine di realizzare un prodotto di validità universale ed in continuo aggiornamento. All'interno del progetto è stato, inoltre, dedicato uno spazio importante alla modellazione degli edifici storici che, essendo differenti dai comuni manufatti edilizi per tecniche realizzative e materiali utilizzati, richiedono particolari studi per l'esatta comprensione del loro comportamento strutturale ed una corretta gestione del degrado ove necessario. Tra le diverse attività seguite dal progetto ed affidate all'Università di Bologna sono compresi lo sviluppo e l'applicazione dei sistemi su alcuni casi studio, tra i quali Palazzo Malvezzi (Fig. 3.10), sede dell'Amministrazione Provinciale di Bologna, e delle mini strutture in muratura realizzate sia nel laboratorio universitario bolognese sia nel laboratorio CETMA di Brindisi (Fig. 3.11).



Figura 3.10: Sala Ovale di Palazzo Malvezzi e relativa prova di carico con piastra.



Figura 3.11: Mini strutture in muratura (pre e post intonaco) realizzate all'interno del laboratorio di ricerca CETMA, Brindisi.

Nello specifico, sono stati dapprima effettuati studi di monitoraggio continuo circa la diffusione di umidità, calore ed agenti salini all'interno delle strutture in muratura ed, in seguito, sono stati creati modelli continui semplificati che siano in grado di tener conto di tali fattori e possano rappresentare in modo corretto il comportamento strutturale di tale tipologia costruttiva. Lo scopo finale del lavoro è quello di affinare maggiormente il modello iniziale e realizzare uno strumento adeguato che descriva in modo completo, sia dal punto strutturale che meccanico, il deterioramento che subiscono le strutture in muratura nel corso degli anni. Un ausilio importante, durante le diverse fasi in cui è stato sviluppato il progetto, è stato offerto dalla diagnostica strutturale che mediante prove non distruttive ha fornito risultati utili per la comprensione del comportamento della struttura in esame sia dal punto di vista strutturale sia per ciò che concerne il deterioramento a cui essa è, inevitabilmente, sottoposta (Fig. 3.12).



Figura 3.12: Indagini diagnostiche non distruttive (ground penetrating radar, termografia) sui muretti in muratura presso il laboratorio CETMA, Brindisi.

4 MONITORAGGIO DEI MOTI CONVETTIVI

Mediante l'utilizzo della termografia a IR è stato effettuato il monitoraggio dei moti convettivi dell'aria all'interno di un ambiente di un edificio storico esistente ed, elaborando i dati acquisiti, è stato possibile ottenere mappe orizzontali e verticali delle temperature dell'aria all'interno della struttura.

4.1 Scopo della prova

La temperatura, o più in generale il clima all'interno di un edificio, riveste un ruolo fondamentale per la conservazione del patrimonio costruito, dei beni al suo interno e per il comfort dei suoi utilizzatori. Ogni corpo in natura interagisce con l'ambiente circostante e, sottoposto a differenti livelli di temperatura e umidità, modifica le proprie caratteristiche e tende ad assorbire o cedere calore. L'energia, sottoforma di calore, assorbita o rilasciata da ogni corpo produce, in particolare, la dilatazione o la contrazione delle molecole interne; l'effetto cumulativo, nel tempo e nello spazio, di tali fenomeni può dar luogo a fattori non trascurabili quali, ad esempio, la formazione di vuoti o fessure ed un eventuale cambiamento di stato. A tal proposito sorge la necessità di valutare e monitorare le condizioni climatiche all'interno di un edificio in termini di identificazione dei valori assoluti, gradienti termici, moti stagionali o giornalieri di tutti i parametri climatici principali. Tali valutazioni devono essere effettuate mediante l'utilizzo di strumentazioni non invasive che siano in grado di rilevare i parametri necessari per l'analisi ed al tempo stesso non arrecare alcun danno al manufatto o all'opera esistente. Lo scopo di tale analisi può essere sintetizzato nella ricerca di un legame tra antichità e progresso che, mediante l'utilizzo di tecniche contemporanee e talvolta innovative, riesca a preservare ed a migliorare le condizioni di opere ed edifici realizzati in epoche passate e differenti, sotto ogni aspetto, dalle condizioni attuali.

In particolare l'obiettivo dell'analisi svolta, ed in seguito descritta in ogni sua fase, consiste nel monitorare il flusso dei moti convettivi dell'aria di una porzione di un edificio storico in muratura in una possibile configurazione climatica a cui esso può essere sottoposto. I moti convettivi consistono nello spostamento di materia a causa

della differenza di temperatura tra due corpi che entrano in contatto tra loro; tale meccanismo di trasporto di calore, e conseguentemente di massa, è tipico dei fluidi in quanto sono composti da molecole che hanno legami più deboli rispetto ad un corpo solido o liquido. Nella pratica si verifica che, quando un fluido entra in contatto con una sorgente di calore tende, negli strati più vicini ad essa, a scaldarsi e tali strati, avendo una densità minore, a causa della spinta di Archimede migrano al di sopra degli strati di fluido più lontani che, essendo sottoposti a temperature minori, presentano una maggiore densità. L'insieme di tali fenomeni naturali instaura una serie di moti dell'aria, detti "convettivi", che favoriscono il mescolamento del fluido stesso fino al raggiungimento della condizione di equilibrio termico all'interno della porzione analizzata. I moti convettivi sono un fenomeno molto diffuso poiché in genere è difficile raggiungere un equilibrio termico stabile essendo presenti, in natura, numerose fonti di calore quali, ad esempio, la presenza di persone all'interno di un ambiente, gli impianti termici e di illuminazione, la perdita di calore attraverso l'involucro edilizio. In sintesi la natura è composta da corpi e da aria che interagiscono tra loro in modo continuo alla ricerca di un equilibrio termico. Lo scopo finale dell'analisi è quello di riuscire a comprendere la reale distribuzione di calore nell'ambiente analizzato al fine di essere consapevoli di ciò che realmente accade all'interno dell'edificio e controllare quei meccanismi che, come ad esempio i moti convettivi, possano essere pericolosi per la conservazione del patrimonio culturale.

4.2 Oggetto della prova: Palazzina della Viola (Bologna)

L'analisi dei moti convettivi è stata svolta all'interno della Palazzina della Viola (Fig. 4.1), edificio rinascimentale situato nel centro storico di Bologna, attualmente inserito come caso studio all'interno del progetto europeo 3Encult.



Figura 4.1: Prospetto della Palazzina della Viola, Bologna.

La Palazzina della Viola si sviluppa su due piani a cui si aggiungono il piano interrato ed il sottotetto; complessivamente la pianta si estende su un'area di 22 x 23 m². In particolare la prova è stata svolta nel salone centrale 1F9 situato al primo piano; nella pianta del primo piano della Palazzina la zona in cui è stata effettuata la prova ha riguardato il salone 1F9 e le stanze 1F2 e 1F8 (Fig. 4.2). Nell'analisi viene considerato un sistema di riferimento con origine nell'angolo sud del salone 1F9 ed avente l'asse x parallelo alla direzione sud-est, l'asse y parallelo alla direzione sud-ovest e l'asse z orientato dal basso verso l'alto.

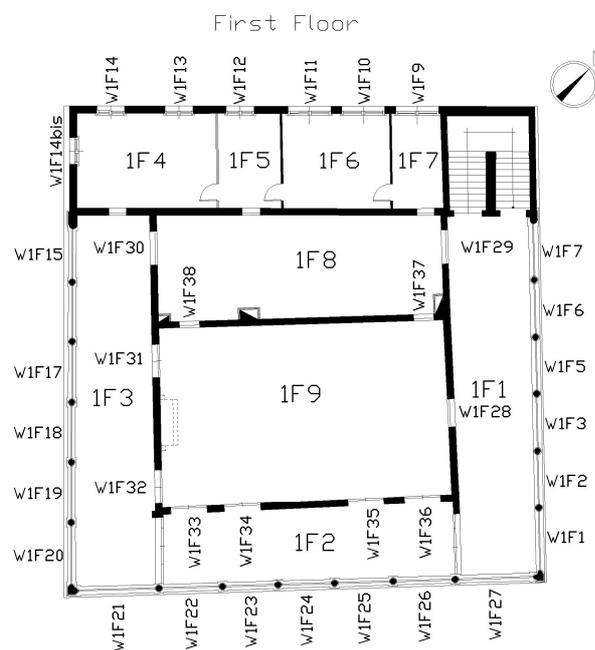


Figura 4.2: Pianta del primo piano della Palazzina della Viola.

Il salone 1F9 si sviluppa su un'area rettangolare di lunghezza pari a 13,5 metri, di larghezza pari a 8,6 metri e di altezza pari a 6 metri; il volume complessivo è di 697 m³. Esso si affaccia sia sulla loggia centrale che sulla loggia laterale situata a sud-ovest rispettivamente mediante gli infissi W1F36-W1F33 e W1F32-W1F31.

Gli infissi che collegano il salone alla loggia frontale presentano un'altezza di 3,6 m ed una base di 1,53 m mentre gli infissi che collegano il salone alla loggia laterale a sud-ovest presentano un'altezza di 2,73 m ed una base di 1,43 m (Fig. 4.3). Nella parete del salone disposta a sud-ovest è presente un focolare in pietra posizionato in mezzeria.



Figura 4.3: Infisso tipo sulla loggia frontale ed infisso tipo sulla loggia laterale

Il salone inoltre è collegato alla loggia laterale disposta a nord-est mediante il portone W1F28 di dimensioni 2.70 x 1.32 m, ed alla sala 1F8 mediante due porte, W1F37-W1F38, rispettivamente di dimensioni 2.09 x 0.93 m e 1.97 x 0.99 m.

Per valutare le diverse tipologie di solai presenti all'interno della Palazzina della Viola sono state effettuate verifiche nei punti in cui sono presenti degli scassi nel pavimento; da tali saggi è stato possibile risalire alla stratigrafia del pacchetto del pavimento del salone 1F9 che è composto da uno strato di piastrelle di 1 cm di spessore che poggia su un getto di calcestruzzo di 6.5 cm al cui interno sono inglobati una rete metallica elettrosaldata $\Phi 5\text{mm}/8\text{cm}$ e dei travetti metallici HEB100; al disotto sono inoltre presenti tavolato e travetti lignei che sono divisi dal pacchetto sovrastante da circa 4 cm di aria (Fig. 4.4).

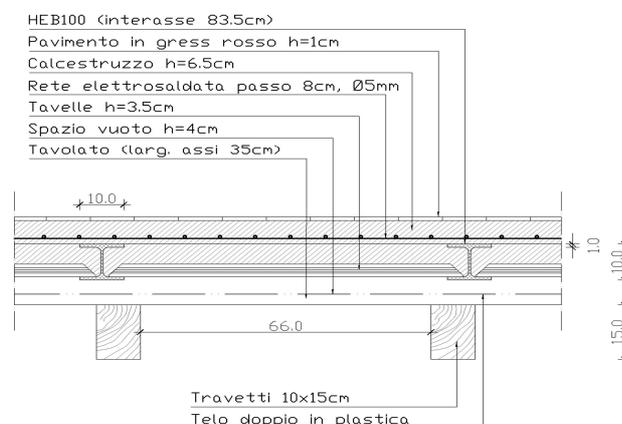


Figura 4.4: Pacchetto del pavimento del salone 1F9.

Il soffitto del salone è a travi lignee e presenta una doppia orditura con travi principali e travetti secondari ortogonali; le 4 travi hanno una base di 24 cm ed un'altezza di 37 cm, i travetti hanno una base di 12 cm ed una altezza di 10-13 cm, l'interasse dei travetti è in media pari a 58 cm mentre l'interasse delle travi è variabile da campata a campata e pari all'incirca a 2.7 metri. Al disopra degli elementi lignei è presente un assito di spessore pari a 2.5-3.5 cm ed uno strato di 2.5 cm di malta (Fig. 4.5).

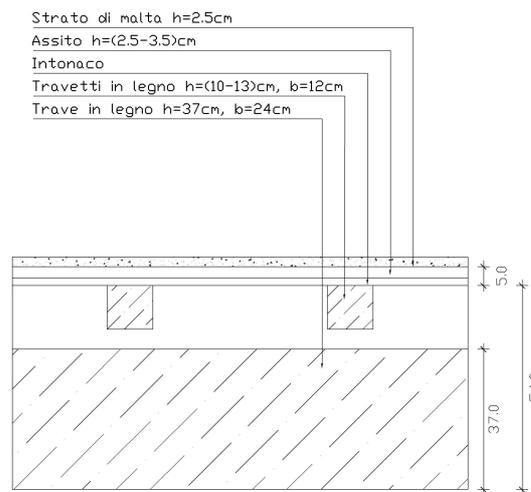


Figura 4.5: Pacchetto del soffitto del salone 1F9.

L'altezza complessiva del salone, dall'intradosso del tavolato intonacato e dipinto, situato sopra i travetti secondari, alle piastrelle in gres rosso del pavimento, è di 6 metri mentre l'altezza del salone dall'intradosso delle travi lignee principali al pavimento è di 5.35 metri e dall'intradosso dei travetti secondari al pavimento è di 5.86 metri.

Del salone 1F9, isolato graficamente dalle stanze circostanti e dal resto dell'edificio, è stata riportata in pianta la proiezione del soffitto con la corretta posizione delle 4 travi principali e delle 11 file dei travetti secondari (tratteggiati) (Fig. 4.6).

Il salone, luogo centrale dell'intero edificio, presenta al suo interno una vasta decorazione di antichi affreschi che sono, attualmente, coperti con opportuni teli per proteggerli dal degrado ed ulteriore deterioramento.

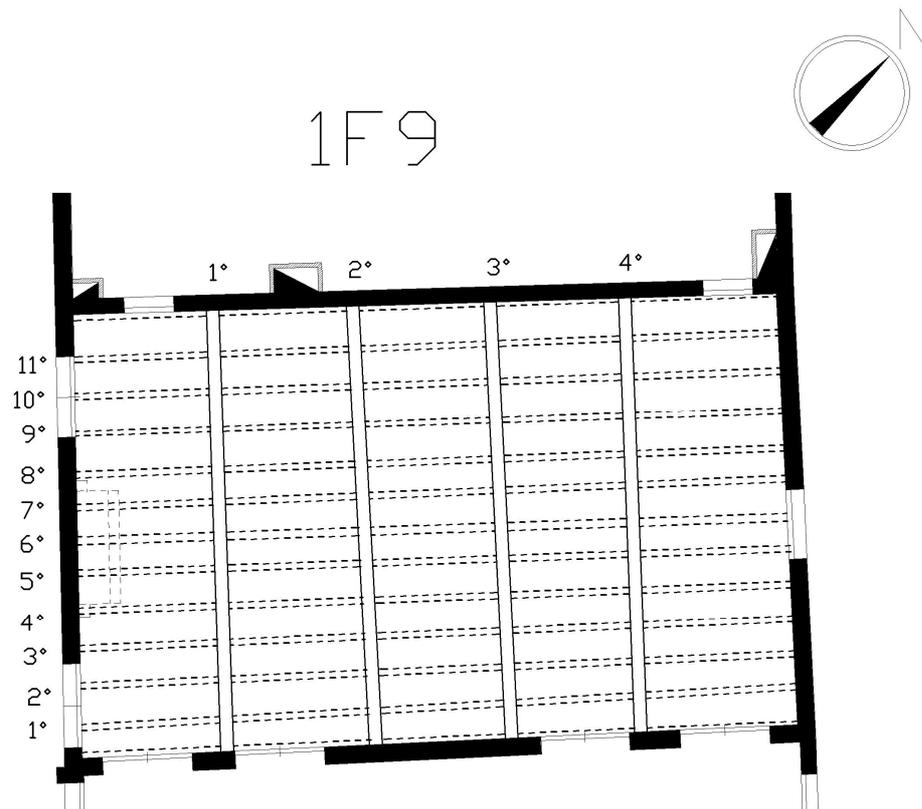


Figura 4.6: Proiezione in pianta del soffitto a travi lignee del salone 1F9.

4.3 Strumentazione utilizzata

Per effettuare il monitoraggio dei moti convettivi all'interno del salone 1F9 della Palazzina della Viola è stato fatto ricorso, principalmente, alla tecnica termografica utilizzando una termocamera FLIR P620 (Fig. 4.7) che presenta caratteristiche avanzate (Tab. 4.1).



Figura 4.7: Termocamera FLIR P620.

Tabella 4.1: Scheda Tecnica termocamera FLIR P620.

Caratteristiche Fisiche	
<i>Peso termocamera, incl. Batteria</i>	1,8 kg
<i>Dimensioni della termocamera (L × P × A)</i>	299 x 144 x 147 mm
Caratteristiche Tecniche	
<i>Campo visivo (FOV)/distanza minima di messa a fuoco</i>	24° x 18°/0,3 m
<i>Precisione</i>	±2 °C o ±2% della lettura
<i>Intervallo di misurazione della temperatura</i>	Da -40 °C a +120 °C (opzionale fino a +2000 °C)
<i>Focal Plane Array (FPA)</i>	Microbolometro non raffreddato
<i>Zoom elettronico</i>	1-2x continuo
<i>Messa a fuoco manuale ed elettronica con tecnologia USM</i>	Automatica/manuale
<i>Puntatore laser</i>	Diode laser semiconduttore AlGaInP, Classe 2
Caratteristiche Immagine IR	
<i>Risoluzione IR</i>	640 x 480 pixels
<i>Campo spettrale</i>	7,5 - 13 μm
<i>Regolazioni manuali dell'immagine</i>	Livello/campo/max./min
<i>Modalità immagine</i>	Immagine IR, immagine visiva, memorizzazione contemporanea di immagini IR e visive
<i>Commenti vocali di immagini</i>	60 secondi memorizzati insieme all'immagine (tramite Bluetooth)
Caratteristiche fotocamera digitale	
<i>Fotocamera digitale incorporata</i>	3,2 Megapixel, messa a fuoco automatica con illuminatore incorporato
Sistema di alimentazione	
<i>Caratteristiche batteria</i>	Batteria agli ioni di litio ricaricabile, sostituibile sul posto
<i>Autonomia batteria</i>	3 ore
<i>Sistema di ricarica</i>	Integrato nella termocamera, adattatore CA, caricabatteria a due vani o 12 V da un veicolo
<i>Gestione energetica</i>	Spegnimento automatico e modalità riposo (selezionabile dall'utente)
<i>Funzionamento con alimentazione CA</i>	Adattatore CA, 100 - 240 V CA, 50/60 Hz
Interfacce	
<i>USB-A</i>	Collegamento di un dispositivo USB esterno
<i>IrDA</i>	Per l'invio di file di commento testuali dal PDA alla termocamera, trasferimento wireless del testo
<i>WLAN</i>	Opzionale

Con la termocamera FLIR P620, posizionata sull'apposito cavalletto ossia con l'obiettivo distante circa 1.5 m dal pavimento, è stato possibile, per ogni scatto, ottenere

sia il termogramma IR che l'immagine visiva DC ad esso associata; l'immagine visiva presenta un angolo di inquadratura maggiore rispetto al termogramma. A supporto della termocamera è stata utilizzata anche una macchina fotografica digitale Nikon Coolpix P80-18x in grado di fornire immagini di migliore risoluzione, avendo 10.1 Megapixel contro i 3.2 Megapixel della fotocamera digitale incorporata alla termocamera, e da differenti inquadrature (Fig. 4.8).



Figura 4.8: NIKON Coolpix P80-18x.

Durante le diverse fasi di acquisizione dei dati è stato inoltre necessario valutare le condizioni igrometriche all'interno del salone 1F9 facendo ricorso al termoigrometro, strumento digitale in grado di fornire la misura della temperatura e dell'umidità relativa nel punto in cui è posizionata la sonda. In particolare è stato utilizzato un termoigrometro digitale HD 9216 Delta Ohm con sonde intercambiabili per valutare l'umidità dell'aria e la temperatura di contatto; tale strumento è molto semplice da utilizzare ed è utile in tutte le applicazioni in cui è richiesta la conoscenza di tali parametri con una certa ripetibilità, velocità e precisione (Fig. 4.9). L'umidità relativa è rilevata mediante l'utilizzo di un sensore il cui dielettrico è un polimero igroscopico; poiché è noto che la costante dielettrica relativa all'acqua è circa 80 si ottiene una forte variazione di capacità al variare della percentuale di umidità relativa del polimero. La temperatura è rilevata attraverso una termoresistenza al platino Pt100 (100 W a 0 °C). Entrambi i sensori utilizzati per tali misure sono piatti, ossia hanno un alto rapporto superficie-volume, al fine di ottenere una buona velocità di risposta. Tale termoigrometro digitale è in grado di rilevare valori di umidità relativa compresi nel range (5-98) % con una precisione dell'1 % e valori di temperatura compresi nel range (-10/70) °C con una precisione di 0.1 °C.



Figura 4.9: Termoigrometro digitale HD 9216 Delta Ohm.

Al termine dell'acquisizione dei dati è stata effettuata una verifica sui reali moti convettivi all'interno del salone 1F9 utilizzando un fumogeno colorato in grado di rendere visibile il flusso dell'aria all'interno della zona in esame; tale risultato verrà in seguito confrontato con i risultati dell'elaborazione dei dati raccolti. In particolare è stato utilizzato un fumogeno Softair rosso, di durata pari a 60 sec, di dimensioni pari a 21 x 160 mm, peso pari a 80 gr e massa attiva pari a 20 gr (Fig. 4.10).



Figura 4.10: Fumogeno Softair rosso 60 sec.

4.4 Procedura preparatoria

Mediante l'utilizzo della termografia non è possibile rilevare le temperature superficiali di corpi con alta riflettività e bassa emissività ϵ ; sorge dunque la problematica dell'applicazione di tale tecnica per rilevare la temperatura di superfici riflettenti e dell'aria, essendo anch'essa quasi totalmente trasparente agli infrarossi. Per ovviare a tale difficoltà si possono utilizzare pezzi di carta sia applicati alla superficie riflettente sia posizionati nel vuoto dell'ambiente in esame, la capacità termica della carta si può trascurare ed i pezzi di carta, in pratica, assumono la temperatura della superficie di riferimento (Camuffo et al., 2010). Identicamente si è pensato di utilizzare pezzi di carta per rilevare l'andamento dei moti convettivi all'interno della stanza in

quanto le strisce di carta raggiungono velocemente l'equilibrio termico con l'ambiente e l'infrarosso che emettono è rappresentativo della temperatura dell'aria.

Essendo l'obiettivo della prova quello di monitorare i moti convettivi in un ambiente significativo della Palazzina è stato pensato di appendere nel salone 1F9 delle strisce di carta sottile (grammatura compresa tra 15-40 g/m²) larghe 25 cm e lunghe circa 6 m in modo da coprire tutta l'altezza della sala. Precedentemente al posizionamento in sito delle strisce di carta è stata progettata la loro posizione in base al cono di apertura dell'obiettivo della termocamera che è stata decisa di posizionare davanti il portone W1F28; la termocamera FLIR P620 utilizzata nell'analisi ha un cono di apertura di 24°C in orizzontale e di 18°C in verticale. Nello specifico, durante la progettazione preliminare, è stato deciso di installare 15 strisce di carta in tutto il salone distribuendole 3 per ogni campata e sono state riportate sia in pianta che in una sezione le diverse inquadrature necessarie al fine di riuscire ad eseguire, nel minor numero possibile di termogrammi (circa 28), una serie completa che consentisse di rilevare le condizioni termiche di tutte le strisce di carta e quindi dell'aria dell'intero salone (Fig. 4.11-4.12). In corso d'opera su tali schizzi sono state annotate diverse osservazioni necessarie per apportare delle modifiche e delle migliorie alla fase di progettazione preliminare.

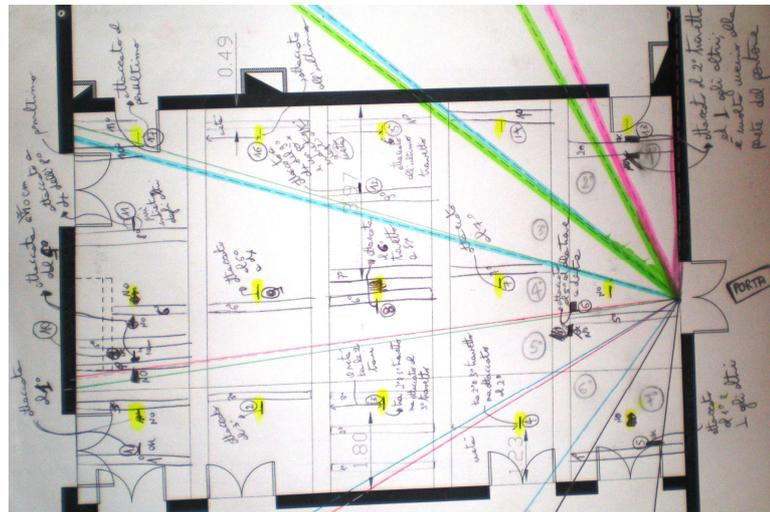


Figura 4.11: Progettazione preliminare delle acquisizioni: pianta del salone 1F9 e rappresentazione dei coni di inquadratura della termocamera in orizzontale.

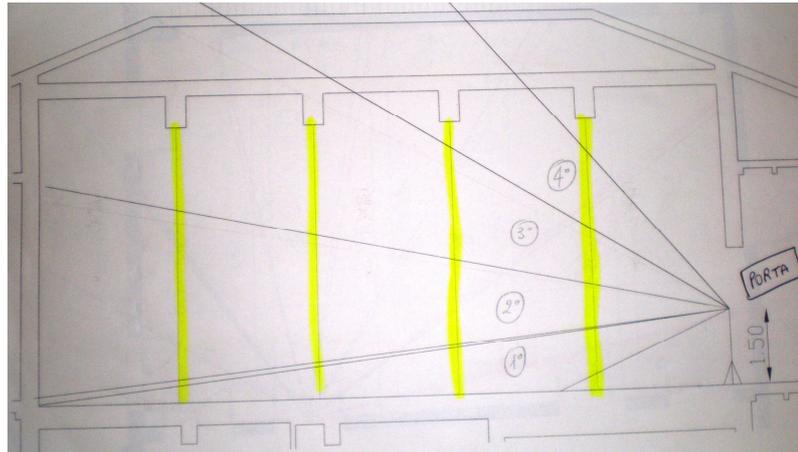


Figura 4.12: Progettazione preliminare delle acquisizioni: sezione del salone 1F9 e rappresentazione dei coni di inquadratura della termocamera in verticale.

Prima dell'installazione è avvenuta la preparazione di tutte le strisce che sono state tagliate per una altezza pari a circa 6.5 metri, piegate a fisarmonica formato A4 e munite, nella parte iniziale, di nastro adesivo. In seguito è avvenuta, manualmente, l'applicazione delle singole strisce di carta mediante l'utilizzo di un trabattello metallico di altezza pari a circa a 5 metri (Fig. 4.13) che, in totale sicurezza, ha reso possibile il raggiungimento del soffitto del salone.

Posizionato il trabattello nel punto in cui era stato progettata l'installazione della striscia nella fase preliminare, un operatore, raggiunta la sommità, ha cercato con cura di pulire da polvere e materiale incoerente la superficie del soffitto, ove necessario, con una spatola e, successivamente, ha fissato la striscia mediante l'utilizzo del nastro adesivo già predisposto in essa; in seguito la striscia di carta è stata fatta scendere verso il basso con molta cautela e con l'aiuto di un ulteriore operatore che, da terra, ha cercato di accompagnare nella discesa la striscia stessa al fine di diminuire le pressioni sul nastro adesivo applicato al soffitto. Stesa la striscia in tutta la sua altezza, per assicurare che essa si mantenesse ferma e nella stessa posizione durante tutta l'analisi svolta, è stata infine fissata mediante nastro adesivo alle piastrelle del pavimento, preventivamente pulito con un panno per eliminare la polvere e particelle fini, ed opportunamente numerata (Fig. 4.14).

Tali operazioni, descritte nel dettaglio, sono state ripetute per tutte le strisce di carta installate nel salone 1F9 secondo le istruzioni riportate nella progettazione preliminare.



Figura 4.13: Disposizione delle strisce di carta al soffitto del salone mediante l'utilizzo di un trabattello.

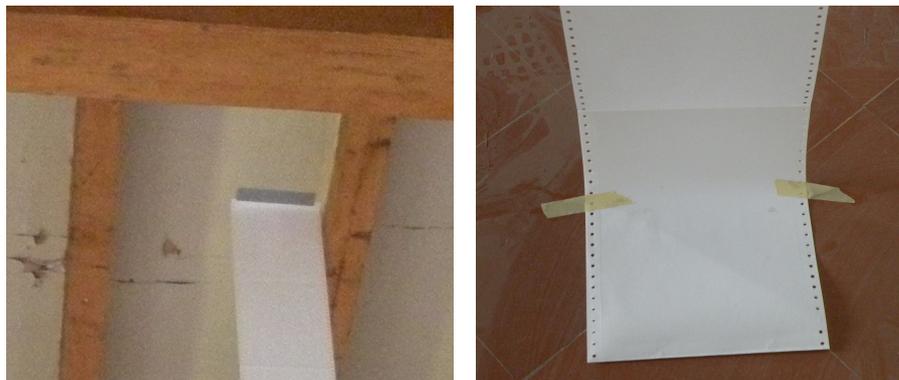


Figura 4.14: Particolari del fissaggio delle strisce al soffitto ed al pavimento.

Tale fase si è rivelata piuttosto complicata in quanto è stato necessario scegliere un nastro adesivo che, da un lato, non danneggiasse l'intonaco dipinto presente tra i travetti del soffitto e, dall'altro, fosse sufficientemente resistente da reggere il peso della striscia di carta alta 6 metri. Inoltre durante la fase di discesa a terra della striscia in alcuni casi il nastro adesivo si è staccato dal soffitto ed è stato necessario ripetere la fase dell'installazione. Le strisce numero 13 e numero 5, essendo vicino all'obiettivo della termocamera e richiedendo una inquadratura personalizzata, è stato possibile posizionarle ortogonalmente alle altre strisce e quindi attaccarle ai travetti in legno piuttosto che al soffitto; fissare una striscia di carta sul legno è estremamente più semplice e sicuro che fissarla all'intonaco del soffitto.

Durante tale fase di installazione delle strisce di carta nel salone 1F9 è stato necessario effettuare delle varianti in corso d'opera rispetto alle posizioni progettate in

sede preliminare al fine di evitare la sovrapposizione delle stesse e di garantirne un fissaggio sicuro; complessivamente è stato deciso di posizionare 17 strisce di carta ed è stata definita la loro disposizione finale e numerazione: i numeri senza pedice rappresentano la proiezione in pianta delle strisce di carta appese al soffitto, i numeri con i pedici, ove presenti, rappresentano la posizione delle strisce di carta sul pavimento in quanto alcune strisce non sono state installate in modo perfettamente verticale e la proiezione della posizione del soffitto non si sovrappone alla posizione nel pavimento (Fig. 4.15). In tale pianta è mostrata inoltre la proiezione delle travi lignee del soffitto per permettere di cogliere al meglio la disposizione delle strisce e visualizzare come esse siano state distribuite in modo all'interno di ogni campata del salone.

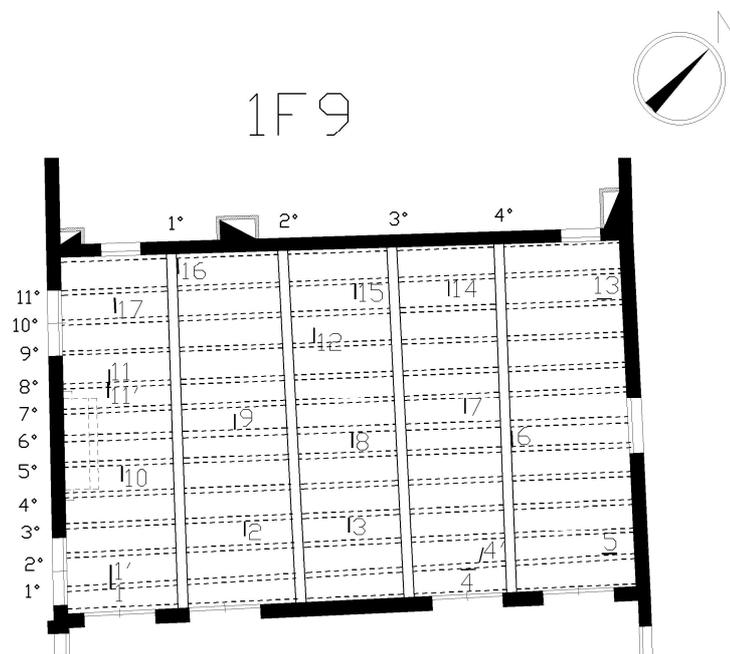


Figura 4.15: Disposizione e numerazione delle strisce di carta nel salone 1F9.



Figura 4.16: Vista dall'alto delle strisce di carta installate nel salone 1F9.

Terminata l'installazione delle 17 strisce di carta (Fig. 4.16), su ciascuna sono stati segnati, mediante l'utilizzo di un pennarello, i livelli corrispondenti ad 1, 2, 3 e 3.5 m dal pavimento; per facilitarne la visualizzazione nelle foto e nei termogrammi, tali livelli sono stati rispettivamente rappresentati mediante un rombo, un segmento orizzontale, un triangolo e di nuovo un segmento orizzontale.

Sono state apportate tali indicazioni in modo che in fase di analisi ed elaborazione dei dati acquisiti vi fossero punti di riferimento lungo l'estensione della striscia in altezza, in modo da poter misurare la temperatura dell'aria a diverse quote e con una buona precisione (Fig. 4.17).



Figura 4.17: Strisce di carta installate nel salone 1F9 e segni indicativi delle quote.

Per rilevare, in fase di elaborazione dei dati, anche le temperature delle pareti e realizzare un modello tridimensionale, sono state applicate delle croci di dimensioni circa 20 x 20 cm realizzate con nastro adesivo di carta e posizionate sui teli bianchi che proteggono gli affreschi; esattamente sono state applicate croci sia a 2 che a 4 m rispettivamente negli angoli del salone, in mezzeria alle pareti, al di sotto delle 4 travi principali e di fianco al portone W1F28 e del focolare (Fig. 4.18).

Nello specifico, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, nella parete S-E le croci dei 2 e 4 m sono state posizionate, rispettivamente, ad una distanza pari a 0, 2.75, 5.60, 8.15, 10.65 e 13.5 m, e nella parete S-O ad una distanza pari a 2.25 e 5.80 m; rispetto all'angolo nord del salone nella parete N-O sono state posizionate ad una distanza pari a 0, 2.66, 5.30, 7.98, 10.63 e 13.5 m e nella parete N-E ad una distanza pari a 3.10 e 5.47 m.



Figura 4.18: Particolare della parete N-O con croci realizzate con nastro adesivo di carta ed applicate nei punti significativi.

Per misurare infine anche la temperatura degli infissi e delle porte sono stati applicati su ciascuno di essi rispettivamente due pezzi di carta di dimensioni pari ad un quarto di un foglio A4. I pezzi di carta sono stati numerati attraverso le lettere alfabetiche a partire dalla lettera A, posizionata nella parte alta dell'infisso W1F36, procedendo in senso orario fino alla lettera T, posizionata nella parte bassa del portone W1F28.

Nelle finestre i due pezzi di carta sono stati posizionati nei vetri dell'anta destra. Nelle porte di dimensioni ridotte, presenti sulla parete opposta alla loggia frontale, i due pezzi di carta sono stati disposti uno nella parte alta ed uno nella parte bassa della mezzeria. Nel portone principale W1F28 i due pezzi di carta sono stati disposti nella parte destra, rispettivamente uno in alto ed uno in basso.

Per avere una raccolta maggiormente completa sui dati del salone sono stati fissati anche ulteriori pezzi di carta, U, V e Z, rispettivamente vicino all'infisso W1F34, nell'angolo sud del salone ossia tra l'infisso W1F33 e W1F32 e sul focolare (Tab. 4.2-4.3). Nello sviluppo scatolare del salone 1F9 (Fig. 4.19) sono riportati gli infissi, le aperture, la tipologia di solaio e la disposizione delle strisce di carta, delle croci e dei pezzi di carta precedentemente descritti.

Tabella 4.2: Posizionamento dei pezzi di carta nel salone 1F9.



Tabella 4.3: Coordinate dei pezzi di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9.

Tassello di carta	x (m)	y (m)	z (m)	Tassello di carta	x (m)	y (m)	z (m)	Tassello di carta	x (m)	y (m)	z (m)
A	11.58	0	2.48	H	0.88	0	0.81	Q	12.29	8.6	1.77
B	11.58	0	0.82	I	0	1.28	2.35	R	12.29	8.6	0.62
C	9.11	0	2.50	L	0	1.28	0.81	S	13.5	3.85	2.19
D	9.11	0	0.88	M	0	7.45	2.36	T	13.5	3.85	0.86
E	3.38	0	2.46	N	0	7.45	0.80	U	4.60	0	1.44
F	3.38	0	0.81	O	1.39	8.6	1.85	V	0.27	0	1.52
G	0.88	0	2.47	P	1.39	8.6	0.73	Z	0	4.50	1.70

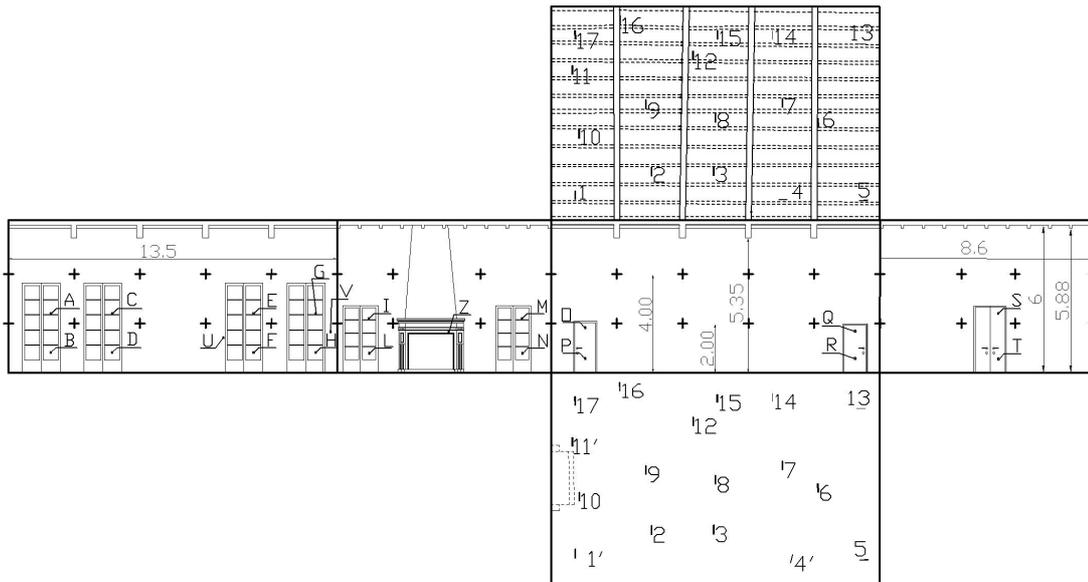


Figura 4.19: Sviluppo scatolare del salone 1F9.

Terminata la procedura preparatoria per l'analisi da svolgere sono stati acquisiti alcuni termogrammi di prova con la termocamera posizionata davanti al portone W1F28 (Fig. 4.20) per valutare l'effettiva possibilità di inquadrare tutte le strisce a diversi livelli di altezza, come previsto dalla progettazione preliminare. Tuttavia, in sito, dopo una serie di prove ed osservazioni è stato notato che, in realtà, in alcune inquadrature le strisce si sovrapponevano e non si riusciva bene ad effettuare un monitoraggio di tutti i punti significativi; inoltre il numero dei termogrammi da realizzare, sia in orizzontale che in verticale, per inquadrare tutte le strisce alle varie quote risultava maggiore di quello previsto in sede di analisi preliminare.



Figura 4.20: Valutazione delle inquadrature delle strisce installate mediante il posizionamento della termocamera davanti al portone W1F28.

Preso atto di tali considerazioni è stato studiato un nuovo piano di procedura per l'acquisizione dei dati e lo svolgimento della prova; in seguito a numerosi tentativi e differenti considerazioni è stato deciso di installare la termocamera nell'angolo est davanti all'infisso W1F36 ossia davanti all'infisso situato lateralmente al portone principale. Posizionando la termocamera in un angolo del salone, e non in una posizione centrale ad una parete, si riescono ad ottenere inquadrature migliori e cogliere la quasi totalità delle strisce in tutto il loro sviluppo con un numero minore di scatti. A seguito di ulteriori prove si è calcolato che per coprire l'intero volume del salone ed inquadrare le 17 strisce applicate sono necessarie, in media, 5 inquadrature in orizzontale, a partire dal lato in cui è posizionata la termocamera e procedendo in senso orario, e 4 inquadrature verticali, dal basso verso l'alto, ossia circa 20 termogrammi (Fig. 4.21-4.22). Le 5 inquadrature in orizzontale comprendono anche quella inerente la striscia 5 che, essendo posizionata di fianco alla termocamera, per essere inquadrata richiede lo spostamento della strumentazione. La termocamera FLIR P620 per il salvataggio del termogramma IR e della foto digitale DC inerente impiega 20 secondi; da qui sorge l'impossibilità da parte dell'operatore di eseguire scatti molto ravvicinati tra loro nel tempo durante la fase di acquisizione dati.

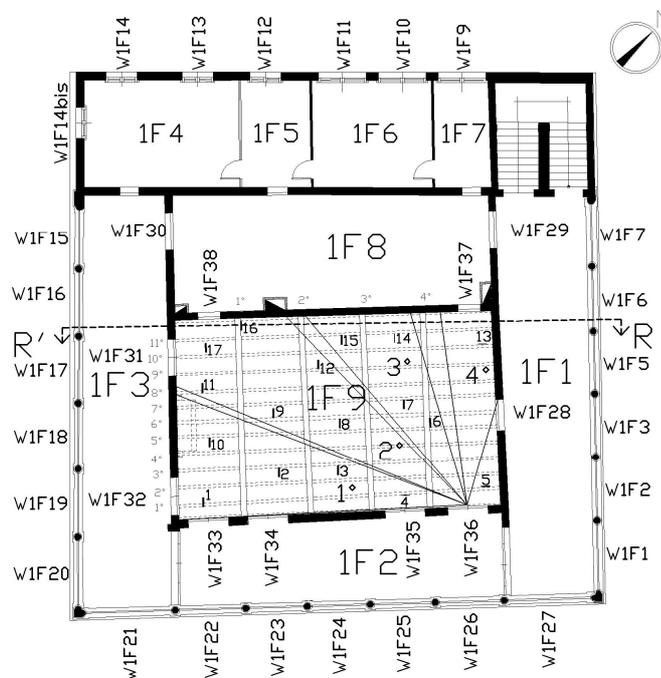


Figura 4.21: Pianta del 1P e rappresentazione in orizzontale dei coni di inquadratura della termocamera.

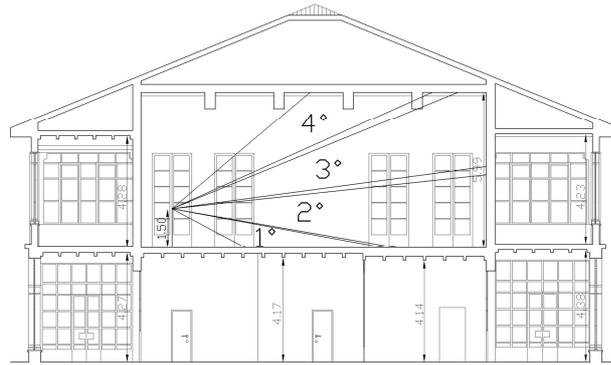


Figura 4.22: Sezione R-R' e rappresentazione in verticale dei coni di inquadratura della termocamera in verticale.

Per cercare di cogliere i moti convettivi all'interno del salone 1F9 sono state progettate due diverse fasi di acquisizione dei dati: nella prima fase si è pensato di mettere in contatto il salone con un serbatoio di aria calda, nella seconda fase di mettere in contatto il salone con un serbatoio di aria fredda. A tal fine, nei giorni precedenti lo svolgimento della prova contemporaneamente all'installazione delle strisce di carta, è stata monitorata la temperatura delle sale adiacenti e del salone in esame mediante l'utilizzo di un termoigrografo; è stato dedotto che il picco massimo di aria calda si ha nella loggia 1F2 all'incirca alle ore 12 mentre il picco minimo di aria fredda si ha nella sala 1F8 dalle ore 12 alle ore 13 (Fig. 4.23). In base a tali rilievi termici è stata considerata la loggia frontale 1F2 come serbatoio di aria calda e la sala 1F8 come serbatoio di aria fredda.

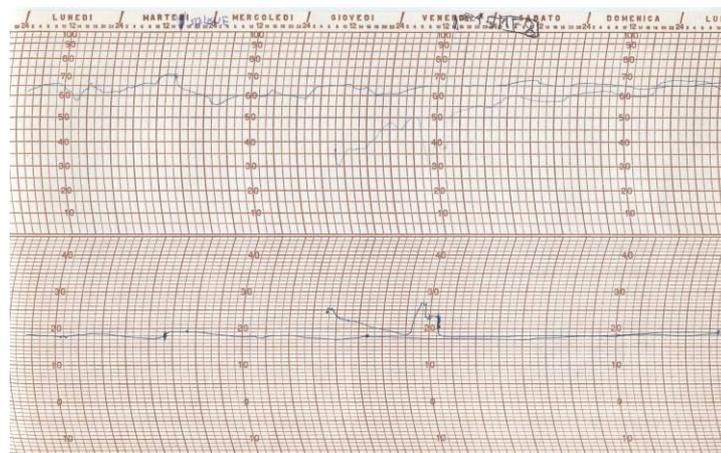


Figura 4.23: Grafico delle temperature rilevate con il termoigrografo.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata il giorno successivo alla procedura preparatoria tenendo, per più di 12 ore, chiuse tutte le aperture del 1° piano della Palazzina in modo tale che si instaurasse il reale clima presente in ogni stanza e i dati fornissero dei risultati attendibili sui moti convettivi presenti.

Prima di iniziare con la procedura di acquisizione dei dati, il giorno successivo alla procedura preparatoria, è stato necessario effettuare di nuovo l'installazione delle strisce 16 e 4 che nella nottata si erano staccate dal soffitto (Fig. 4.24).

Per velocizzare la riparazione ed essere certi della riuscita, le due strisce sono state riposizionate in posizione simile ma sono state fissate, mediante nastro adesivo, ai travetti di legno piuttosto che all'intonaco. In particolare la striscia 4 (Fig. 4.25) è stata posizionata ortogonalmente al travetto di legno ed è stata girata leggermente verso l'obiettivo della termocamera per essere visualizzata meglio nelle inquadrature. Su tali strisce sono stati di nuovo segnati con il pennarello, di differente colore, i nuovi livelli delle quote di riferimento.



Figura 4.24: Striscia di carta staccatasi dal soffitto.



Figura 4.25: Indicazione delle nuove quote di riferimento nella striscia 4 riposizionata.

4.5 Acquisizione dei dati

L'acquisizione dati per il monitoraggio dei moti convettivi all'interno del salone 1F9 della Palazzina della Viola, effettuata in data 22 Aprile 2011, ha richiesto la presenza di quattro operatori ognuno dei quali ha avuto un compito distinto; per ottenere infatti un esauriente monitoraggio della zona in esame è necessario sia effettuare i termogrammi (Fig. 4.26) che registrare i tempi di svolgimento della prova, annotare osservazioni ed effettuare delle foto con macchina digitale.



Figura 4.26: Acquisizione dati mediante termocamera.

Ogni serie di acquisizione dei dati è stata eseguita con la termocamera davanti all'infisso W1F36 nell'angolo est del salone (Fig. 4.27) iniziando dall'angolo sud e ruotando in senso orario, per le inquadrature orizzontali, e dal basso verso l'alto, per le quote delle inquadrature verticali. La striscia numero 5 è stata inquadrata alla fine di ciascuna serie spostando la termocamera dinanzi ad essa presso la parete N-O, ad una distanza pari a 8-9 m, ed effettuando tre inquadrature verticali, dal basso verso l'alto.

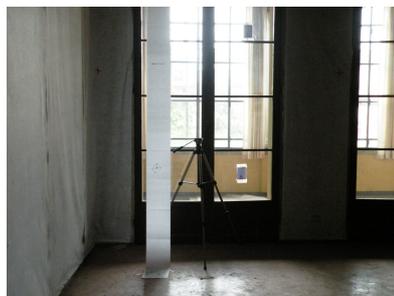


Figura 4.27: Termocamera posizionata davanti all'infisso W1F36 nell'angolo est del salone.

Per riuscire ad ottenere termogrammi che rappresentino al meglio le temperature reali occorre, prima di iniziare l'acquisizione, inserire all'interno della termocamera i valori di alcuni parametri quali la temperatura dell'ambiente, l'umidità relativa, la distanza dell'oggetto ed il valore di emissività dei materiali. Per valutare dal termogramma la temperatura dell'aria attraverso la superficie delle strisce di carta è necessario inserire il valore di emissività della carta; un foglio di carta bianco ha emissività $\varepsilon = 0.93$. Settando lo strumento con l'emissività della carta si ottiene la temperatura dell'aria nei punti in cui sono presenti le strisce di carta ed, in buona approssimazione, anche la temperatura superficiale di altri oggetti presenti all'interno del salone quali, ad esempio, infissi, focolare e porte in quanto i materiali costituenti hanno emissività all'incirca compresa tra 0.9 e 0.95. Se in sito non si hanno a disposizione i valori di tali parametri è possibile inserirli in seguito ossia in sede di elaborazione dei dati. La termocamera, inoltre, è stata impostata in modo tale che, per ogni termogramma salvato dall'operatore venisse memorizzata anche la foto corrispondente scattata, in automatico, dalla macchina digitale inglobata nello strumento.

Le due fasi distinte di acquisizione dei dati, descritte nella procedura preparatoria, sono state svolte in corrispondenza temporale ai picchi massimi e minimi rispettivamente rilevati nelle due sale che fungono da serbatoio (Fig. 4.28-4.29); tra le due fasi, in cui è trascorso del tempo, sono state di nuovo chiuse tutte le aperture del salone 1F9 per ricreare una situazione di temperatura al suo interno non alterata da correnti esterne. Sono riportati in seguito i dati inerenti la volumetria, la superficie netta del pavimento, la superficie netta del soffitto e l'area dell'involucro, rispettivamente, del salone 1F9, del serbatoio di aria calda 1F2 e del serbatoio di aria fredda 1F8 (Tab. 4.4).

Tabella 4.4: Dati inerenti la volumetria, le superfici nette e l'area dell'involucro del salone 1F9, del serbatoio di aria calda 1F2 e del serbatoio di aria fredda 1F8.

Ambiente	<i>Volume</i>	<i>Sup. netta pav.</i>	<i>Sup. netta soff.</i>	<i>Area involucro</i>
1F9	674 m ³	112.5 m ²	148.8 m ²	552.3 m ²
1F2	190 m ³	46.5 m ²	53.4 m ²	242.7 m ²
1F8	239 m ³	61.8 m ²	64.2 m ²	282.4 m ²

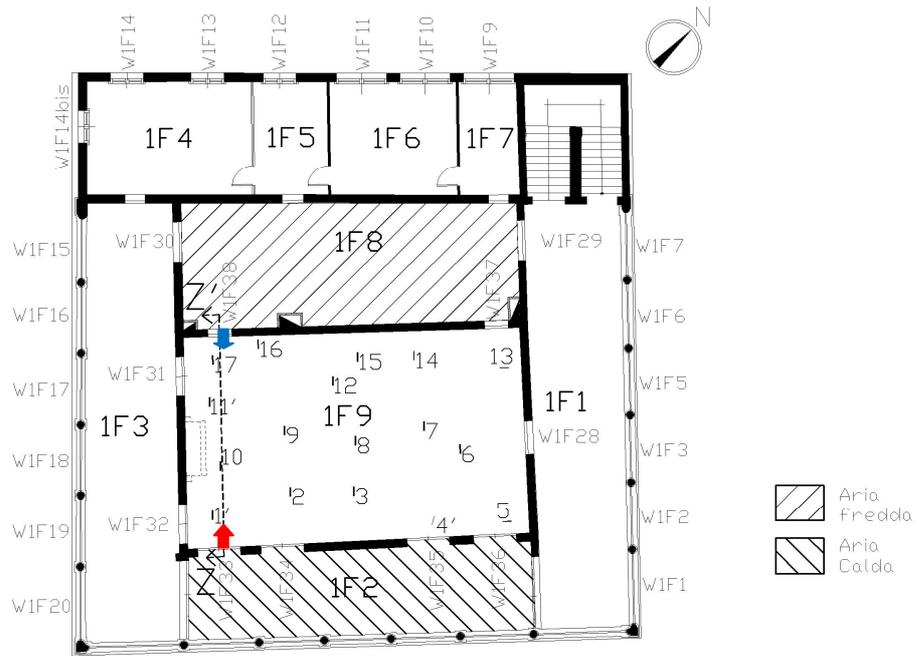


Figura 4.28: Indicazione dei serbatoi di aria calda e fredda adiacenti il salone 1F9.

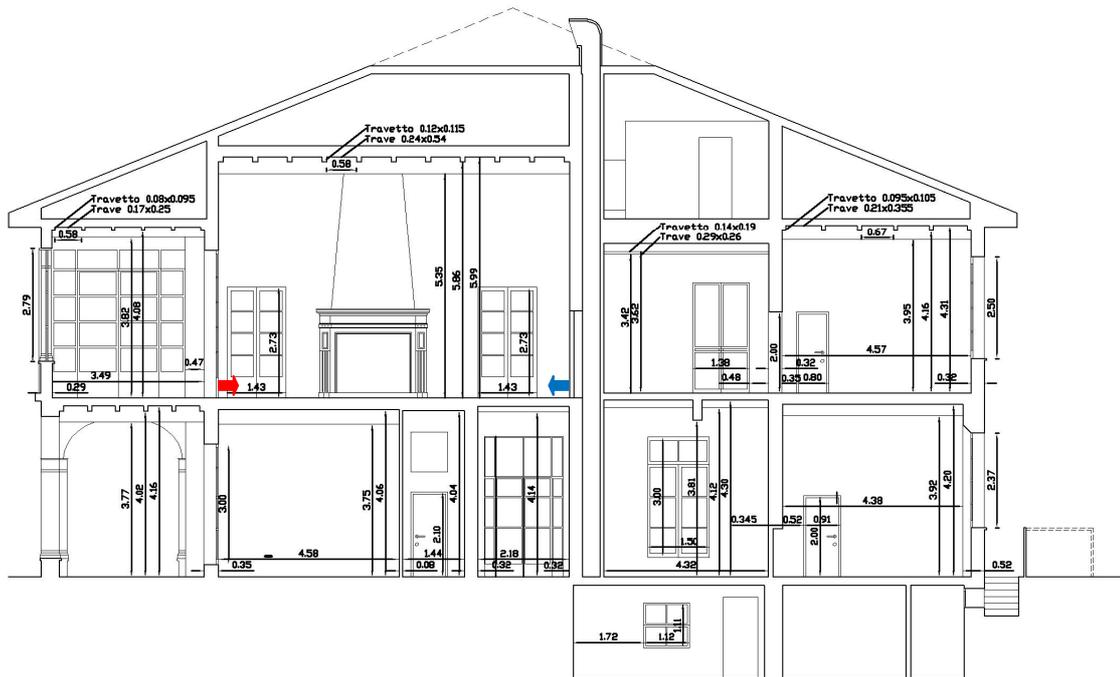


Figura 4.29: Sez. Z-Z' del salone 1F9 con indicazione dei flussi di aria calda ed aria fredda.

Nella prima fase di acquisizione dei dati il salone 1F9 è stato messo in collegamento con la loggia 1F2 (Fig. 4.30). Prima di effettuare tale collegamento è stata svolta, alle ore 11.24, una serie completa di acquisizione dati tenendo chiuse tutte le

aperture. Terminata tale serie, senza effettuare alcuna pausa, è stato aperto, alle ore 11.34, l'infisso W1F33 permettendo all'aria calda della 1F2 di penetrare e distribuirsi nel salone 1F9 ed è stata svolta una prima serie di acquisizione dati a finestra aperta ed alle ore 11.39 una seconda serie di acquisizione dati a finestra aperta. Mantenendo sempre aperto l'infisso W1F33 sono state svolte altre due serie complete di acquisizione dati rispettivamente alle ore 11.54 e 12.19. Le prime due serie a finestra aperta, durate ciascuna circa 5 minuti, sono state svolte in continuo dopo l'apertura dell'infisso W1F33 per cercare di cogliere l'andamento del flusso caldo dalla loggia 1F2 all'interno del salone 1F9; le ultime due serie a finestra aperta sono state distanziate nel tempo, esattamente dopo 20 minuti e dopo 45 minuti dall'apertura dell'infisso, per cercare di cogliere l'assestamento e la distribuzione del flusso di calore nel salone 1F9 ad una certa distanza temporale dall'apertura dell'infisso. Queste prime acquisizioni si sono concluse alle ore 12.26. All'inizio dell'acquisizione dei dati della serie con tutti gli infissi chiusi e della prima serie a finestra aperta ed al termine di ognuna delle restanti 3 serie, mediante l'utilizzo del termoigrometro digitale, sono stati rilevati i valori di temperatura ed umidità relativa, a circa 1,80 m da terra, sia al centro del salone 1F9 che al centro del serbatoio di aria calda ossia della loggia 1F2; tali valori sono necessari in sede di elaborazione (Tab. 4.5).

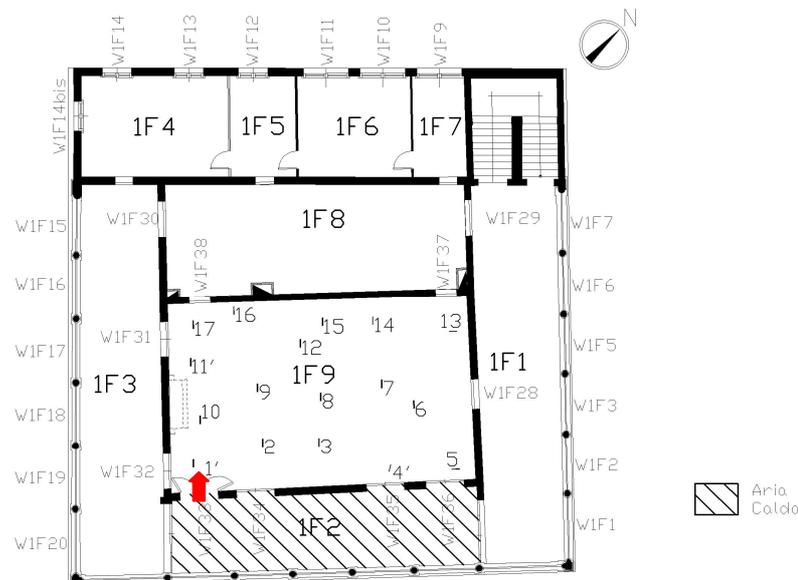


Figura 4.30: Prima fase di acquisizione dati: salone 1F9 in collegamento con serbatoio aria calda.

Tabella 4.5: Valori di T e RH misurati in centro al salone 1F9 e alla loggia 1F2.

serie	h	1F9			1F2		
		h rilievo	T (°C)	RH (%)	h rilievo	T (°C)	RH (%)
tutto chiuso	11.24-11.32	10.45	19,9	48,4	10.45	23,5	35,7
1° fin.aperta	11.34-11.38	10.45	19,9	48,4	10.45	23,5	35,7
2° fin.aperta	11.39-11.48	11.49	19,9	48,7	11.49	21,2	42,5
3° fin.aperta	11.54-12.02	12.03	20,03	45,5	12.03	20,9	43
4° fin.aperta	12.19-12.26	12.29	21,3	44,7	12.29	21,9	41,1

Nella seconda fase di acquisizione dei dati il salone 1F9 è stato messo in collegamento con la sala 1F8 (Fig. 4.31); aperta alle ore 13.55 la porta W1F38 che collega le due sale è stata svolta una prima serie completa di acquisizione dati, durata 8 minuti, a cui è seguita, alle ore 14.03, una seconda serie completa di acquisizione dati durata 7 minuti. Alle ore 14.42 è stata svolta la terza ed ultima serie di acquisizione dati a porta aperta durata 9 minuti. In analogia con quanto svolto nella prima fase, le prime due serie sono state eseguite immediatamente dopo l’apertura del collegamento mentre la terza serie è spostata temporalmente ad esso. I rilievi si sono conclusi alle ore 14.51. All’inizio dell’acquisizione dei dati di ogni serie a porta aperta, mediante l’utilizzo del termoigrometro digitale, sono stati rilevati i valori di temperatura ed umidità relativa, a circa 1,80 m da terra, sia al centro del salone 1F9 che al centro del serbatoio di aria fredda ossia della sala 1F8 (Tab.4.6).

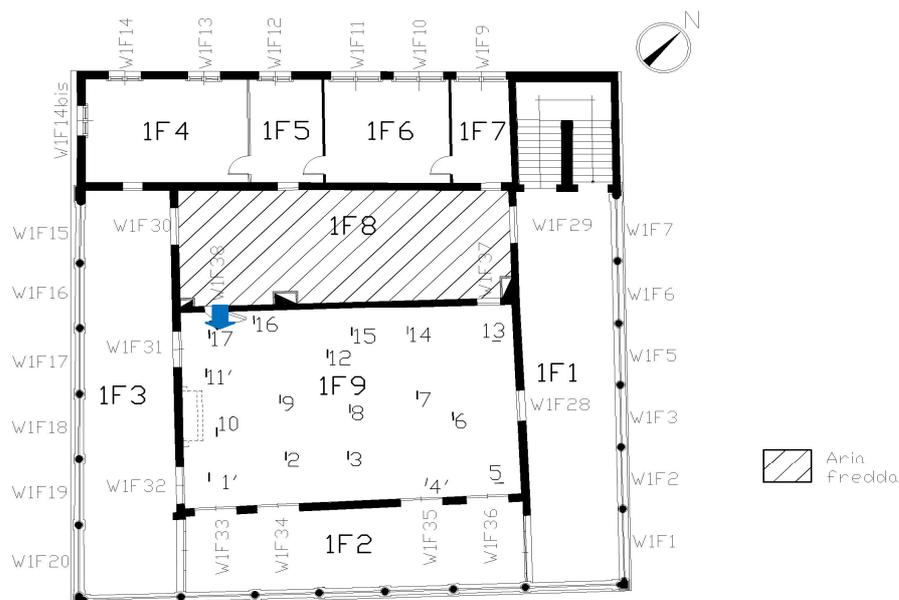


Figura 4.31: Seconda fase di acquisizione dati: salone 1F9 in collegamento con serbatoio aria fredda.

Tabella 4.6: Valori di T e RH misurati in centro al salone 1F9 e nella stanza 1F8.

serie	h	1F9			1F8		
		h rilievo	T (°C)	RH (%)	h rilievo	T (°C)	RH (%)
1° porta aperta	13.55-14.03	13.50	19,8	47,5	13.50	19,3	47
2° porta aperta	14.03-14.10	13.50	19,8	47,5	13.50	19,3	47
3° porta aperta	14.42-14.51	14.40	19,5	48	14.40	19	45,4

Per rendere esaustiva la raccolta delle informazioni al contorno sono state effettuate anche tre serie di acquisizioni, mediante termocamera disposta al centro, di tutti gli angoli e le mezzerie delle pareti del salone, del soffitto e del pavimento. Tali acquisizioni sono state effettuate all'inizio ed al termine della prima fase, in cui si è utilizzato il serbatoio di aria fredda, ed al termine della seconda fase, in cui si è utilizzato il serbatoio di aria calda. Per ogni mezzeria ed angolo del salone sono state effettuate tre inquadrature in verticale, dal basso verso l'alto. Sono raccolte e mostrate, in modo unificato, le informazioni inerenti gli orari e gli intervalli dei fotogrammi ed immagini digitali relativi alle diverse fasi dell'acquisizione dati (Tab. 4.7).

Tabella 4.7: Sequenza degli orari ed intervalli dei termogrammi IR + immagini digitali DC relativi a tutte le fasi e serie di acquisizione dati.

h	Serie di acquisizione dati	Intervallo fotogrammi IR + immagini digitali DC
9.00-9.47	1° serie su pareti/pavimento/soffitto del salone	3380-3429
11.24-11.32	serie tutto chiuso	3434-3477
11.34-11.38	1° serie a finestra aperta	3478-3507
11.39-11.48	2° serie a finestra aperta	3508-3549
11.54-12.02	3° serie a finestra aperta	3550-3593
12.19-12.26	4° serie a finestra aperta	3610-3659
12.30-12.42	2° serie su pareti/pavimento/soffitto del salone	3660-3707
13.55-14.03	1° serie a porta aperta	3710-3745
14.03-14.10	2° serie a porta aperta	3746-3785
14.42-14.51	3° serie a porta aperta	3786-3925
14.54	3° serie su pareti/pavimento/soffitto del salone	3826-3873

4.6 Elaborazione dei dati

Terminata l'acquisizione dei dati in sito mediante l'utilizzo della termocamera Flir P620 occorre elaborare le informazioni possedute al fine di visualizzare i risultati della prova.

Per ogni inquadratura delle diverse serie di termogrammi si hanno a disposizione sia i termogrammi IR che le foto digitali corrispondenti DC; i termogrammi presentano un'inquadratura meno ampia rispetto all'immagine digitale.

Al fine di riuscire a rilevare dall'immagine termografica la temperatura dei punti di interesse in modo esatto (nei termogrammi non sono visibili i segni a pennarello tracciati sulle strisce di carta) è stato necessario sovrapporre i termogrammi alla foto digitale corrispondente in modo tale che ciascuno di essi sia precisamente localizzato. Per svolgere tale operazione ogni coppia di termogramma ed immagine digitale sono stati importati in Microsoft PowerPoint e, manualmente, ridimensionati e sovrapposti.

Dapprima, sull'immagine digitale sono stati ricalcati i simboli tracciati con i pennarelli su ogni singola striscia di carta corrispondenti ai diversi livelli di quota; in particolare sono state indicate le quote di 1, 2, 3 e 3,5 m con segni orizzontali di colore, rispettivamente, rosso, blu, verde e giallo. Dopodiché tali simboli sono stati portati in primo piano sul termogramma.

Sono stati riportati in primo piano, infine, anche la corretta numerazione delle strisce di carta visibili all'interno del singolo termogramma ed il puntatore ottico, azionato dall'operatore, durante lo scatto del termogramma nella fase di acquisizione dati.

Effettuata tale operazione, per ogni termogramma acquisito, è possibile valutare puntualmente le informazioni in esso contenute, quali la localizzazione di ogni singola striscia di carta ed i diversi livelli di quota; tali informazioni sono necessarie, in seguito, per il rilievo delle temperature nei punti di interesse.

Nelle figure seguenti (Fig. 4.32-4.37) è mostrata la sovrapposizione termogrammi IR - immagini digitali DC di alcune inquadrature particolarmente significative delle diverse serie termografiche effettuate.

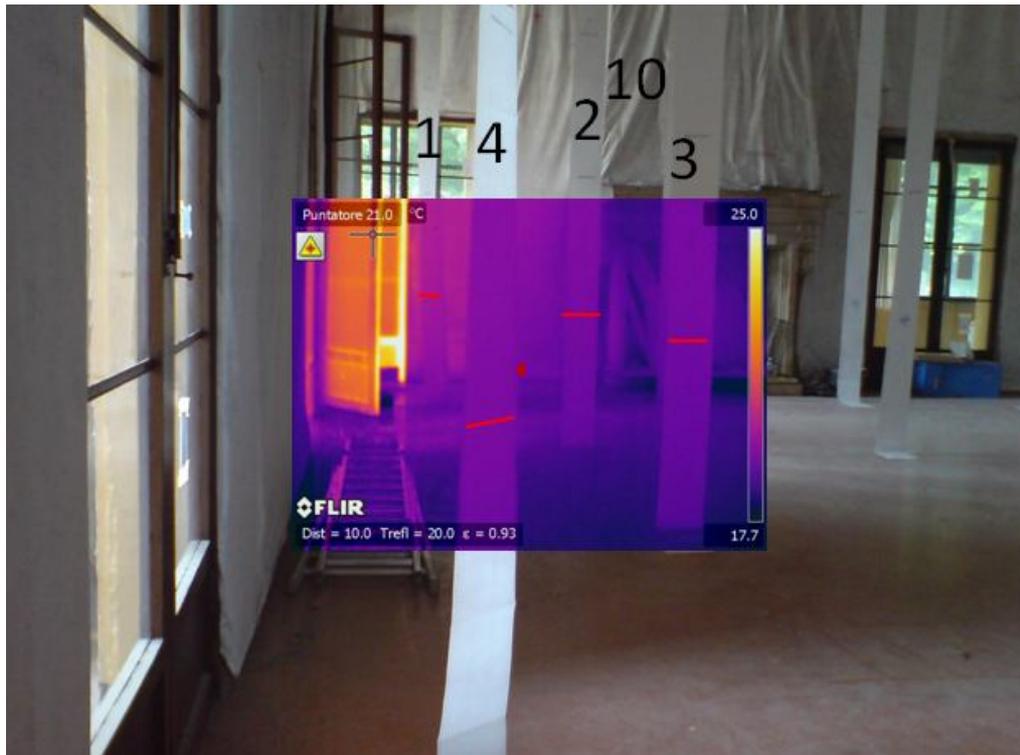


Figura 4.32: Sovrapposizione IR3480- DC3481, 1°serie a finestra aperta.

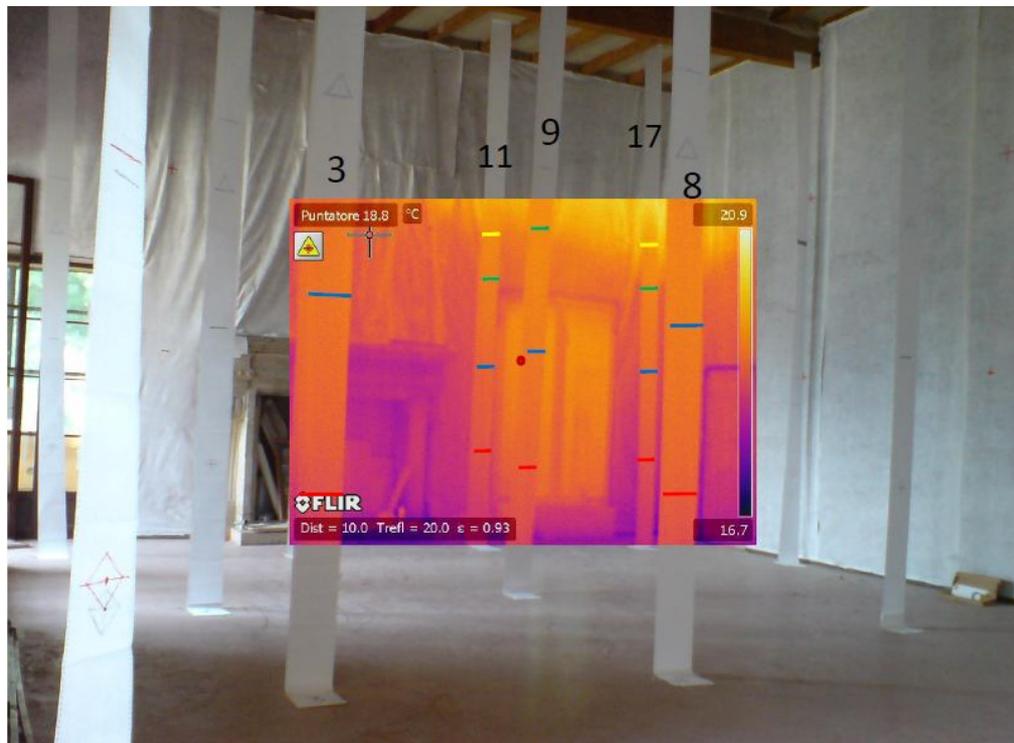


Figura 4.33: Sovrapposizione IR3492- DC3493, 1°serie a finestra aperta.

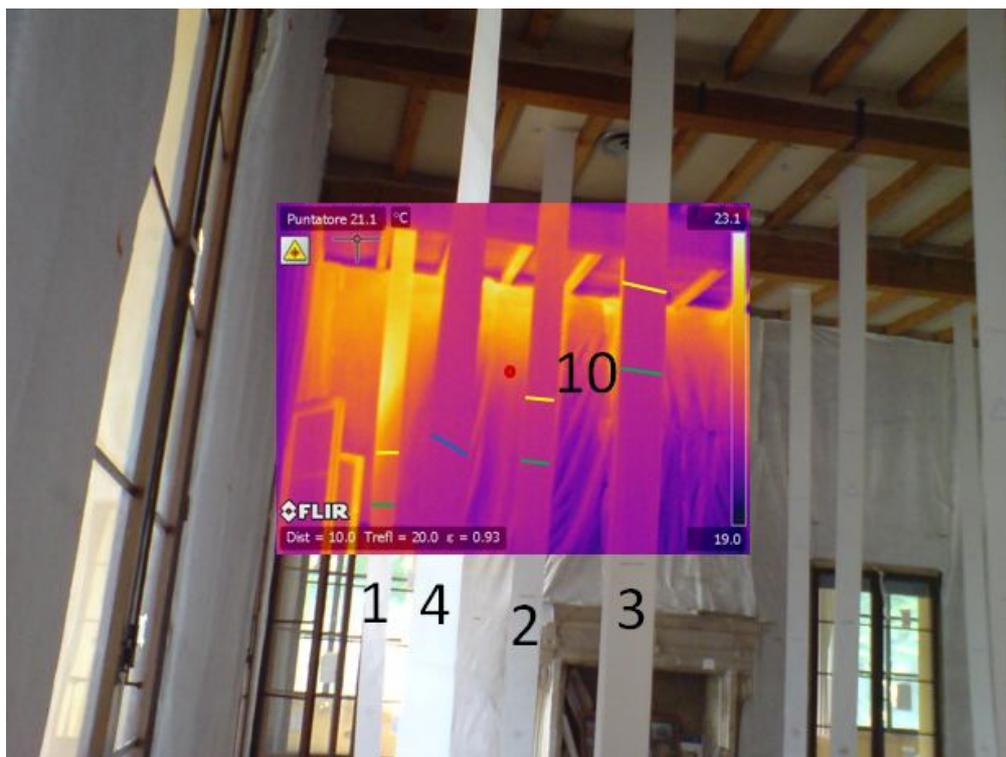


Figura 4.34: Sovrapposizione IR3570- DC3571, 3°serie a finestra aperta.



Figura 4.35: Sovrapposizione IR3582- DC3583, 3°serie a finestra aperta.



Figura 4.36: Sovrapposizione IR3630- DC3631, 4°serie a finestra aperta.

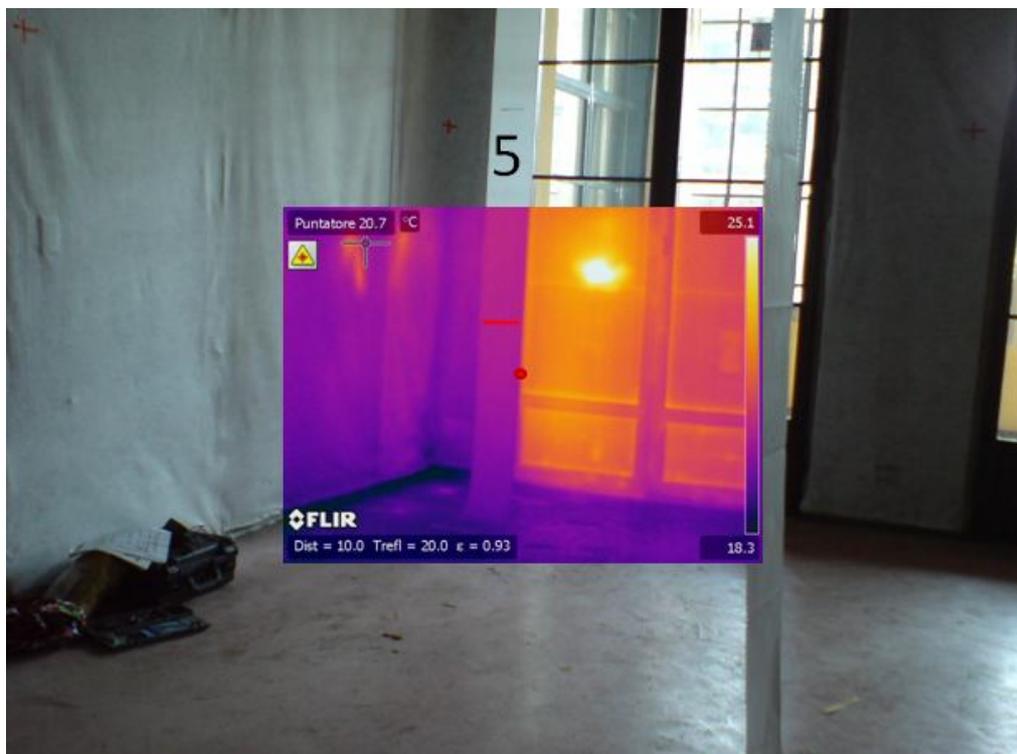


Figura 4.37: Sovrapposizione IR3646- DC3647, 4°serie a finestra aperta.

Successivamente alla sovrapposizione dei dati occorre rilevare, in ogni termogramma disponibile, la temperatura delle strisce di carta alle quote stabilite ai fini del monitoraggio dei moti convettivi. Per analizzare dunque le informazioni contenute all'interno dei termogrammi è stato installato ed utilizzato un software specifico per le analisi termografiche, FLIR Reporter 8.5; i termogrammi di ogni singola serie sono stati importati nel software ed analizzati.

Nello specifico, mediante il software, è possibile inserire dei puntatori sul termogramma per rilevare la temperatura del punto desiderato; affinché il valore di temperatura sia corretto e corrispondente alla realtà sono stati inseriti, per ogni puntatore introdotto, i valori di temperatura e di umidità relativa dell'aria corrispondenti alla serie in esame e la distanza esatta di ogni singola striscia di carta dall'obiettivo della termocamera.

Ad ogni puntatore è stata associata un'etichetta contenente il numero della striscia in esame, la quota verticale a cui esso è associato ed il valore di temperatura corrispondente.

I puntatori all'interno del termogramma sono stati introdotti facendo riferimento alla sovrapposizione IR-DC effettuata in Power Point in cui sono visibili, anche sul termogramma, i livelli di quota a cui rilevare le temperature: sono state rilevate le temperature di ogni striscia di carta a livello del pavimento, del soffitto e delle quote intermedie di 1, 2, 3 e 3,5 m; in particolare a livello del pavimento la temperatura è stata rilevata posizionando il puntatore sulla parte della striscia di carta fissata alle piastrelle mentre a livello del soffitto è stato posizionato il puntatore in corrispondenza dell'ultimo lembo della striscia ossia nel punto in cui la striscia di carta è fissata al soffitto mediante nastro adesivo.

L'intervallo di temperature inerenti ciascun termogramma è riportato in legenda, è valutato in automatico dal software; tuttavia è possibile, in modo manuale, impostare un intervallo di valori di temperatura differente.

Nelle figure seguenti è mostrato il rilievo delle temperature, per le varie quote di riferimento, su alcune strisce di carta; per una migliore comprensione della procedura sono riportati gli stessi termogrammi precedentemente mostrati nella fase di sovrapposizione IR-DC (Fig. 4.38-4.43).

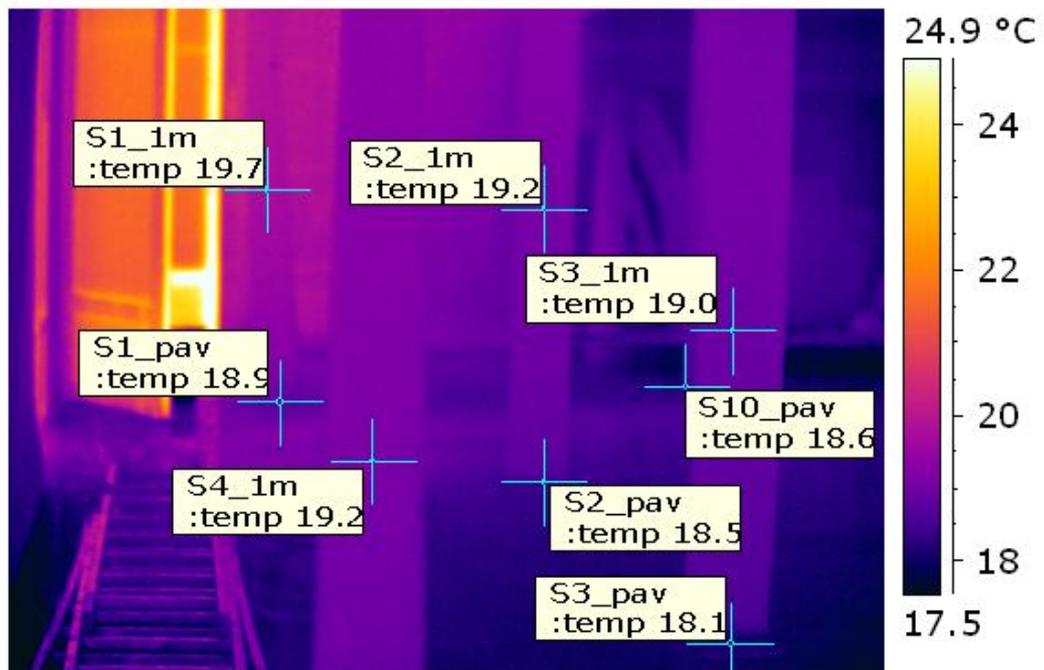


Figura 4.38: Rilievo delle temperature per il termogramma IR3480, 1°serie a finestra aperta.

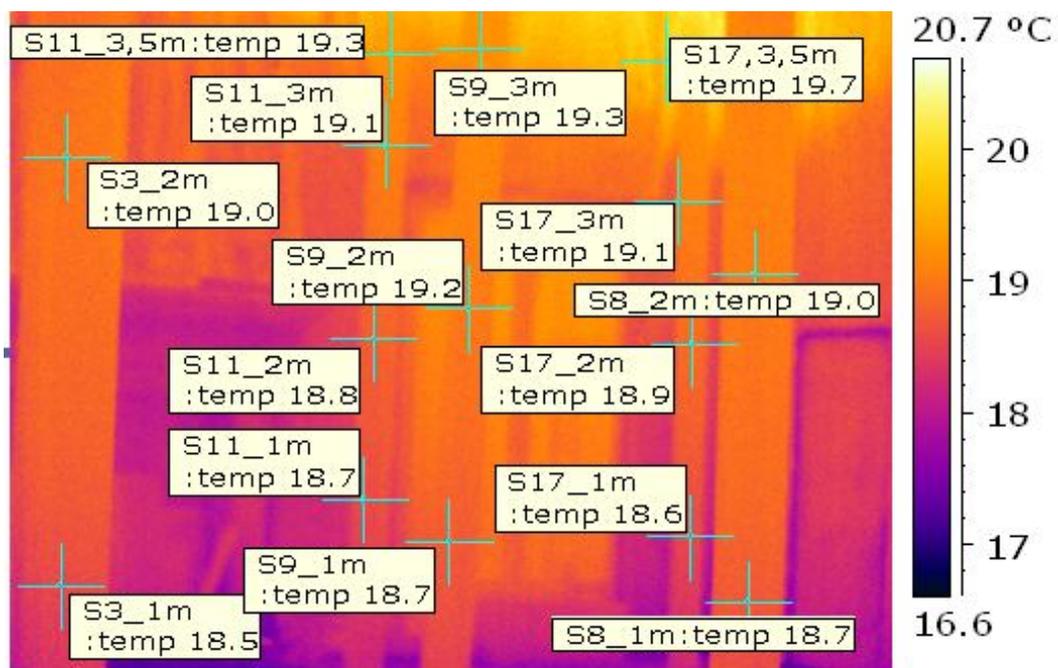


Figura 4.39: Rilievo delle temperature per il termogramma IR3492, 1°serie a finestra aperta.

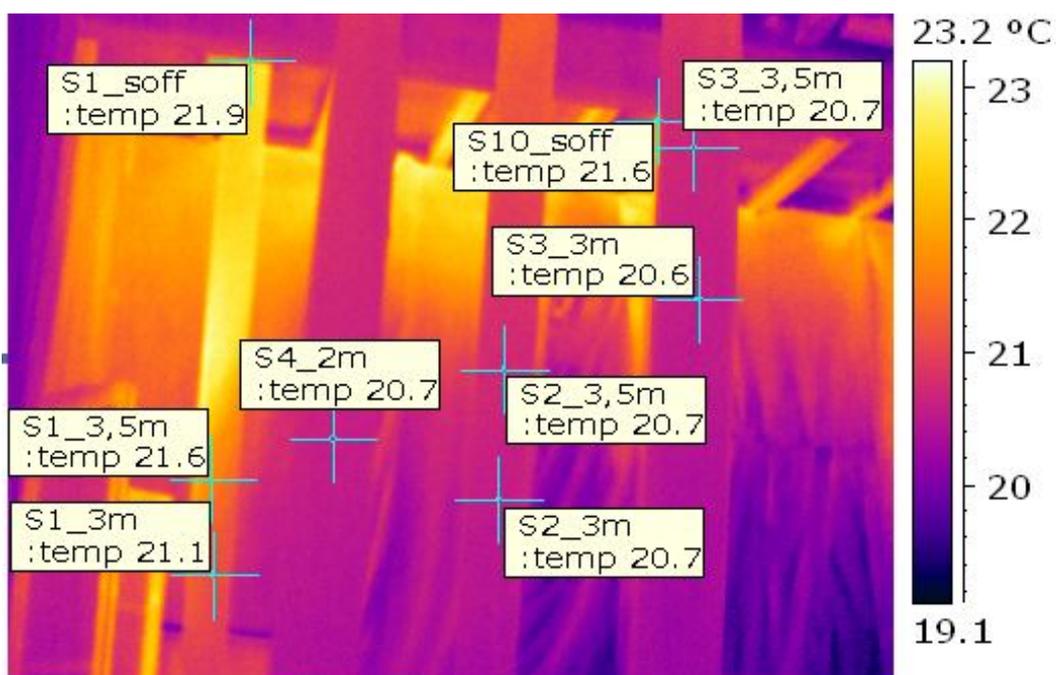


Figura 4.40: Rilievo delle temperature per il termogramma IR3570, 3°serie a finestra aperta.

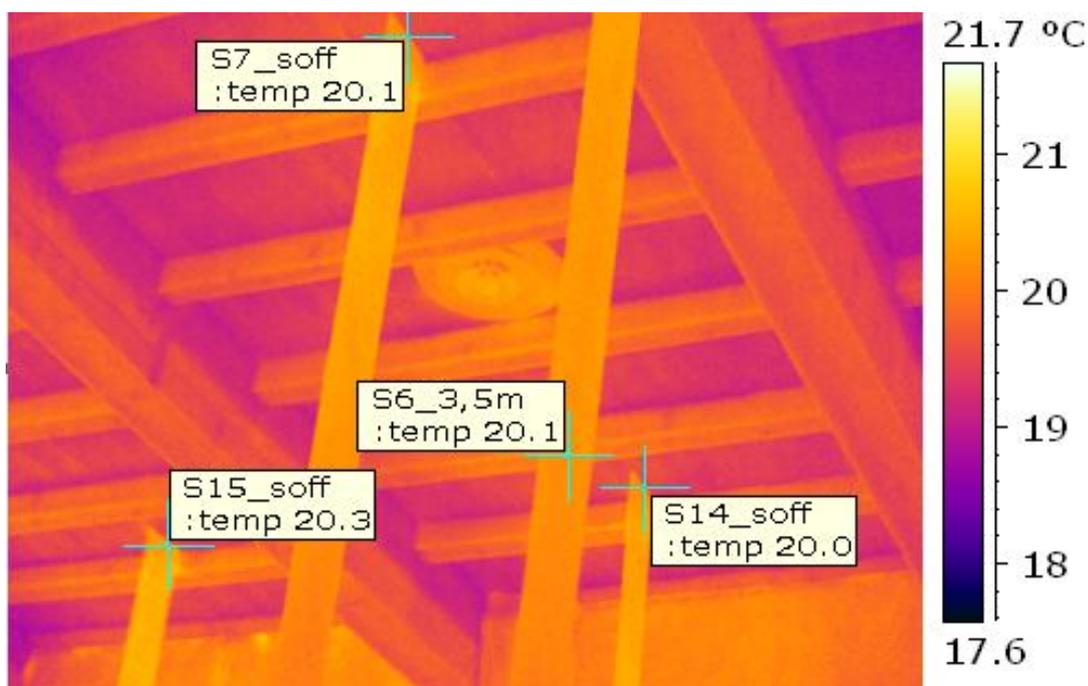


Figura 4.41: Rilievo delle temperature per il termogramma IR3582, 3°serie a finestra aperta.

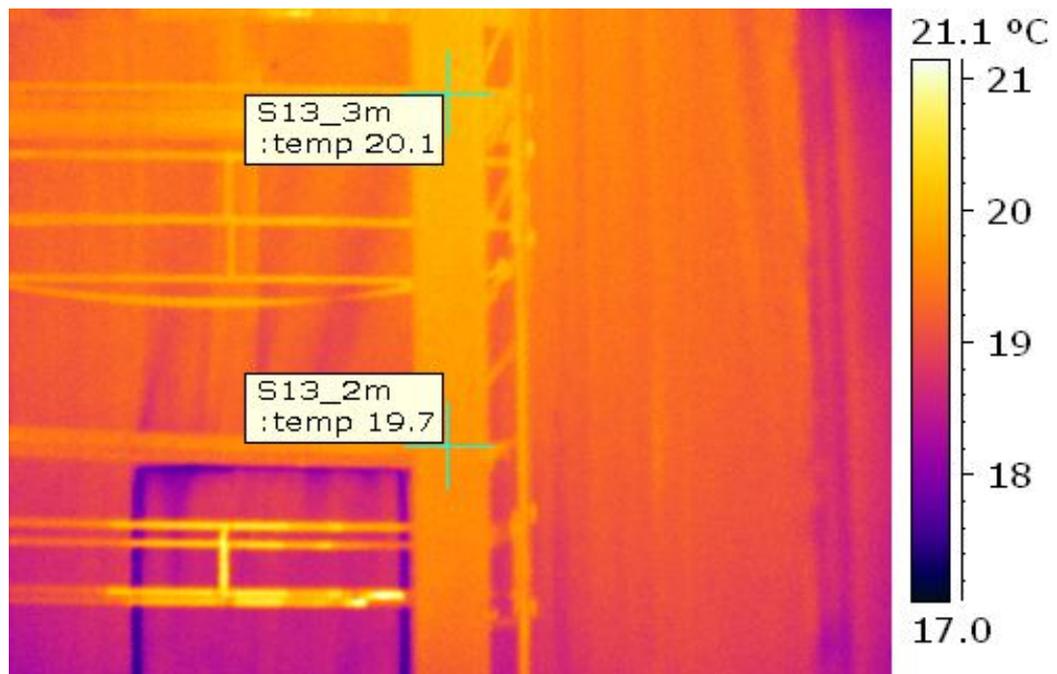


Figura 4.42: Rilievo delle temperature per il termogramma IR3630, 4°serie a finestra aperta.

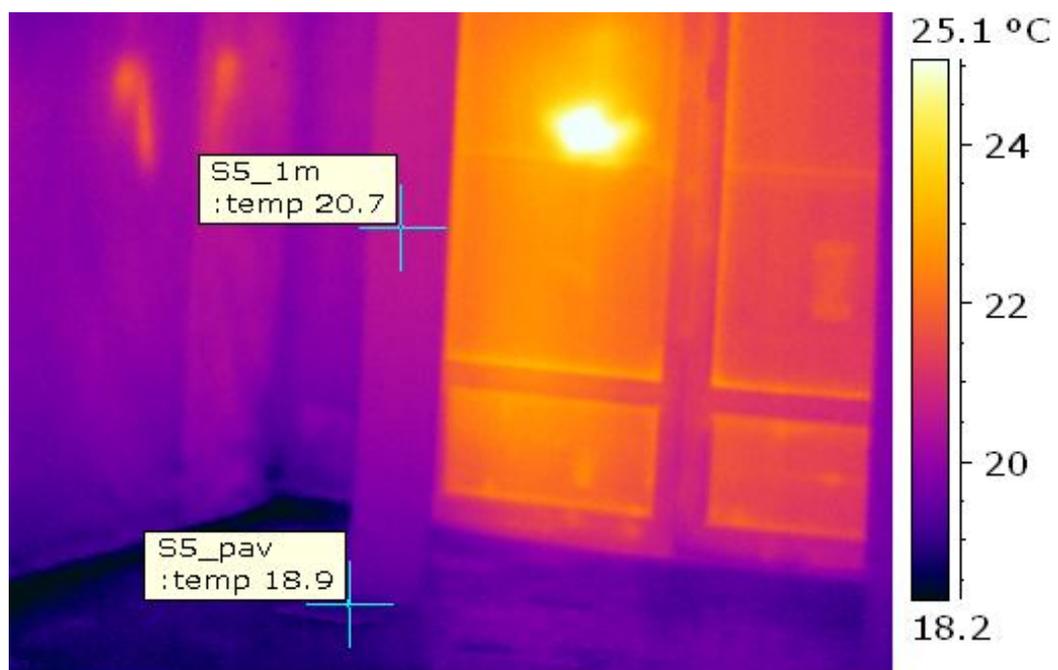


Figura 4.43: Rilievo delle temperature per il termogramma IR3446, 4°serie a finestra aperta.

Noto il valore di temperatura per ciascuna quota di riferimento di ogni striscia in ciascun termogramma disponibile, sono stati riportati tali valori in una tabella in Microsoft Excel (Tab. 4.8-4.9).

Alcune porzioni di strisce di carta sono state inquadrare all'interno di diversi termogrammi per cui si hanno, per il singolo punto, differenti valori di temperatura rilevate, in tal caso è stata effettuata una media aritmetica.

In tabella sono presenti spazi vuoti corrispondenti ai punti in cui non è stato possibile valutare la temperatura perché non inquadrati durante la serie termografica analizzata; nel rilievo della temperatura a livello del soffitto sono inoltre indicate le strisce di carta che non sono state fissate all'intonaco bensì alle travi o travetti di legno.

Nella tabella 4.8, nello specifico, sono riportati, per la 1° serie a finestra aperta, i valori di temperatura rilevati per ogni quota di riferimento ed il numero di IR-DC ad essi associato mentre nella tabella 4.9 è riportata la media aritmetica relativa a tali valori di temperatura.

Tabella 4.8: Temperature rilevate all'interno di ogni termogramma per la 1°serie a finestra aperta.

FINESTRA APERTA 1°SERIE				
STRISCI A	IR-DC	T_{pav}	IR-DC	T_{1m}
1	3480/81-3490/91	(18,9;18,8)	3480/81-3490/91	(19,7;19,8)
2	3480/81	18,5	3480/81-3490/91	(19,2;19)
3	3480/81-3482/83	(18,1;17,9)	3480/81-3482/83-3490/91- 3492/93	(19;18,8;19;18,5)
4	3478/79	18,6	3480/81	19,2
5				
6	3486/87	18,1	3486/87	18,8
7	3484/85-3486/87	(18;18)	3484/85	18,8
8	3482/83	18,1	3482/83-3492/93	(18,8;18,7)
9	3482/83	18,3	3482/83-3492/93	(18,9;18,7)
10	3480/81-3482/83	(18,6-18,3)	3490/91	18,8
11	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	(18,9;18,7)
12	3484/85	18	3484/85	18,8
13	3488/89	18	3488/89	18,7
14	3486/87	18		
15	3484/85	18,1	3484/85	18,8
16				
17	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	(18,6;18,6)

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	IR-DC	T3,5m	IR-DC	Tsoffitto
3490/91	20,1	3490/91	20,4			3498/99	20,9
3490/91	19,3			3498/99	19,6	3498/99	19,5
3490/91- 3492/93	(19,3;19)	3498/99	19,5	3498/99	19,6		
						3506/06(travetto)	19,4
						3504/05	19,2
						3504/05	19,6
3492/93	19			3500/01	19,7	3500/01	20,2
3492/93	19,2	3492/93	19,3			3500/01	20,1
3490/91	18,4					3498/99	21,5
3492/93	18,8	3492/93	19,1	3492/93	19,3	3500/01	20,5
		3496/97	19,1	3496/97	19,5	3502/03(trave)	19,3
						3500/01(trave)	19,9
3492/93	18,9	3492/93	19,1	3492/93	19,7	3500/01	20,1

Tabella 4.9: Media aritmetica delle temperature rilevate all'interno di ogni termogramma per la 1°serie a finestra aperta.

FINESTRA APERTA 1°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3480/81-3490/91	18,9	3480/81-3490/91	19,8
2	3480/81	18,5	3480/81-3490/91	19,1
3	3480/81-3482/83	18,0	3480/81-3482/83-3490/91-3492/93	18,8
4	3478/79	18,6	3480/81	19,2
5				
6	3486/87	18,1	3486/87	18,8
7	3484/85-3486/87	18,0	3484/85	18,8
8	3482/83	18,1	3482/83-3492/93	18,8
9	3482/83	18,3	3482/83-3492/93	18,8
10	3480/81-3482/83	18,5		
11	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	18,8
12	3484/85	18,0	3484/85	18,8
13	3488/89	18,0	3488/89	18,7
14	3486/87	18,0		
15	3484/85	18,1	3484/85	18,9
16				
17	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	18,6

T media

18,2

18,9

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	IR-DC	T3,5m	IR-DC	Tsoffitto
3490/91	20,1	3490/91	20,4			3498/99	20,9
3490/91	19,3			3498/99	19,6	3498/99	19,5
3490/91- 3492/93	19,2	3498/99	19,5	3498/99	19,6		
						3506/06(travetto)	19,4
						3504/05	19,2
						3504/05	19,6
3492/93	19,0			3500/01	19,7	3500/01	20,2
3492/93	19,2	3492/93	19,3			3500/01	20,1
						3498/99	21,5
3492/93	18,8	3492/93	19,1	3492/93	19,3	3500/01	20,5
		3496/97	19,1	3496/97	19,5	3502/03(trave)	19,3
						3500/01(trave)	19,9
3492/93	18,9	3492/93	19,1	3492/93	19,7	3500/01	20,1

T media	19,2	19,4	19,6	20,0
----------------	------	------	------	------

I valori di temperatura sono relativi alle quote di riferimento ossia alla temperatura a livello del pavimento, del soffitto e delle quote di 1, 2, 3 e 3,5 m; per ottenere un monitoraggio più completo della situazione sono stati ricavati anche i valori di temperatura riferiti alle quote di 4 e 5 m. Nello specifico è stato possibile valutare il valore di temperatura a tali quote intermedie mediante una proporzione aritmetica essendo noti i valori di temperatura delle altre quote di riferimento ricavati dal software. Utilizzando la proporzione aritmetica sono state, inoltre, calcolate le temperature associate ai livelli di riferimento che, talvolta, non sono stati inquadrati durante l'acquisizione delle serie termografiche e di cui non è stato possibile estrapolare la temperatura mediante l'utilizzo del software.

Nella tabella 4.10 è riportata, per la 1°serie a finestra aperta, sia la media aritmetica dei valori di temperatura rilevati per ogni quota di riferimento ed il numero di IR-DC ad essi associato sia i valori (in rosso) ricavati mediante proporzione aritmetica. Nell'*allegato A* sono riportate le tabelle contenenti i dati e le temperature di tutte le serie termografiche effettuate durante la fase di acquisizione dati; in particolare sono mostrate sia le tabelle inerenti le temperature delle quote di riferimento segnate sulle strisce di

carta (Tab. A1-A8) sia le temperature inerenti le pareti, gli angoli, il pavimento, il soffitto ed i pezzi di carta applicati sugli infissi del salone 1F9 (Tab. A9-A11).

Tabella 4.10: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma per la 1°serie a finestra aperta e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso).

FINESTRA APERTA 1°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	T _{pav}	IR-DC	T _{1m}
1	3480/81-3490/91	18,9	3480/81-3490/91	19,8
2	3480/81	18,5	3480/81-3490/91	19,1
3	3480/81-3482/83	18,0	3480/81-3482/83-3490/91-3492/93	18,8
4	3478/79	18,6	3480/81	19,2
5				
6	3486/87	18,1	3486/87	18,8
7	3484/85-3486/87	18,0	3484/85	18,8
8	3482/83	18,1	3482/83-3492/93	18,8
9	3482/83	18,3	3482/83-3492/93	18,8
10	3480/81-3482/83	18,5		19,0
11	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	18,8
12	3484/85	18,0	3484/85	18,8
13	3488/89	18,0	3488/89	18,7
14	3486/87	18,0		
15	3484/85	18,1	3484/85	18,9
16				
17	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	18,6

T media	18,2	18,9
----------------	------	------

IR-DC	T _{2m}	IR-DC	T _{3m}	T _{4m}	T _{5m}	IR-DC	T _{soffitto}
3490/91	20,1	3490/91	20,4	20,56	20,7	3498/99	20,9
3490/91	19,3		19,36	19,4	19,49	3498/99	19,5
3490/91-3492/93	19,2	3498/99	19,5				
	19,2		19,28	19,32	19,36	3506/06(travetto)	19,4
	18,9		18,96	19,04	19,12	3504/05	19,2
	19,0		19,12	19,28	19,44	3504/05	19,6
3492/93	19,0		19,3	19,7	19,9	3500/01	20,2
3492/93	19,2	3492/93	19,3	19,56	19,82	3500/01	20,1
	19,5		20	20,5	21	3498/99	21,5
3492/93	18,8	3492/93	19,1	19,6	20,1	3500/01	20,5
	18,9	3496/97	19,1	19,4	19,22	3502/03(trave)	19,3
						3500/01(trave)	19,9

3492/93	18,9	3492/93	19,1	19,7	19,9	3500/01	20,1
T media	19,2	19,4	19,6	19,8		20,0	

Per visualizzare, infine, i risultati ottenuti in forma bidimensionale e valutare i moti convettivi dell'area in esame, sono stati inseriti i valori di temperatura all'interno di Surfer 9, software specifico per la generazione di curve di livello (Fig. 4.44). In particolare sono state create sia delle mappe orizzontali sia verticali delle temperature presenti all'interno del salone 1F9 per ogni serie termografica effettuata.



Figura 4.44: Surfer 9, software utilizzato per la creazione delle mappe di temperatura.

Le sezioni orizzontali sono state create per ogni serie termografica e per ogni quota di riferimento a cui è stata rilevata la temperatura delle strisce di carta, ossia a livello del pavimento, del soffitto e delle quote intermedie di 1, 2, 3, 4 e 5 m. All'interno del software sono state inserite, mediante il file di input, le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone ed i valori di temperatura di ciascuna striscia di carta, alle diverse quote e per le diverse serie termografiche. Il software, mediante tali informazioni, crea le mappe delle temperature presenti all'interno del salone; nelle mappe orizzontali sono mostrate sia le curve di livello delle temperature sia le croci rappresentanti le 17 strisce di carta.

A titolo rappresentativo sono mostrati il file di input e la relativa mappa orizzontale, a livello del pavimento, per la 1°serie a finestra aperta (Tab. 4.11-Fig. 4.45); nell'*allegato B* sono riportati i file di input delle mappe orizzontali per tutte le serie termografiche.

Tabella 4.11: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	18,9
2	4,22	2,05	18,5
3	6,69	2,17	18,0
4	9,83	1,28	18,6
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,1
7	9,47	5,02	18,0
8	6,77	4,19	18,1
9	3,98	4,51	18,3
10	1,28	3,33	18,5
11	0,96	5,44	18,2
12	5,88	6,58	18,0
13	12,8	7,41	18,0
14	9,09	7,83	18,0
15	6,85	7,73	18,1
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	18,2

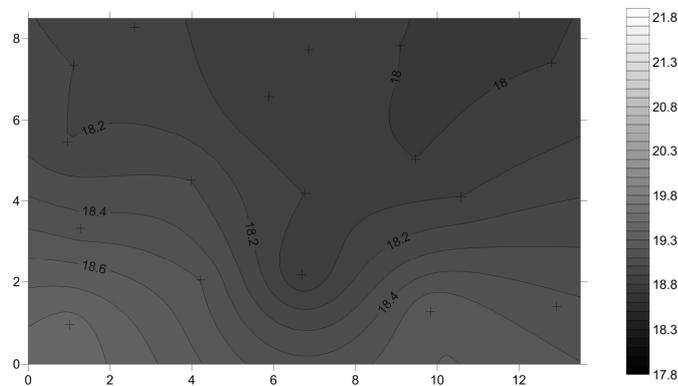


Figura 4.45: Mapa orizzontale a livello del pavimento per la 1° serie a finestra aperta.

Le sezioni verticali sono state create seguendo, non il reale posizionamento delle strisce di carta, ma una griglia di 25 punti, con passo pari a 2.55 m in direzione x e pari a 1.70 m in direzione y, che dista circa 90 cm dalle pareti del salone. Non essendo possibile leggere i valori di temperatura dalle strisce di carta, poiché i punti della maglia non corrispondono alla posizione delle strisce, i valori necessari sono stati rilevati dalle mappe orizzontali, precedentemente create, corrispondenti al livello ed alla serie in esame. In particolare sono state create in Surfer, per ogni serie termografica, 5 profili

verticali delle temperature corrispondenti alle sezioni A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F', G-G' ed H-H' (Fig. 4.46); le sezioni sono state posizionate in modo tale da monitorare il flusso delle temperature in entrambe le direzioni principali del salone 1F9 ed in tutti i punti significativi, ossia sia nelle vicinanze delle aperture e degli infissi che in zone d'ombra non a diretto contatto con l'irraggiamento solare.

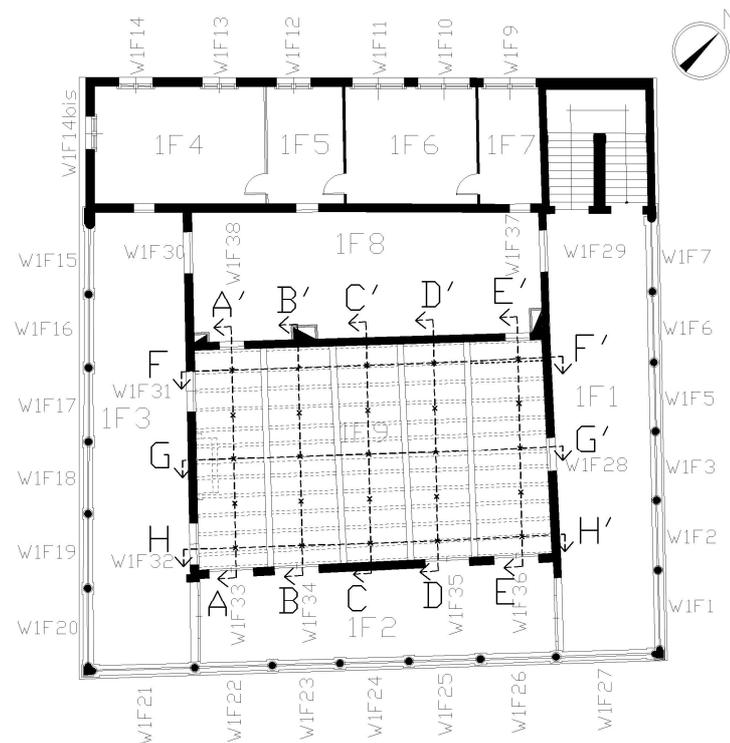


Figura 4.46: Griglia di 25 punti e rispettive sezioni utilizzate per creare i profili verticali della temperatura dell'aria nel salone 1F9.

Per ottenere tali profili verticali sono state inserite all'interno del software, mediante i file di input, le coordinate dei 25 punti costituenti la maglia delle sezioni orizzontali ed i valori di temperatura corrispondenti ad essi, alle diverse quote e per le diverse serie termografiche. Il software, mediante tali informazioni, crea le mappe delle temperature dell'aria presente nel salone in cui sono visibili sia le curve di livello delle temperature sia le croci rappresentanti i nodi della griglia ai vari livelli di riferimento ossia il pavimento, il soffitto e le quote intermedie a 1, 2, 3, 4 e 5 m.

A titolo dimostrativo sono mostrati sia il file di input sia la sezione verticale, da pavimento a soffitto, della sezione A-A' per la 1° serie a finestra aperta (Tab. 4.12-Fig. 4.47); nell'allegato B sono riportati i file di input delle mappe verticali per tutte le serie termografiche.

Tabella 4.12: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	18,9	5,96	3	19,3
2,51	0,05	18,6	7,68	3	19,1
4,23	0,05	18,4	0,79	4	20,5
5,96	0,05	18,2	2,51	4	20,5
7,68	0,05	18,2	4,23	4	20,1
0,79	1	19,7	5,96	4	19,7
2,51	1	19,2	7,68	4	19,7
4,23	1	18,9	0,79	5	20,6
5,96	1	18,8	2,51	5	20,8
7,68	1	18,7	4,23	5	20,6
0,79	2	20,1	5,96	5	20,1
2,51	2	19,7	7,68	5	19,9
4,23	2	19,3	0,79	6,05	20,8
5,96	2	18,9	2,51	6,05	21,2
7,68	2	18,9	4,23	6,05	21
0,79	3	20,3	5,96	6,05	20,4
2,51	3	20,1	7,68	6,05	20,1
		4,23	3		19,6

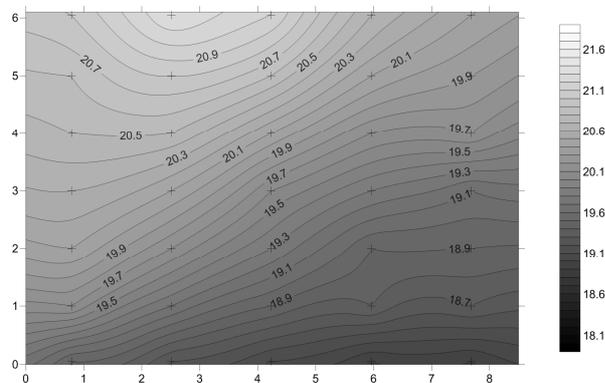


Figura 4.47: Sezione verticale A-A' per la 1°serie a finestra aperta.

Per ogni mappa creata all'interno del software Surfer 9 è possibile, in seguito, modificarne le proprietà mantenendo inalterati i contenuti precedentemente introdotti ossia è possibile, ad esempio, variare il range delle temperature, scegliere la tonalità e la trasparenza della mappa ed impostare il numero di valori di temperatura che si desidera mostrare sulle corrispettive curve di livello (Fig. 4.48-4.49).

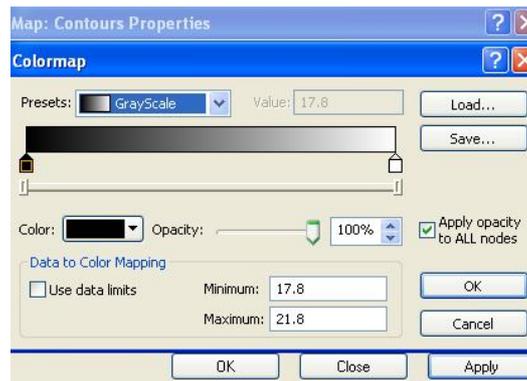


Figura 4.48: Impostazione della tonalità, della trasparenza del range di temperatura della mappa creata in Surfer 9.

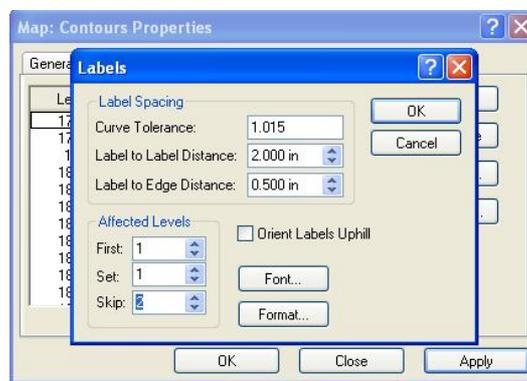


Figura 4.49: Impostazione delle temperature presenti nelle etichette delle curve di livello della mappa creata in Surfer 9.

4.7 Visualizzazione dei risultati ed osservazioni

I risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati sono stati organizzati, in fase di elaborazione, in mappe di temperatura per ciascuna serie di termogrammi acquisiti; di seguito sono riportate sia le sezioni orizzontali sia le sezioni verticali create nelle diverse fasi di raccolta delle informazioni.

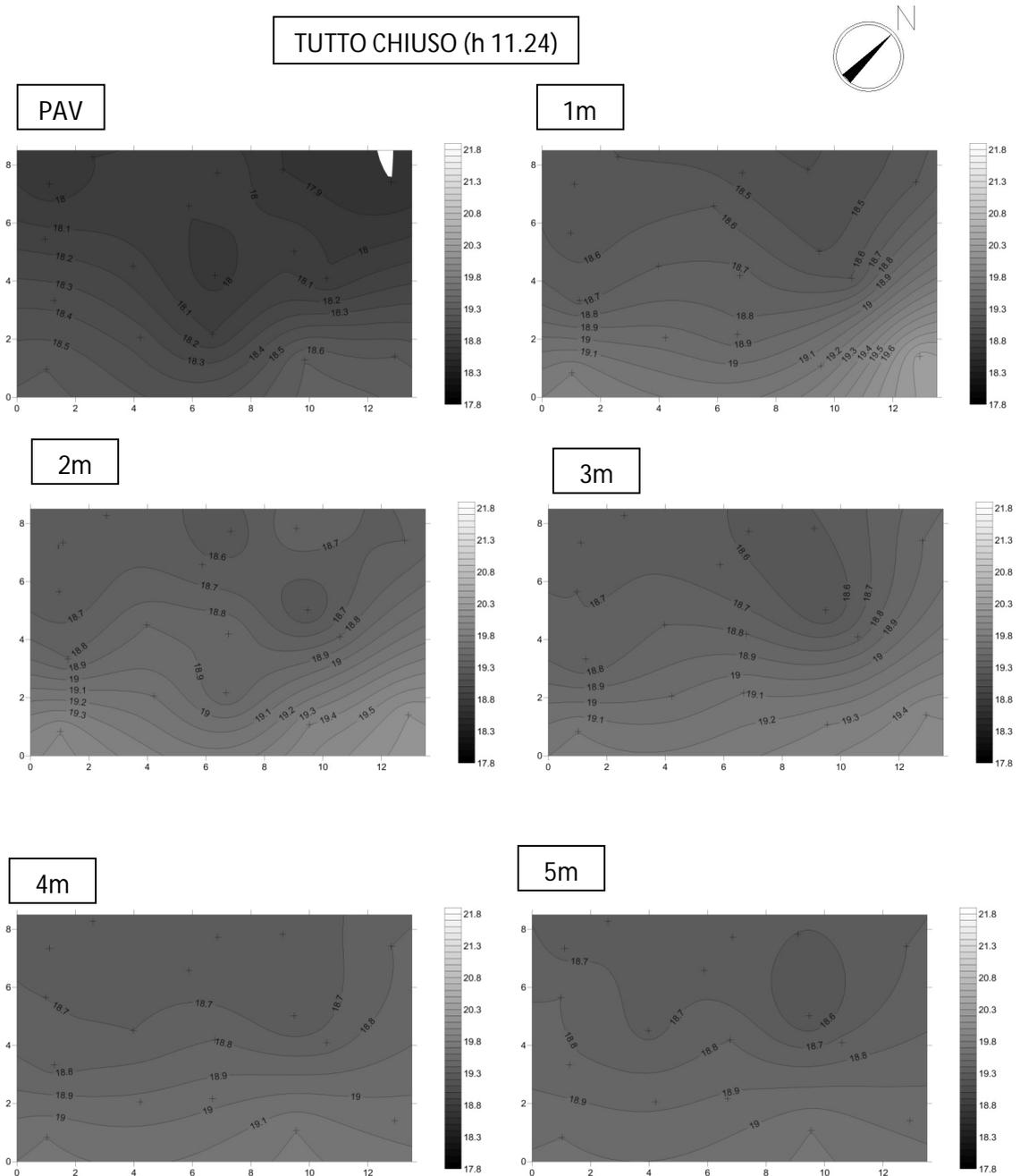
- SEZIONI OTTENUTE DAL MONITORAGGIO DI FLUSSI DI ARIA CALDA

Nella prima fase di analisi è stato messo in collegamento il salone 1F9 con il serbatoio di aria calda, ossia la loggia 1F2, e sono state effettuate cinque serie di termogrammi compresa la serie con le aperture ancora tutte chiuse e definita “misura zero”. Le mappe sono state create in modo tale che tutte e cinque le serie di tale fase avessero lo stesso range di temperatura, ossia il campo di temperatura è compreso tra

17.8-21.8 °C che sono i valori minimi e massimi rilevati in questa prima fase di acquisizione dei dati.

Sezioni orizzontali

Nella figura 4.50 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la serie di termografia effettuata con tutte le aperture del salone 1F9 chiuse.



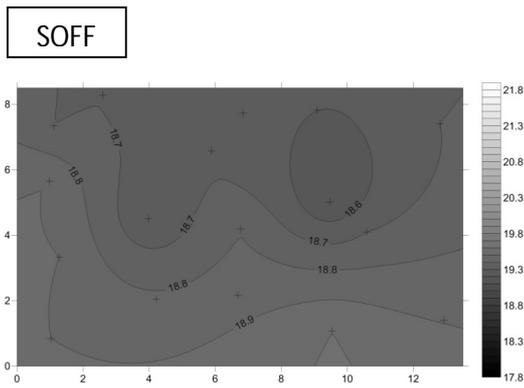
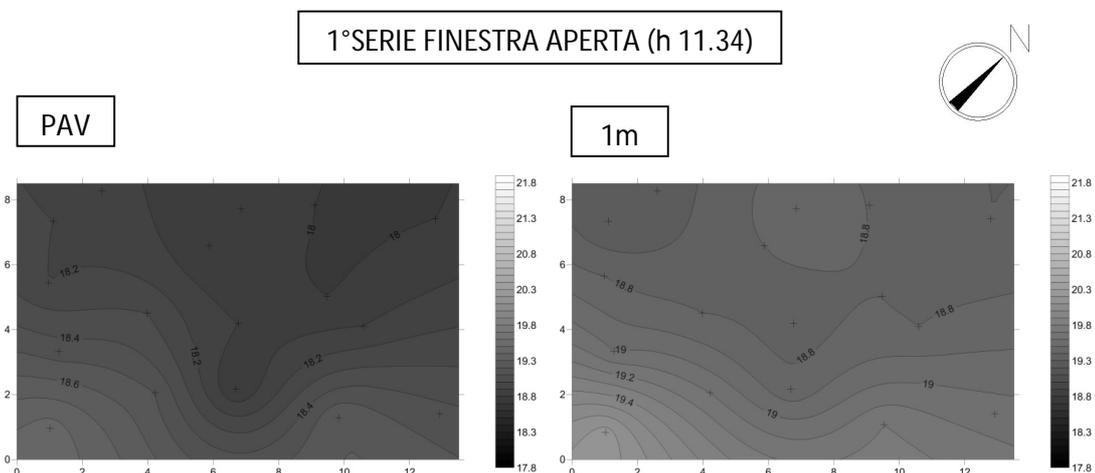


Figura 4.50: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della serie con tutte le aperture chiuse.

In tale serie è mostrata la distribuzione delle temperature all'interno del salone 1F9 in situazione di quiete ossia quando esso non è disturbato da eventuali flussi esterni di aria a differente temperatura. Il salone, in questa situazione, presenta una distribuzione di temperature piuttosto uniforme in quanto, tra il pavimento ed il soffitto, si ha al massimo un aumento di 1-2 °C; è chiaramente visibile che il lato del salone più caldo è quello a contatto con la loggia frontale 1F2, successivamente utilizzata come serbatoio di aria calda. Con esattezza il punto più caldo del salone è in corrispondenza della striscia 5, posizionata nell'angolo est, in cui si ha una temperatura pari a 20°C ad un'altezza di 1 m da terra ossia in corrispondenza dei vetri dell'infisso; il punto più freddo del salone è in corrispondenza della striscia 13, posizionata nell'angolo nord, a livello del pavimento.

Nella figura 4.51 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la 1° serie di termografia effettuata con il salone 1F9 in collegamento con la loggia 1F2, serbatoio di aria calda.



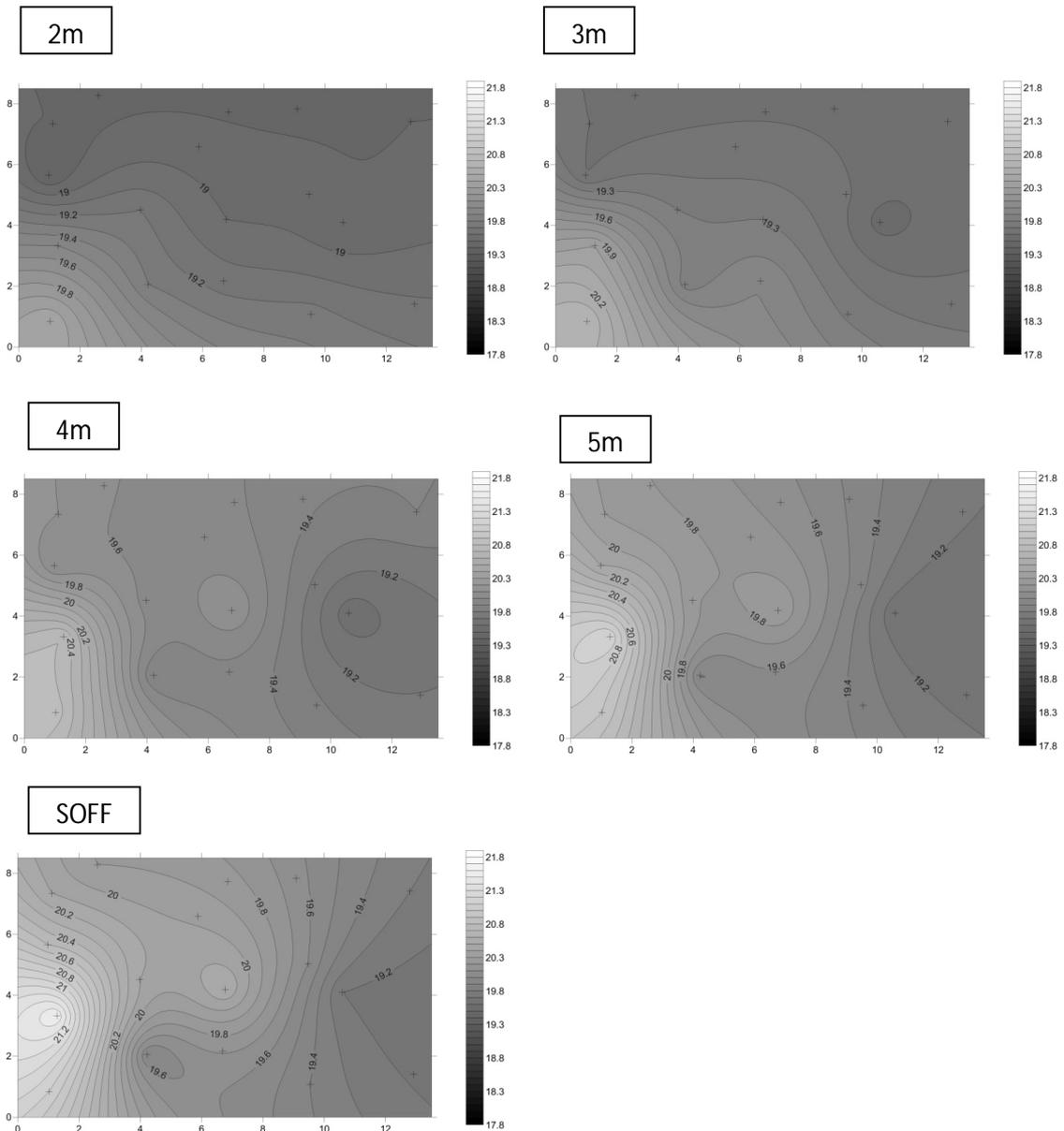
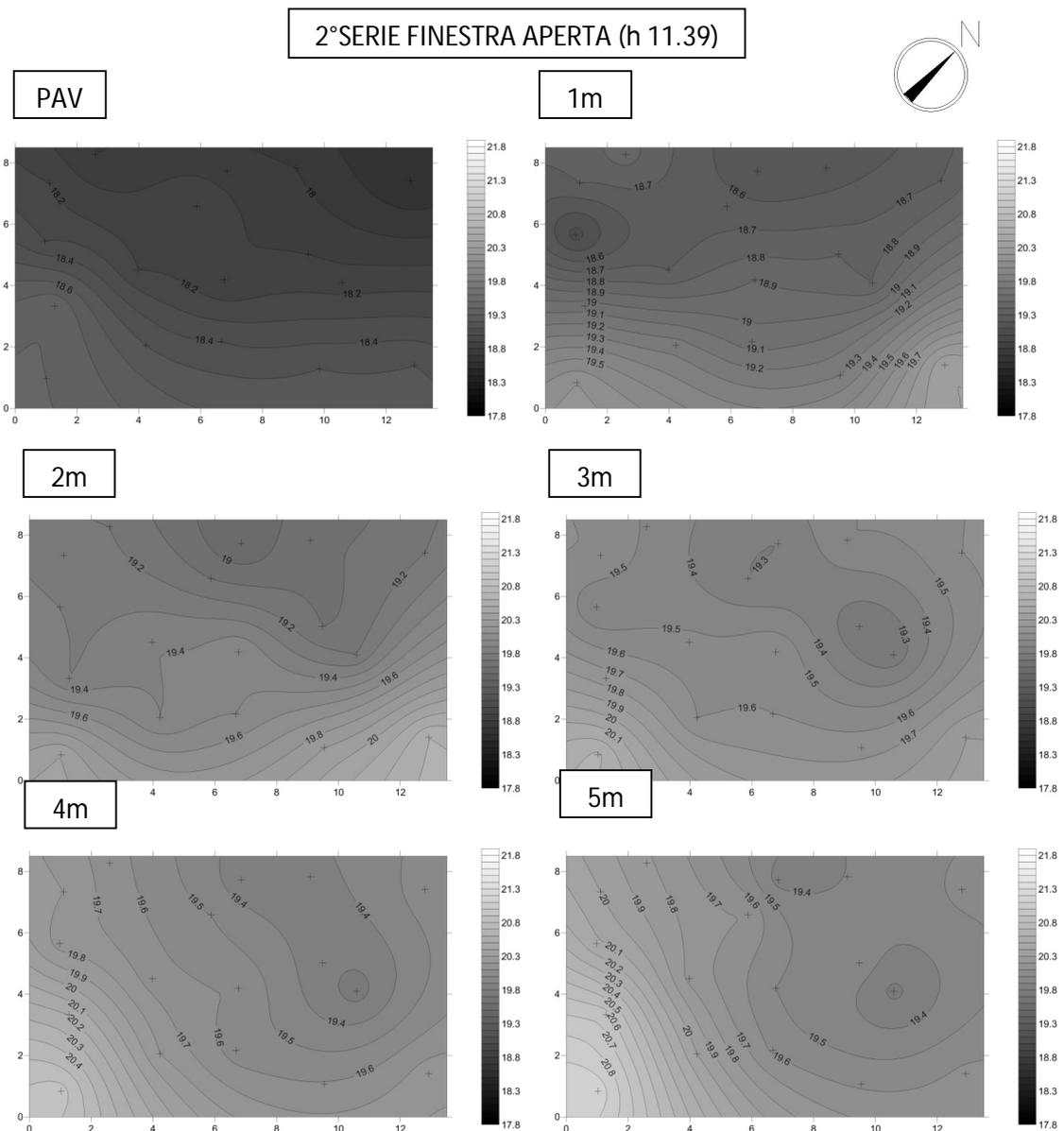


Figura 4.51: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della 1° serie con finestra aperta.

In tale serie è mostrata la distribuzione del flusso di aria calda, proveniente dalla loggia 1F2, nei primi minuti successivi all'apertura dell'infisso che collega il salone 1F9 alla loggia stessa. È visibile, in modo molto chiaro, come il calore si distribuisca verso il lato sud-ovest del salone e verso il soffitto; la porzione restante del salone sembra, in tale serie, non risentire ancora in modo consistente del flusso di calore proveniente dalla loggia 1F2. Tuttavia, in media sono aumentate tutte le temperature del salone comprese quelle dei punti più freddi ed, a differenza della serie precedente, vi è un maggiore gradiente termico tra il pavimento ed il soffitto. Con esattezza il punto più caldo del salone è in corrispondenza della striscia 10, posizionata vicino al lato sud-ovest davanti

l'infisso aperto, in cui si ha una temperatura di 21.5 °C a livello del soffitto; il punto più freddo del salone è in corrispondenza della striscia 13, situata nell'angolo nord, in cui si ha una temperatura di 19.2 °C. Rispetto alla serie precedente il punto più caldo del salone non corrisponde più al punto in cui si ha il massimo irraggiamento solare ma ad un punto investito dal massimo flusso di calore della loggia 1F2.

Nella figura 4.52 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la 2° serie di termografia effettuata con il salone 1F9 in collegamento con la loggia 1F2, serbatoio di aria calda.



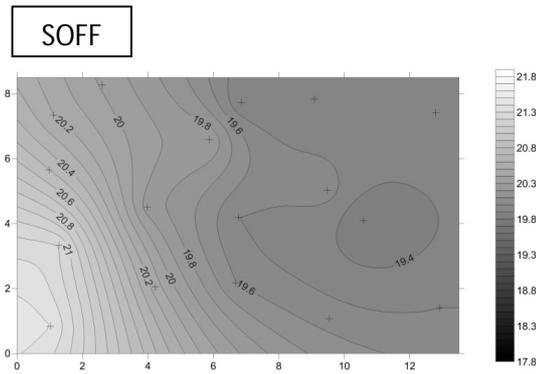
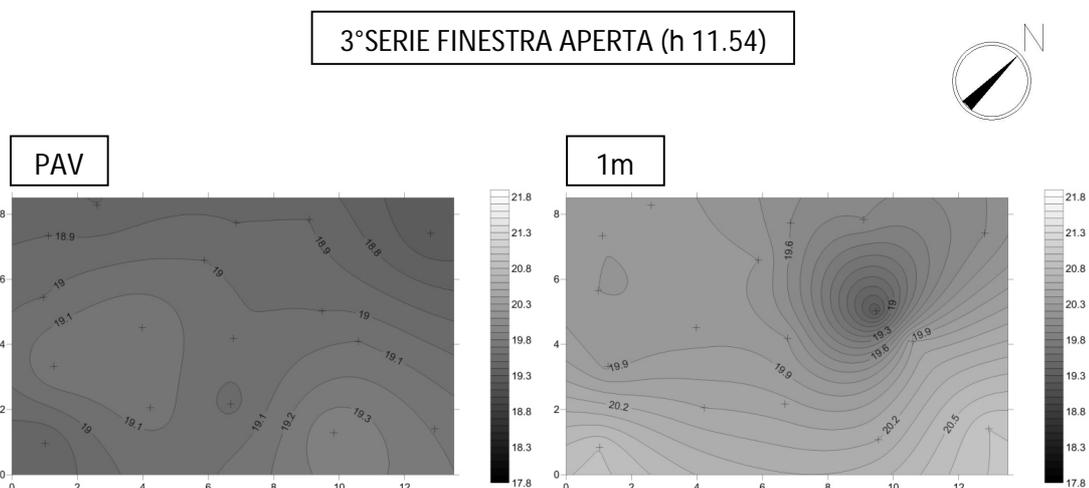


Figura 4.52: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della 2° serie con finestra aperta.

Tale serie è stata effettuata dopo 5 minuti dall'apertura dell'infisso che ha messo in collegamento il salone con il flusso di aria calda; è visibile come il flusso di calore che, nei primi minuti dopo l'apertura dell'infisso, si era distribuito in una zona ristretta del salone ora inizia ad espandersi ed, in particolare, investe anche la parete frontale sud-est. Non è presente una sostanziale differenza di temperatura con i valori rilevati nella serie precedente. Con esattezza il punto più caldo del salone è in corrispondenza della striscia 1, situata nell'angolo sud davanti l'infisso aperto, in cui si ha una temperatura di 21.3°C a livello del soffitto; il punto più freddo del salone si ha in corrispondenza della striscia 13, situata nell'angolo nord, in cui si ha una temperatura di 17.8°C a livello del pavimento.

Nella figura 4.53 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la 3° serie di termografia effettuata con il salone 1F9 in collegamento con la loggia 1F2, serbatoio di aria calda.



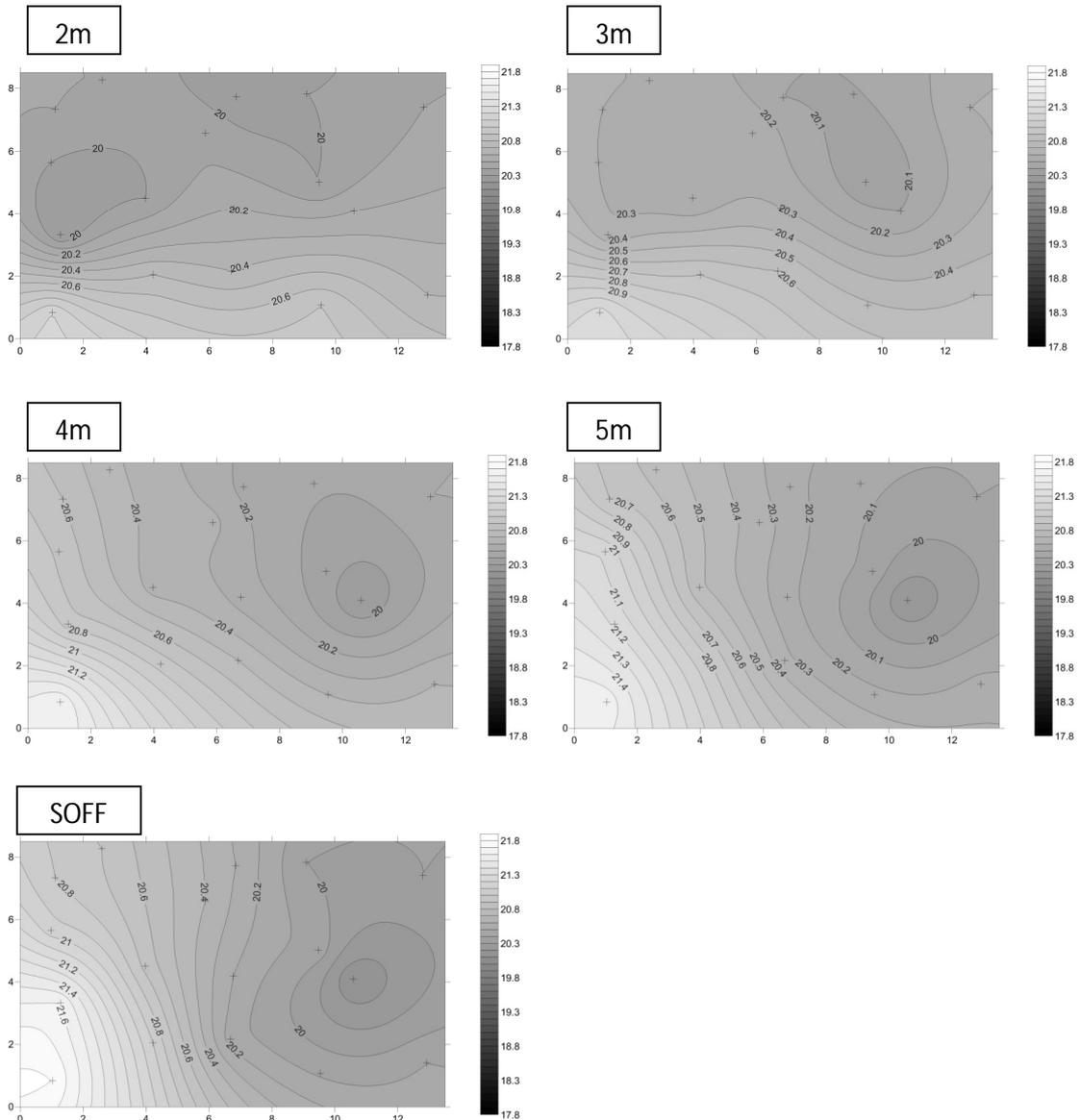
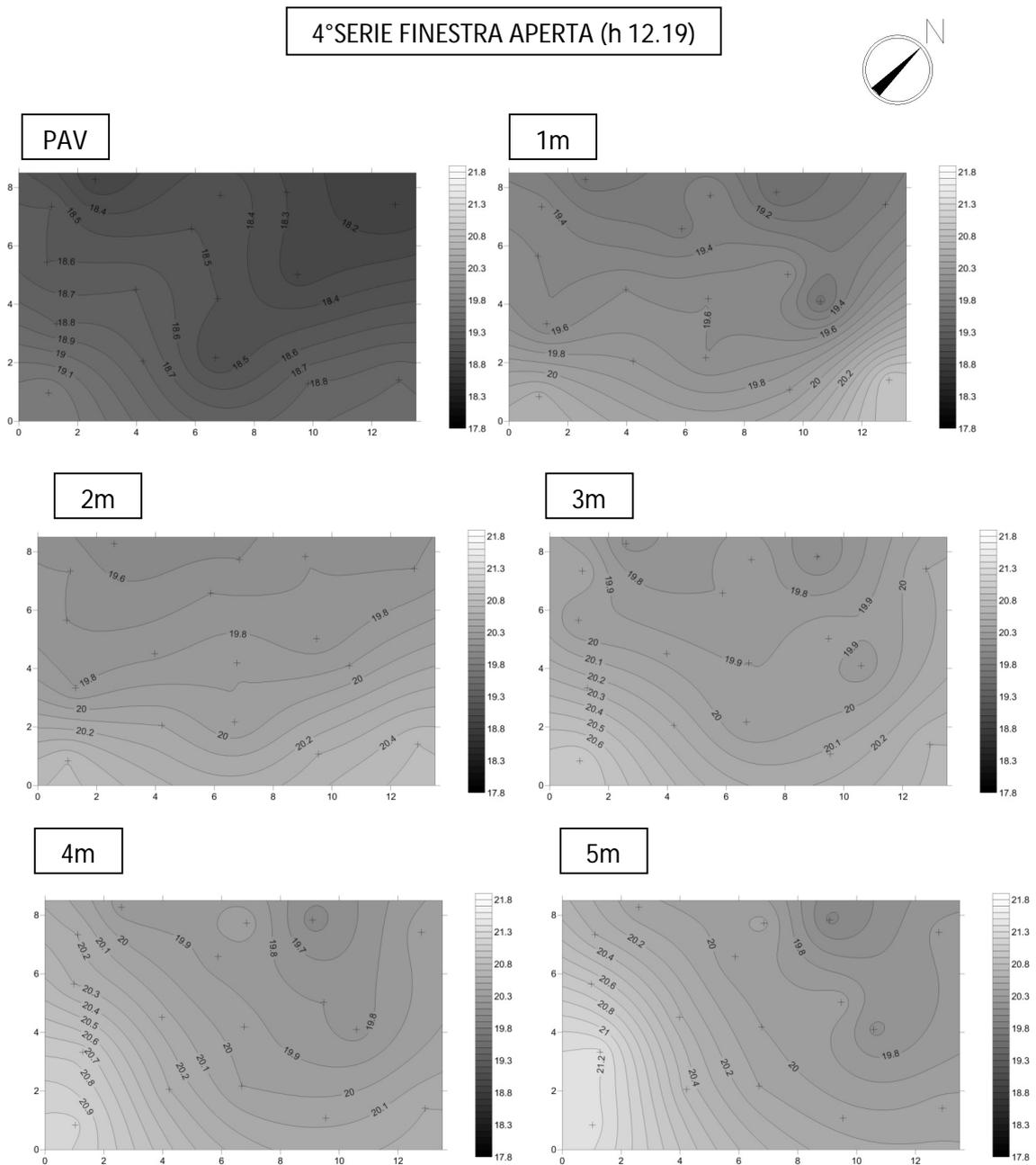


Figura 4.53: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della 3° serie con finestra aperta.

Nella 3° serie a finestra aperta sono passati circa 20 minuti dall'apertura dell'infisso ed è ben visibile come il flusso di calore si sia distribuito uniformemente in tutto il salone, investendo anche l'angolo più freddo situato a nord. Rispetto alla serie precedente le temperature, in tutti i punti, risultano maggiori ed inoltre vi è un minor gradiente termico tra il pavimento ed il soffitto; tale fenomeno può essere correlato al fatto che il flusso di calore, nei primi minuti, si è spostato globalmente verso il soffitto del salone ma, con il passare del tempo, ha iniziato a scendere ed investire anche i livelli di quota inferiore. Con esattezza il punto più caldo del salone è sempre in corrispondenza della striscia 1 in cui si ha la temperatura di 21,8°C a livello del soffitto,

il punto più freddo del salone è sempre in corrispondenza della striscia 13 in cui si ha la temperatura di 18,6°C a livello del pavimento. A livello di un metro si nota, inoltre, un punto isolato del salone più freddo rispetto all'area circostante e probabilmente non colto dal flusso di aria calda.

Nella figura 4.54 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la 4° serie di termografia effettuata con il salone 1F9 in collegamento con la loggia 1F2, serbatoio di aria calda.



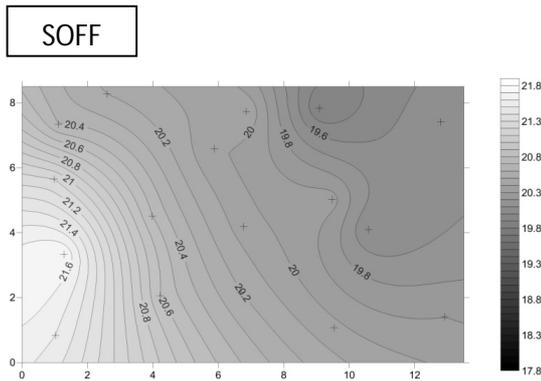


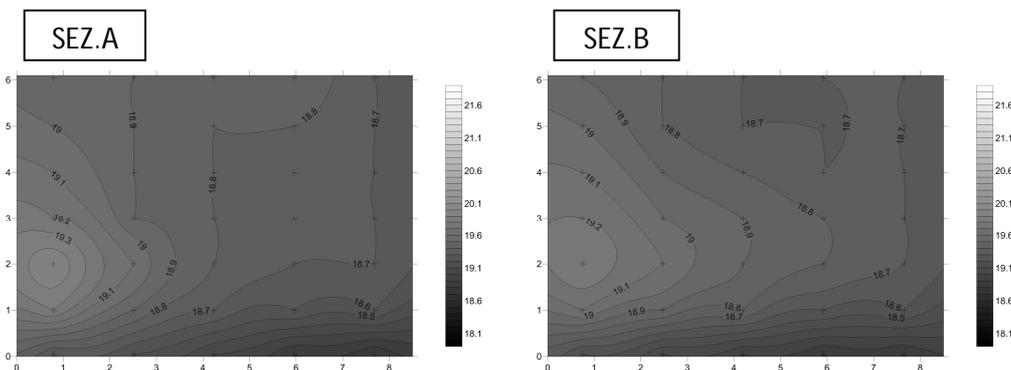
Figura 4.54: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della 4° serie con finestra aperta.

In quest'ultima serie effettuata a finestra aperta, dopo quasi un'ora dall'apertura dell'inferno, il flusso di calore è ben distribuito all'interno del salone ed inoltre si è ben omogeneizzato con l'aria più fredda presente all'interno di esso prima dell'apertura del collegamento con la loggia frontale. Tutte le temperature, infatti, sono in media minori rispetto alle temperature della serie precedente e l'ambiente appare globalmente raffreddato. Con esattezza il punto più caldo del salone è sempre in corrispondenza della striscia 1 in cui si ha una temperatura pari a 21.8°C a livello del soffitto, il punto più freddo si ha in corrispondenza della striscia 13 in cui si ha 18.1 °C a livello del pavimento.

Sezioni verticali

Nella figura 4.55 sono riportate le mappe verticali di temperatura, per ogni sezione di riferimento, per la serie di termografia effettuata con tutte le aperture del salone 1F9 chiuse.

TUTTO CHIUSO (h 11.24)



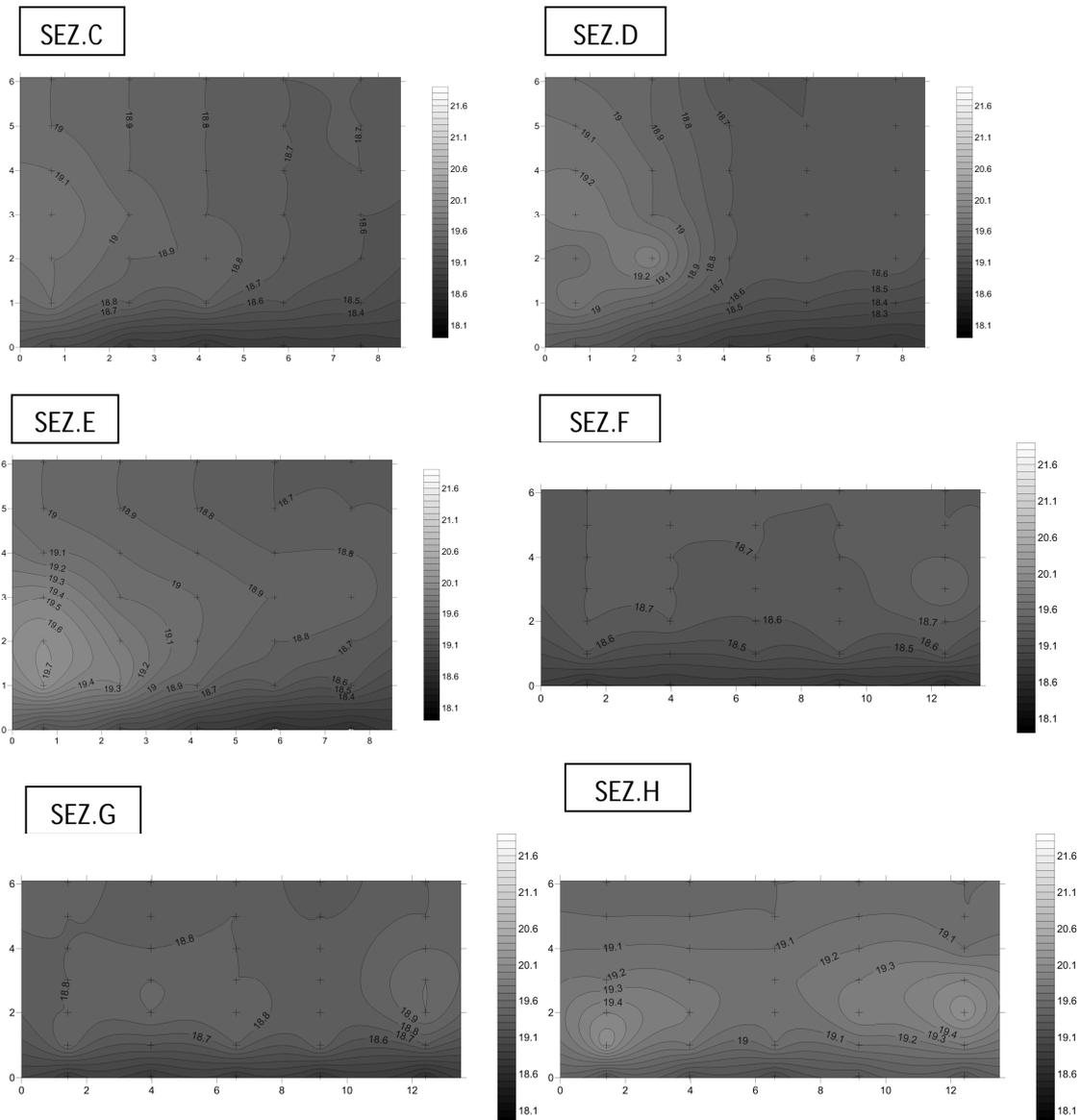


Figura 4.55: Mappe verticali delle temperature del salone 1F9 della serie con tutte le aperture chiuse.

In tale serie, in cui tutte le aperture del salone sono chiuse, le sezioni verticali rendono visiva, in modo diretto, la situazione termica del salone in condizioni normali. Si noti come le sezioni A, B, D ed E, situate dinanzi gli infissi che collegano il salone con la loggia frontale, presentano inizialmente un flusso di calore maggiore, rispetto alle zone circostanti, dovuto all'irraggiamento dei raggi solari tramite i vetri degli infissi. Il picco del flusso di calore è, in media, ad un'altezza di 1-2 metri dal pavimento. Al contrario, la sezione C, che non si trova in corrispondenza di un infisso ma del maschio murario, risente del flusso di calore proveniente dalla loggia adiacente ma in modo meno diretto e significativo rispetto alle altre sezioni (Fig. 4.56). Confrontando, inoltre le sezioni F, G ed H, si nota come la temperatura della parete situata a nord-ovest sia, ad

ogni quota, più fredda rispetto alla parete situata a sud-est ossia adiacente alla loggia frontale.

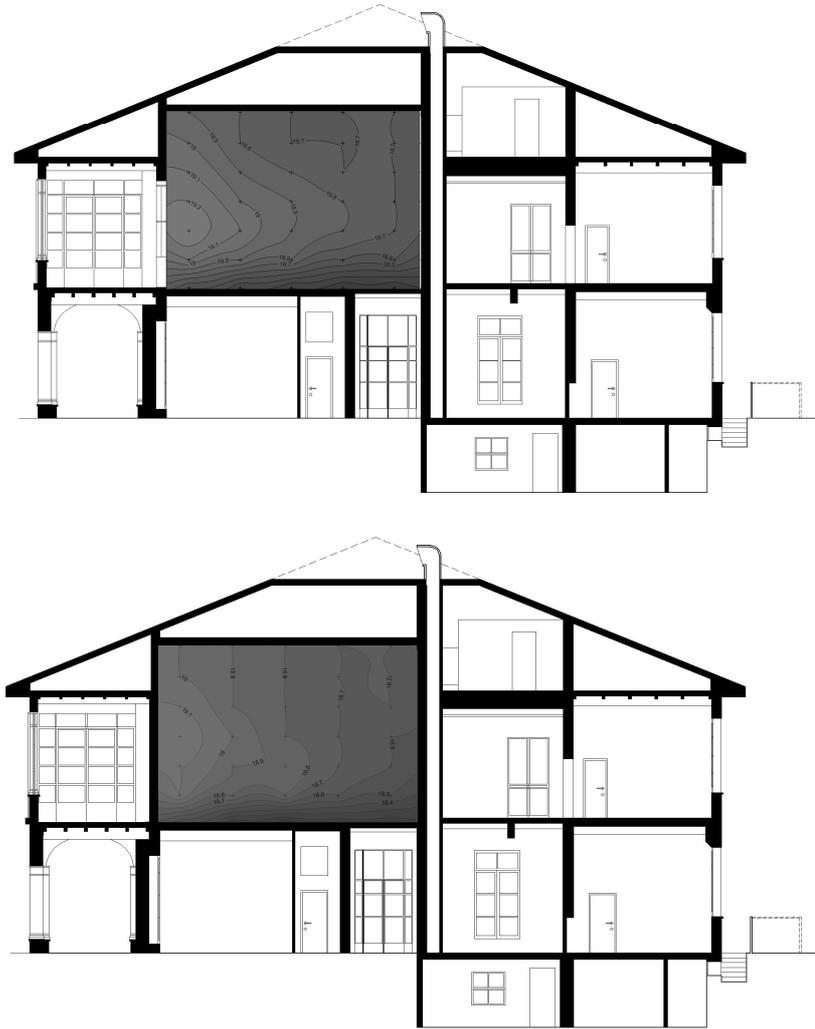


Figura 4.56: Confronto tra le mappe verticali delle temperature della sezione B, in cui è presente un infisso, e la sezione C in cui si ha la parete piena.

Nella visualizzazione della 1°serie a finestra aperta (Fig. 4.57) è molto chiaro, in modo migliore rispetto alle mappe orizzontali, il percorso del flusso di calore proveniente dalla loggia 1F2 nei primi minuti successivi all'apertura. È ben visibile come il flusso di calore si sposti tutto verso l'alto e verso la parete sud-ovest del salone. Rispetto alla serie precedente, in cui il salone era isolato dalle sale adiacenti, le temperature complessive dell'ambiente sono aumentate; l'aumento delle temperature risulta essere più consistente nelle zone del salone invase dal flusso di aria calda. In particolare si nota come il flusso di calore colpisca maggiormente la zona adiacente all'infisso aperto infatti le sezioni A, B, C presentano delle temperature maggiori e più uniformi mentre le sezioni D ed E presentano una zona concentrata di calore in

corrispondenza degli infissi, così come era visibile nella serie con tutte le aperture chiuse.

1° SERIE FINESTRA APERTA (h 11.34)

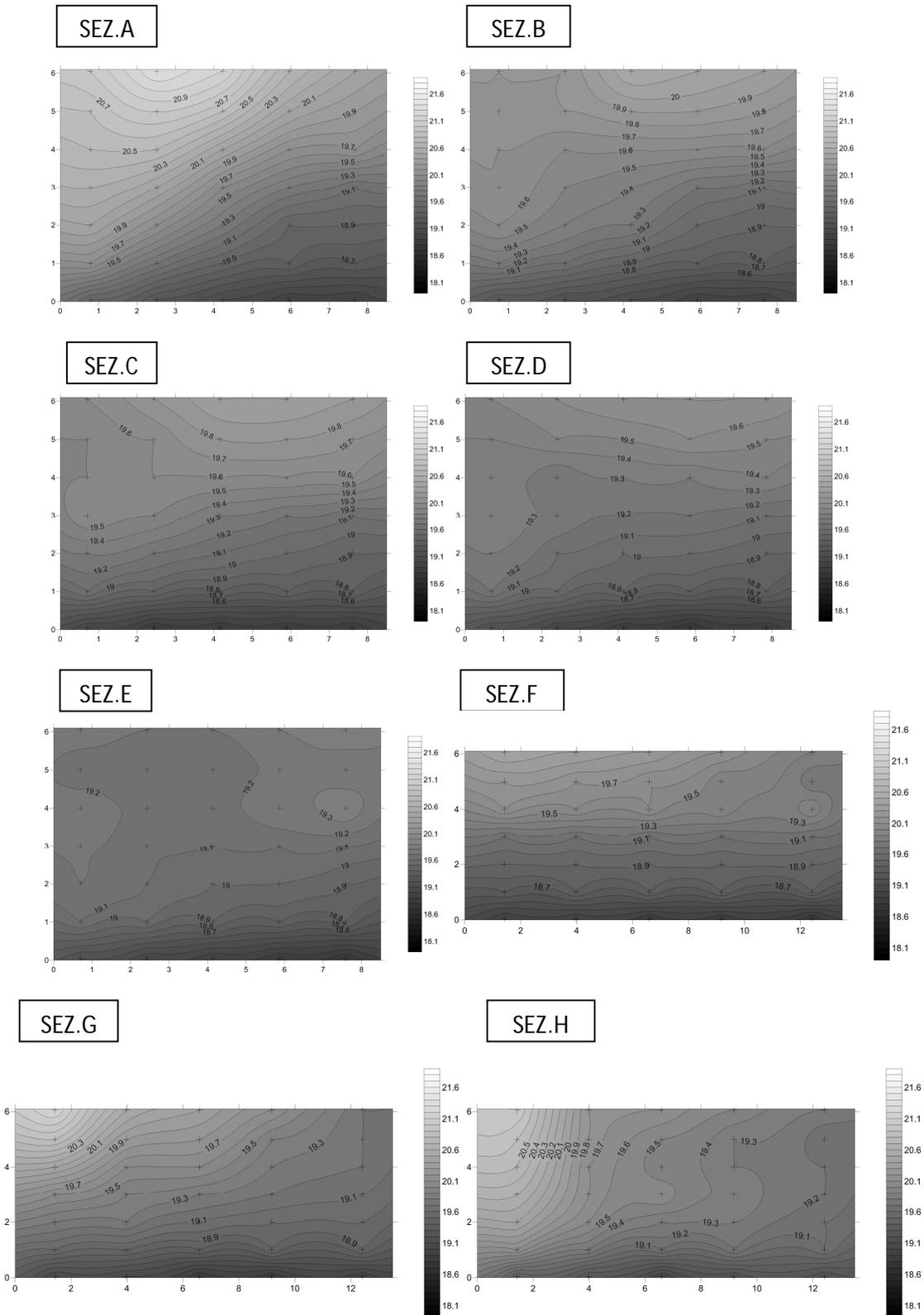
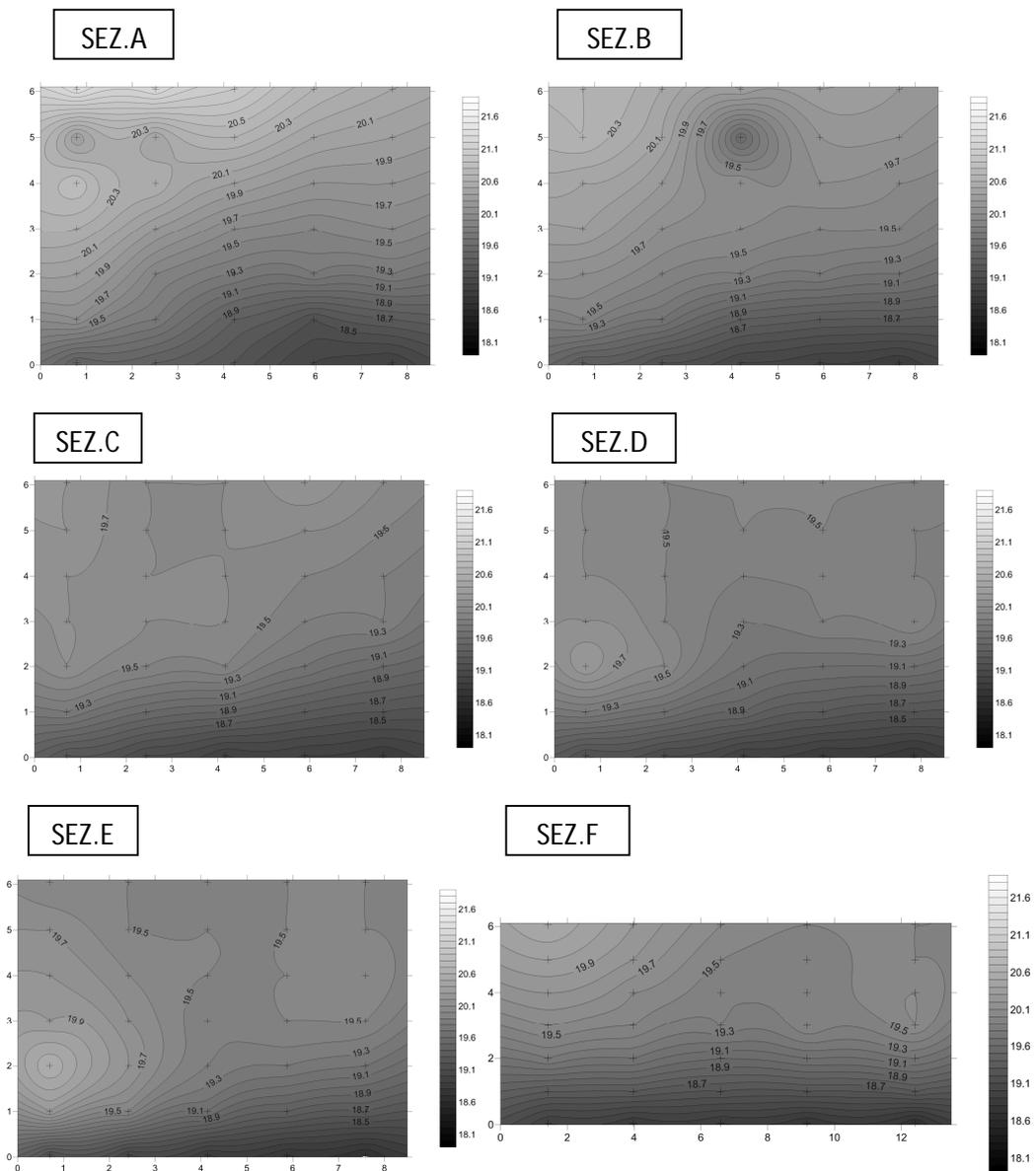


Figura 4.57: Mappe verticali delle temperature del salone 1F9 della 1° serie con la finestra aperta.

La 2° serie a finestra aperta (Fig. 4.58), effettuata dopo 5 minuti dall'apertura dell'infilso, mostra come il flusso di calore inizi a distribuirsi in più punti del salone e non rimanga concentrato nella zona adiacente l'infilso aperto come era visibile nella serie precedente. Si assiste ad un aumento globale delle temperature all'interno del salone anche alle quote inferiori al soffitto. In particolare nella sezione B, alla quota di 5 m ed in mezzeria del salone, un punto freddo in cui non è arrivato il flusso di calore della loggia.

2°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.39)



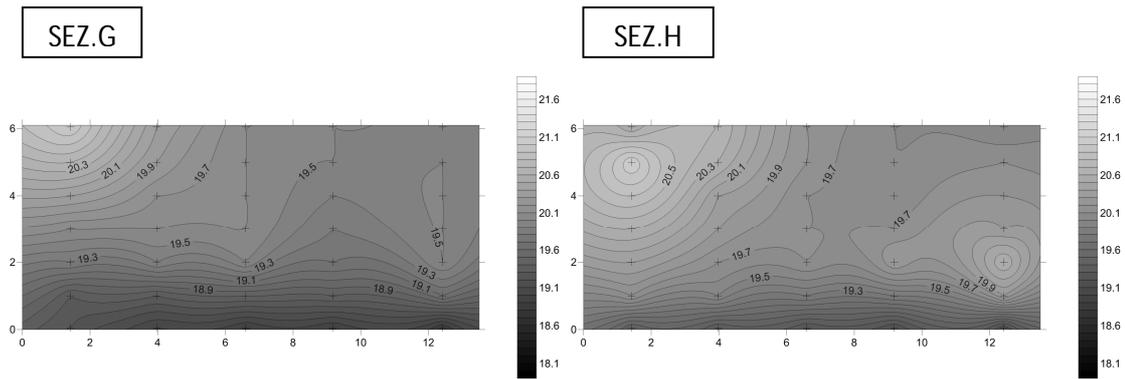
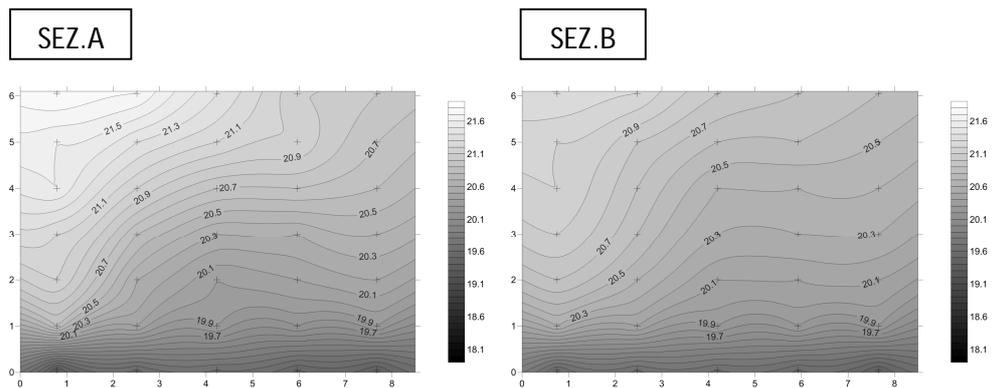


Figura 4.58: Mappe verticali delle temperature del salone 1F9 della 2° serie con la finestra aperta.

Nella 3° serie a finestra aperta, effettuata dopo circa 20 minuti dall'apertura dell'infilso (Fig. 4.59), è visibile come il flusso si sia distribuito ormai in ogni punto del salone arrivando anche alle quote inferiori. In particolare, mediante tali mappe verticali, è visibile l'andamento di discesa del flusso di aria calda dall'alto verso il basso; analizzando infatti la sezione A è molto rilevante il fatto che l'aria calda scenda in modo molto più veloce vicino alle pareti piuttosto che al centro del salone dando luogo ad una campana di calore che si avvicina, lentamente, al pavimento, rimasto ancora freddo rispetto all'ambiente.

3°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.54)



4°SERIE FINESTRA APERTA (h 12.19)

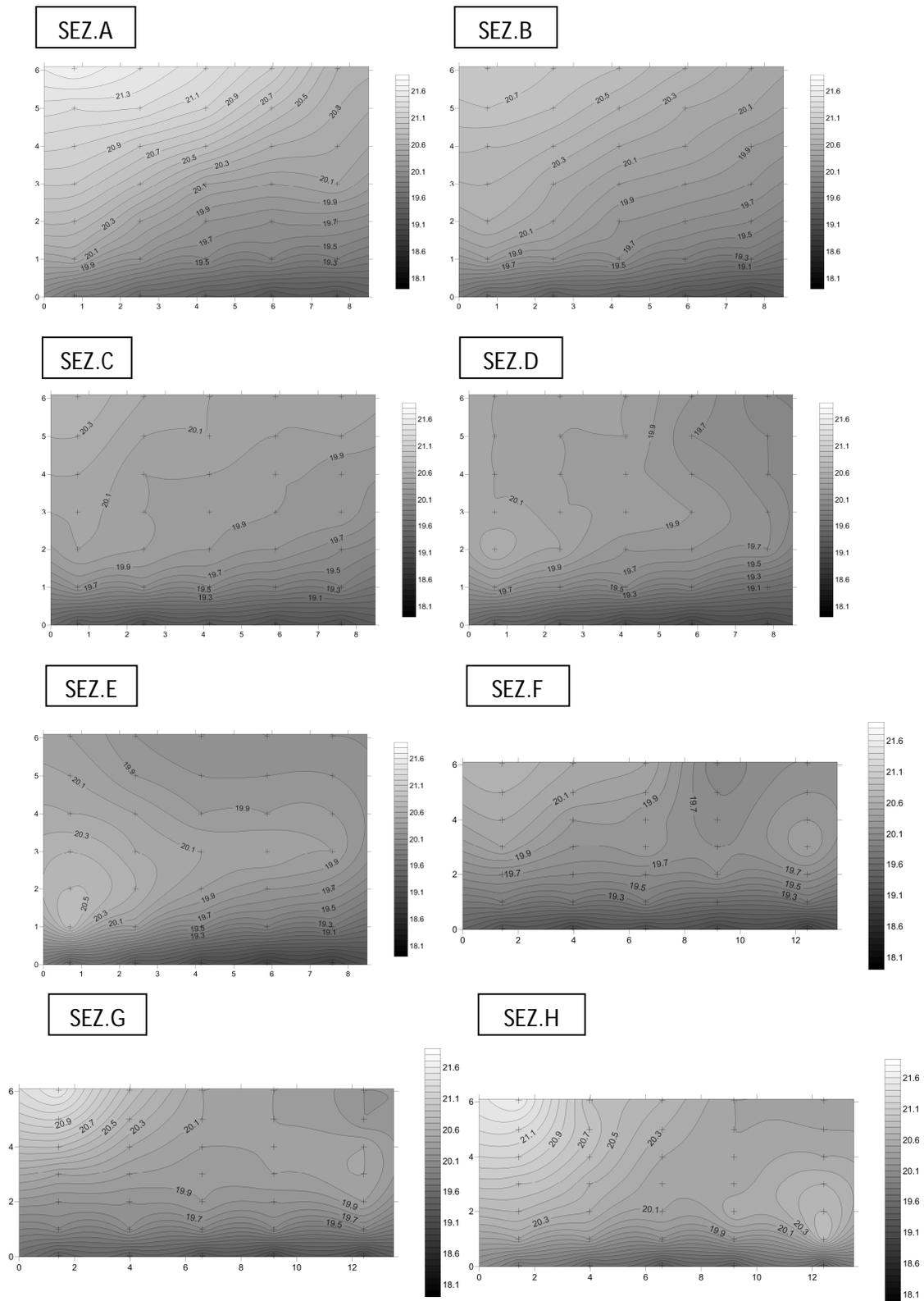


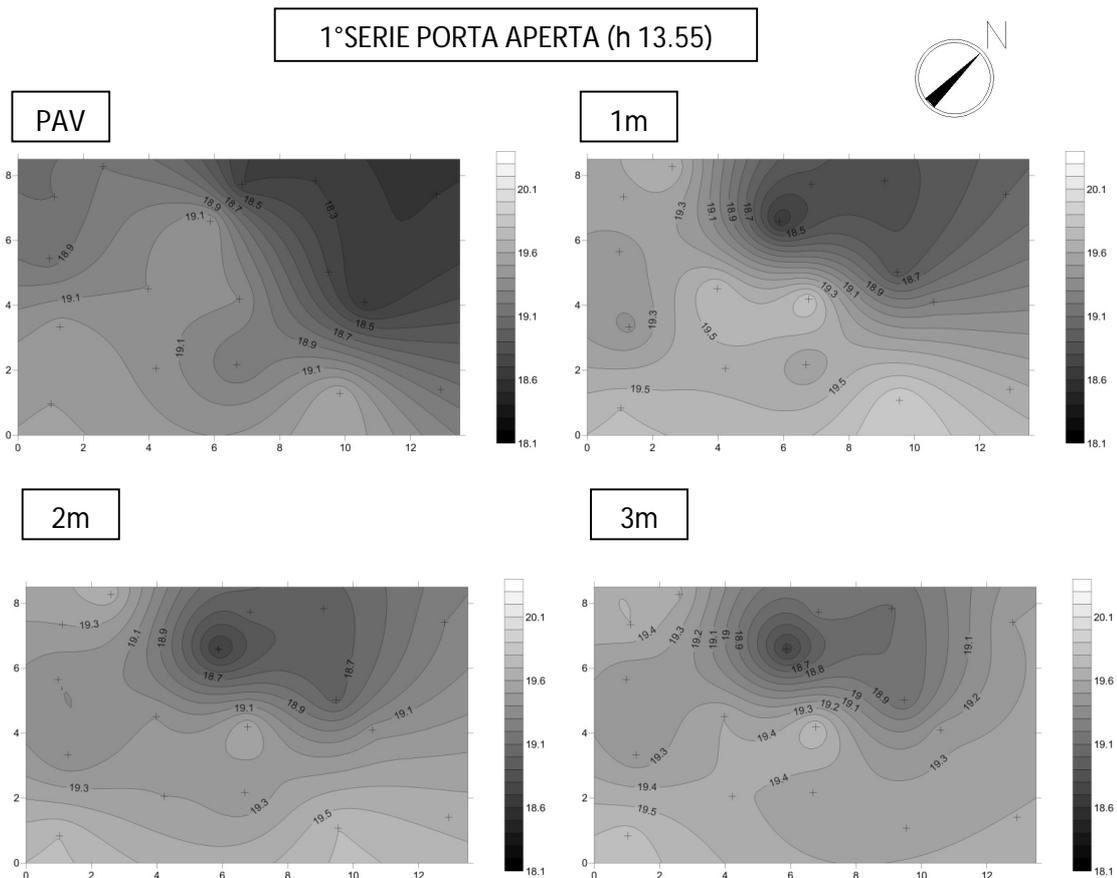
Figura 4.60: Mappe verticali delle temperature del salone 1F9 della 4° serie con la finestra aperta.

- SEZIONI OTTENUTE DAL MONITORAGGIO DI FLUSSI DI ARIA FREDDA

Nella seconda fase di analisi è stato messo in collegamento il salone 1F9 con il serbatoio di aria fredda, ossia la sala 1F8 e sono state effettuate tre serie di termogrammi. Le mappe sono state create in modo tale che tutte e tre le serie di tale fase avessero lo stesso range di temperatura, ossia il campo di temperatura è compreso tra 18.1-20.3°C che sono i valori minimi e massimi rilevati in questa seconda fase di acquisizione dei dati.

Sezioni orizzontali

Nella figura 4.61 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la 1° serie di termografia effettuata con il salone 1F9 in collegamento con la sala 1F8, serbatoio di aria fredda.



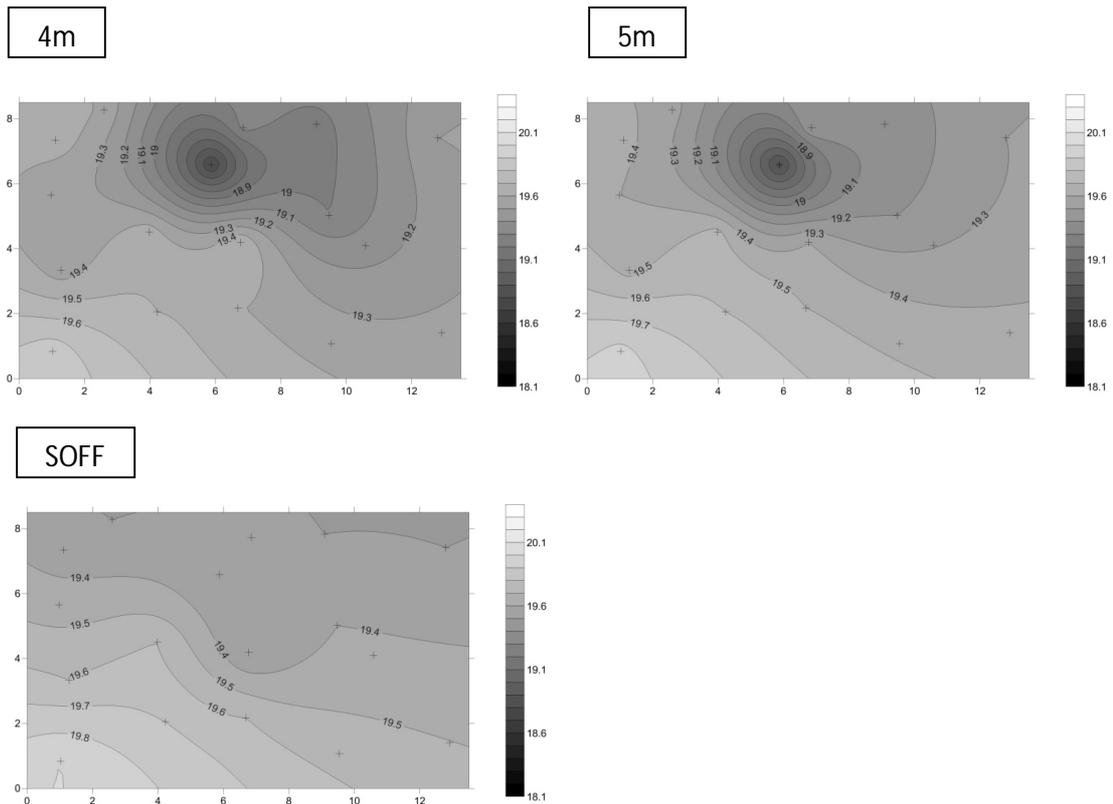


Figura 4.61: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della 1° serie con porta aperta.

Precedentemente all’apertura della porta di collegamento con la sala 1F8 il salone è stato mantenuto, per circa un’ora, con tutte le aperture chiuse al fine di ricreare la reale distribuzione di temperature al suo interno. In questa 1° serie a porta aperta non si nota subito l’influenza del flusso freddo proveniente dalla sala 1F8 e ciò è legato, principalmente, al fatto che la differenza tra i due ambienti è di circa 1°C. Tuttavia all’interno del salone sono presenti punti, a diverse quote, più freddi rispetto alla zona circostante e ciò è testimonianza di eventuali flussi che si sono instaurati con l’apertura della porta. Con esattezza il punto più caldo dal salone è in corrispondenza della striscia 1 in cui si ha una temperatura pari a 19.9°C a livello del soffitto, il punto più freddo del salone è in corrispondenza della striscia 13 in cui si ha una temperatura di 18.2°C. I valori di temperatura rilevati sono ben distribuiti all’interno del salone essendo il gradiente termico tra soffitto e pavimento di circa 1°C; inoltre i valori di temperatura sono simili ai valori rilevati nella serie “zero” della fase precedente.

Nella figura 4.62 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la 2° serie di termografia effettuata con il salone 1F9 in collegamento con la sala 1F8, serbatoio di aria fredda.

2°SERIE PORTA APERTA (h 14.03)

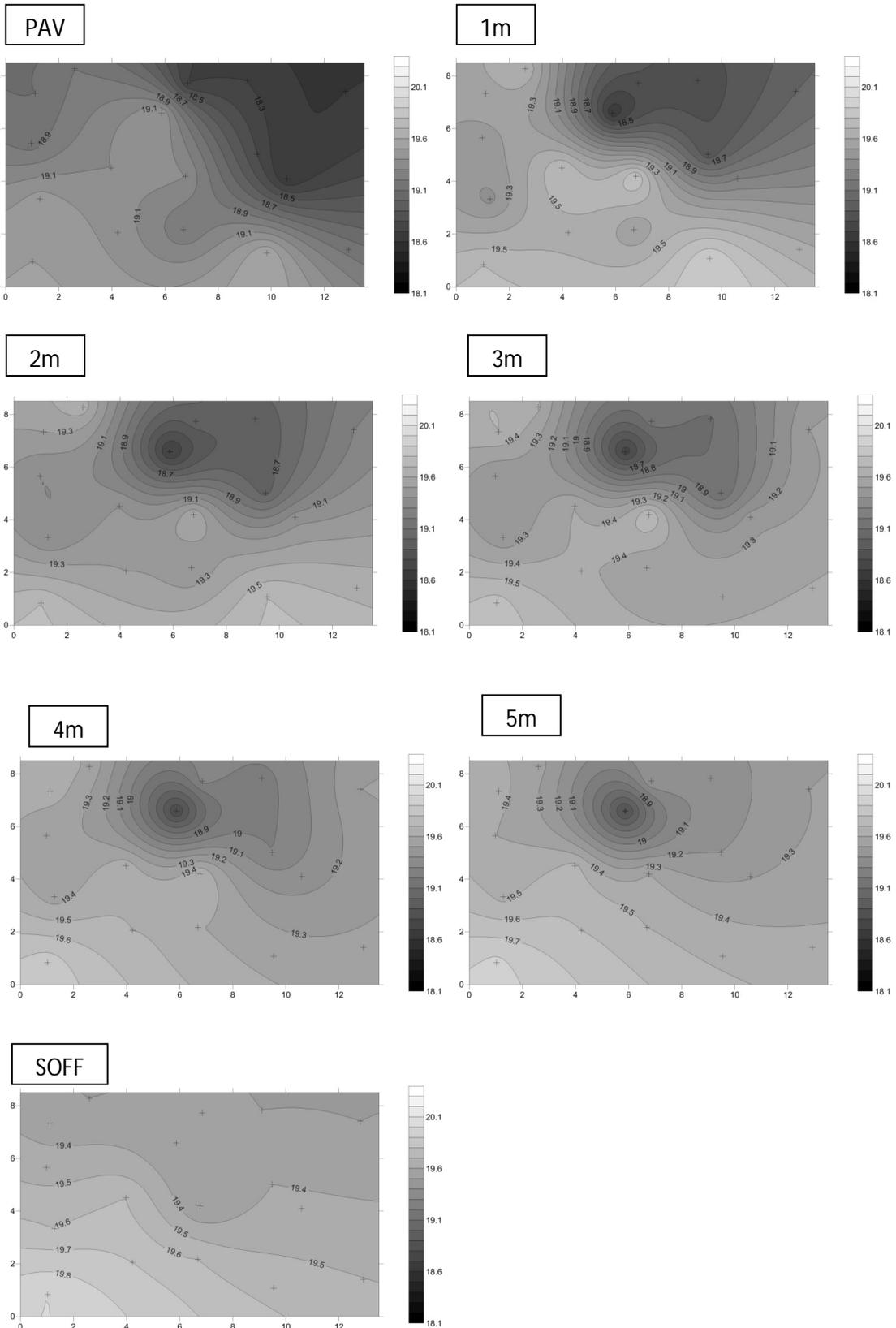
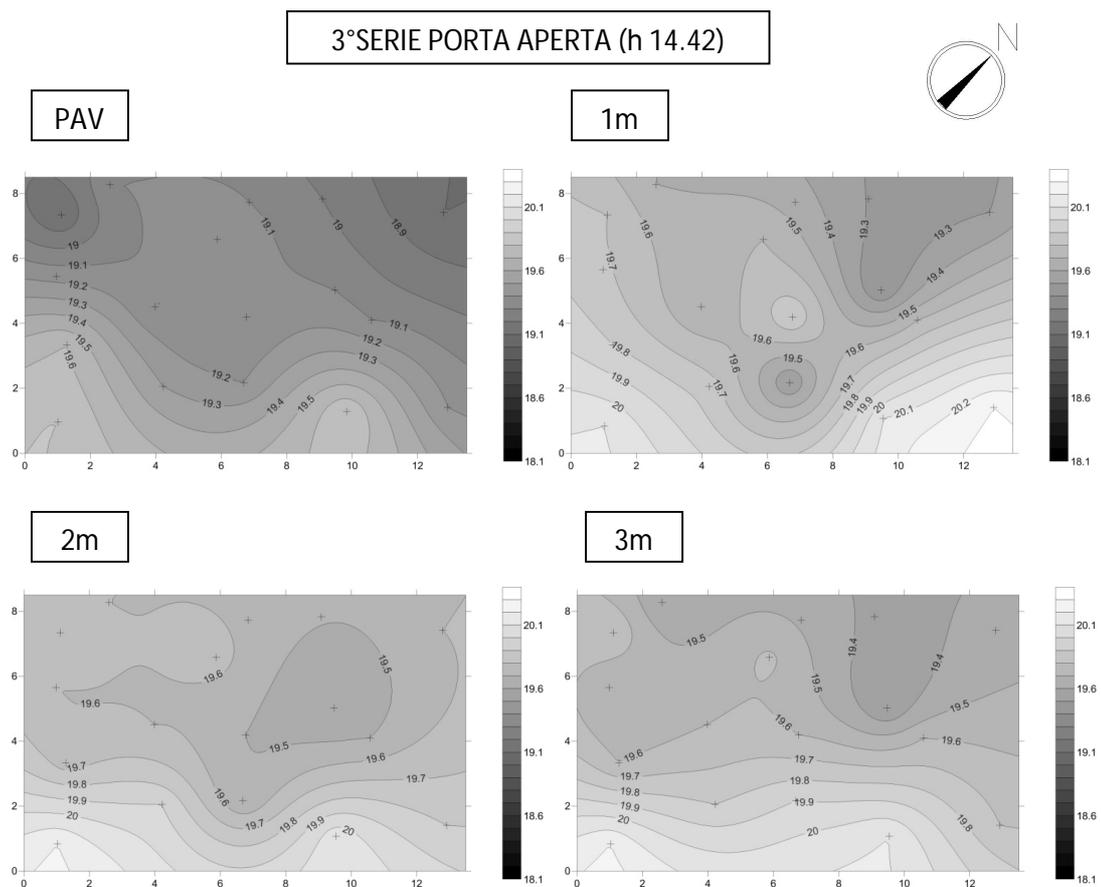


Figura 4.62: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della 2° serie con porta aperta.

Nella 2° serie a porta aperta sono maggiormente visibili gli effetti del flusso freddo penetrato nel salone 1F9. Le temperature generali dell'ambiente sono diminuite ed, a differenza del flusso caldo, che influenzava principalmente le temperature alle quote più elevate, il flusso di aria fredda influisce particolarmente sulle temperature delle quote inferiori. Con esattezza il punto più caldo del salone è sempre in corrispondenza della striscia 1 in cui si ha una temperatura di 19.7°C a livello del soffitto; il punto più freddo del salone, a differenza della serie precedente, è in corrispondenza delle strisce 16 e 17, posizionate davanti alla porta aperta, in cui si ha una temperatura pari a 18.1°C a livello del pavimento. In analogia con la serie precedente anche in questo caso si notano dei punti isolati, alle quote intermedie, più freddi rispetto alla zona circostante.

Nella figura 4.63 sono riportate le mappe orizzontali di temperatura, per ogni quota di riferimento, per la 3° serie di termografia effettuata con il salone 1F9 in collegamento con la sala 1F8, serbatoio di aria fredda.



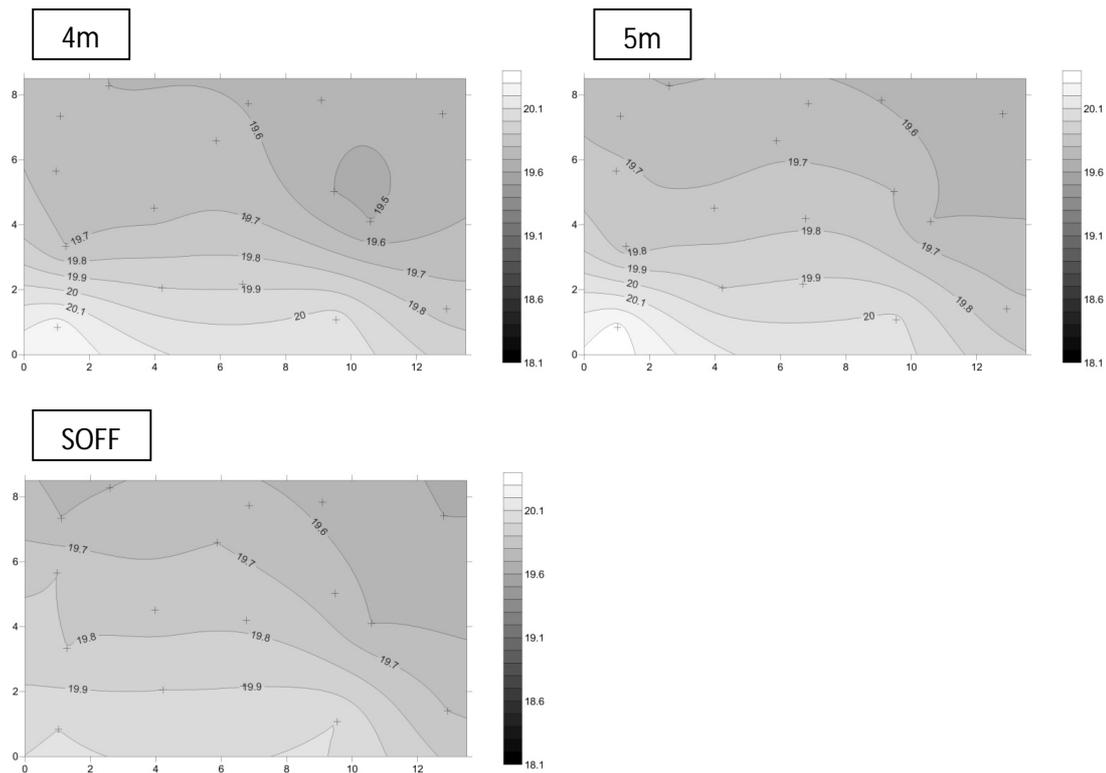


Figura 4.63: Mappe orizzontali delle temperature del salone 1F9 della 3° serie con porta aperta.

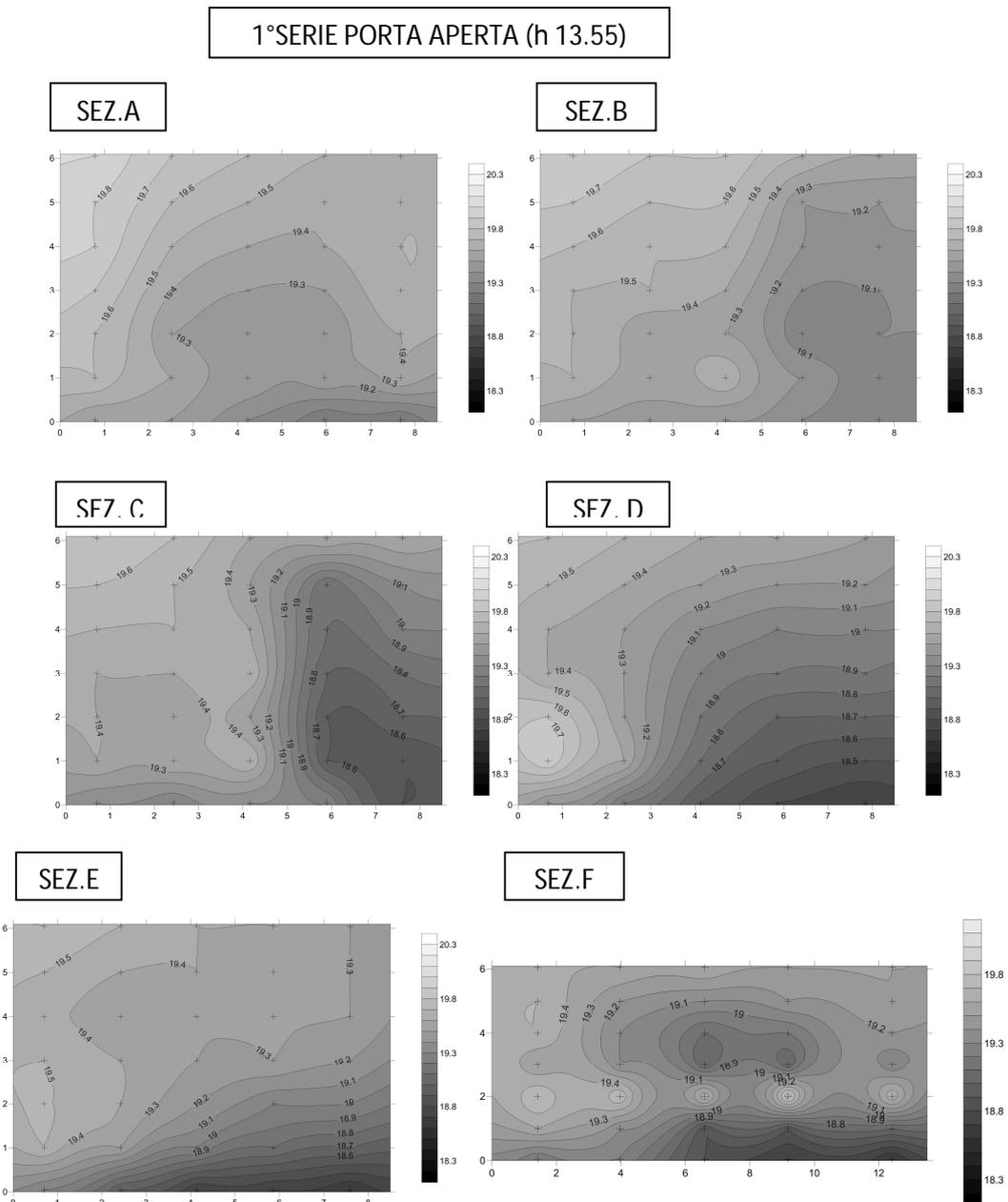
In tale serie, l'ultima a porta aperta, è visibile come il flusso di aria fredda si sia in parte mescolato con il flusso presente all'interno del salone dando luogo ad un riscaldamento globale dell'ambiente, fatta eccezione per il livello del pavimento, rispetto alla serie precedente.

Le temperature sono più omogenee in tutta l'area in esame ed il gradiente termico tra pavimento e soffitto è al massimo pari ad 1°C. Con esattezza il punto più caldo del salone è in corrispondenza della striscia 5, posizionata nell'angolo est, in cui si ha la temperatura pari a 20.3°C ad un metro da terra ossia al livello del vetro dell'infisso presente dietro la striscia che permette il riscaldamento dell'ambiente mediante irraggiamento solare; il punto più freddo del salone si ha in corrispondenza della striscia 17, situata davanti la porta aperta, in cui si ha una temperatura pari a 18.8°C a livello del pavimento.

Sezioni verticali

Nella 1° serie con la porta aperta (Fig. 4.64), le mappe di temperatura verticali sono molto più chiare di quelle orizzontali in quanto mostrano un risultato visivo

immediato del flusso di aria fredda che penetra nel salone. In particolare, facendo riferimento alle sezioni A, B, C, D ed E, è visibile come il flusso di aria fredda tende ad espandersi alle quote più basse ed in direzione nord, probabilmente compresso in tale zona dalla massa consistente di aria più calda presente nelle altre zone del salone in cui sono presenti gli infissi e la temperatura è maggiore. Nella sezione F, che è nelle vicinanze della parete in cui si propaga l'aria fredda, è presente un particolare moto convettivo che tende a raffreddare la parete non in maniera uniforme. Nella sezione G, infine, si nota come le temperature lungo la mezzeria del salone siano piuttosto uniformi tranne che nella parte finale in cui è presente una nicchia di aria fredda probabilmente legata alla presenza del portone (Fig. 4.65).



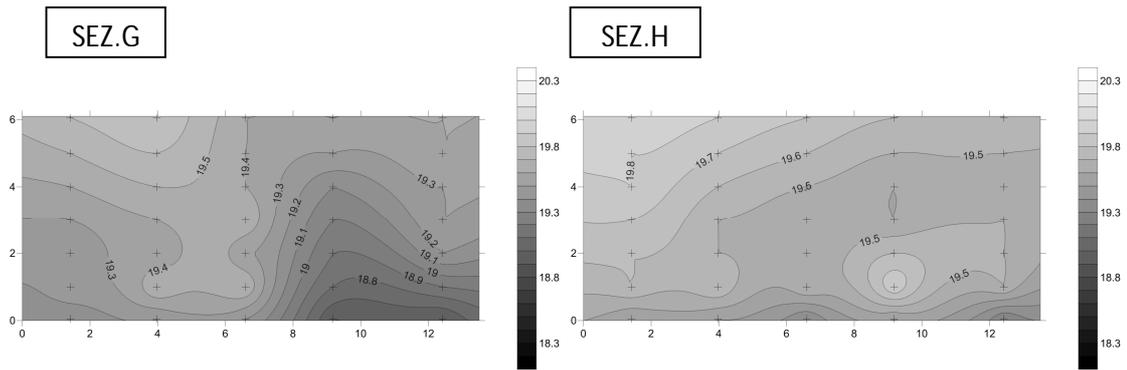


Figura 4.64: Mappe verticali delle temperature del salone 1F9 della 1° serie con la porta aperta.

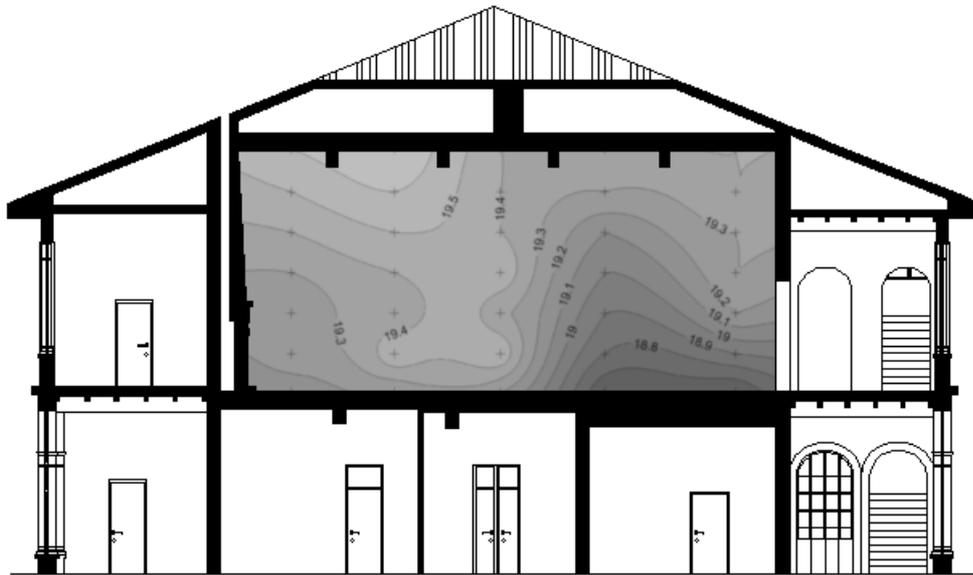


Figura 4.65: Nicchia di aria fredda presente nella parte terminale della sez di mezzeria G in corrispondenza del portone del salone.

Nella 2° serie di mappe verticali, ottenuta dal monitoraggio di flusso d'aria fredda (Fig. 4.66) è visualizzato bene l'andamento del flusso di aria fredda che, in modo più consistente rispetto alla serie precedente, si distribuisce lungo la parete nord-ovest del salone investendo in particolare i primi metri, a partire dal pavimento.

Nella sezione F è molto chiaro il flusso di aria fredda nell'intorno della parete adiacente alla sala 1F8, serbatoio di aria fredda, nella parte bassa del salone.

2°SERIE PORTA APERTA (h 14.03)

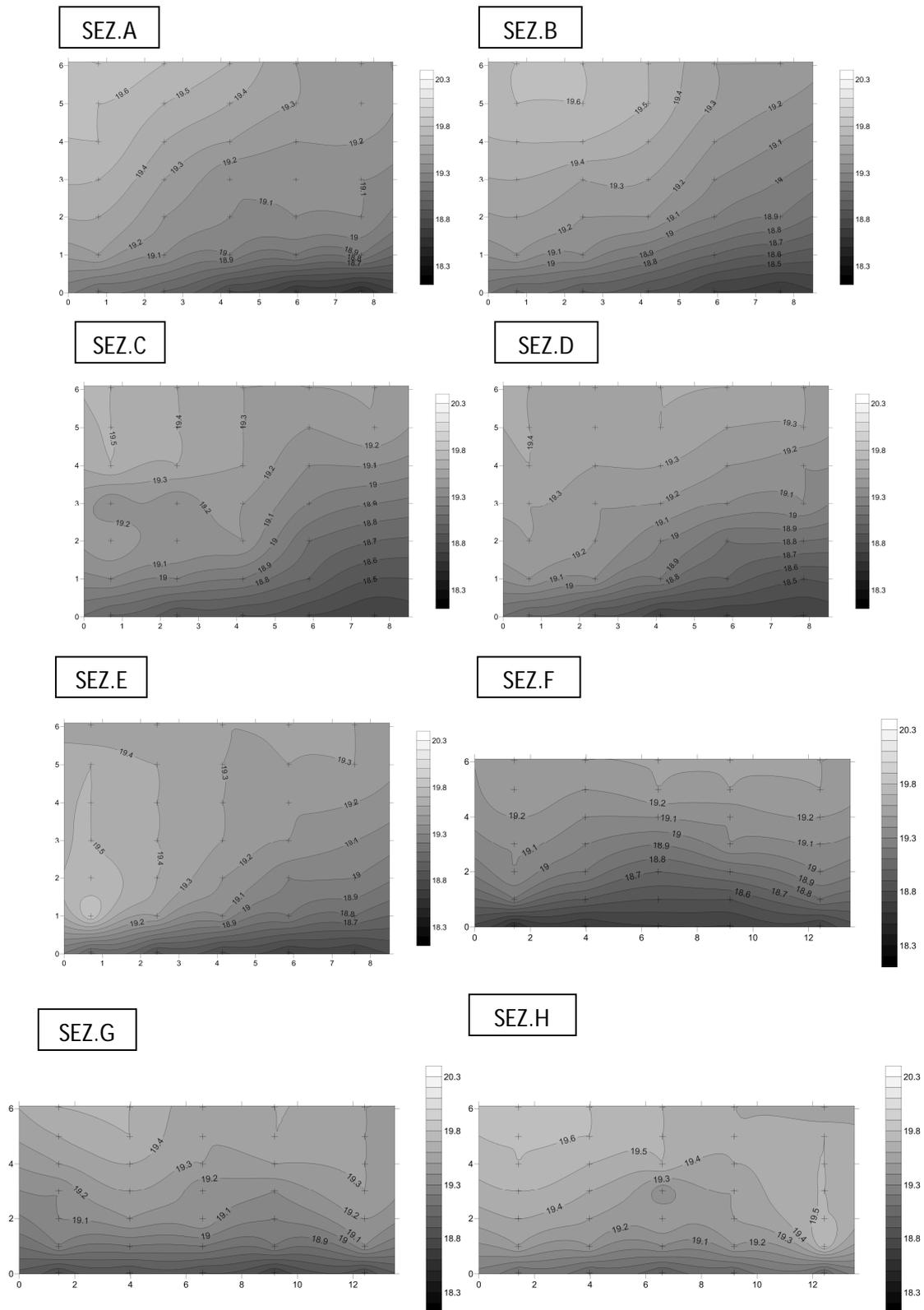
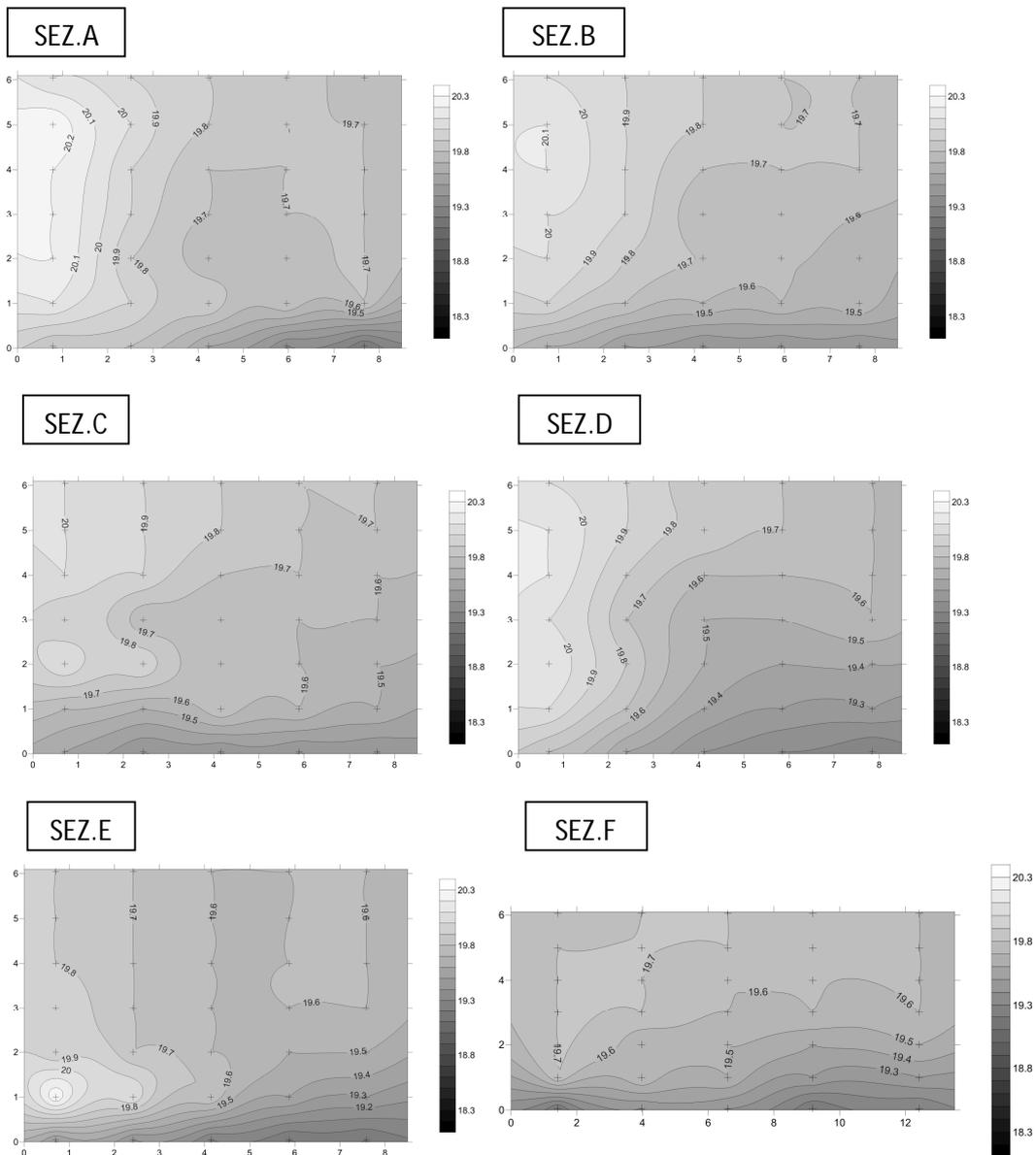


Figura 4.66: Mappe verticali delle temperature del salone 1F9 della 2° serie con la porta aperta.

Nella 3° ed ultima serie del monitoraggio a porta aperta (Fig. 4.67), effettuata a circa un'ora dall'apertura del collegamento tra salone e la sala 1F8, è visualizzato il mescolamento globale dell'aria fredda con l'aria precedentemente presente nel salone. Le temperature, in media, sono aumentate rispetto alla serie precedente tranne a livello del pavimento in cui ancora è fortemente percepibile l'effetto del flusso di aria fredda penetrato. In particolare tale effetto è maggiormente visibile nelle sezioni A, B e D in cui è chiaro lo scambio di calore tra il flusso caldo, concentrato nella parte sinistra, ed il flusso freddo, concentrato nella parte destra delle sezioni. Particolare interessante risulta essere la sezione E in cui le temperature sembrano essere disposte secondo dei netti profili verticali.

3°SERIE PORTA APERTA (h 14.42)



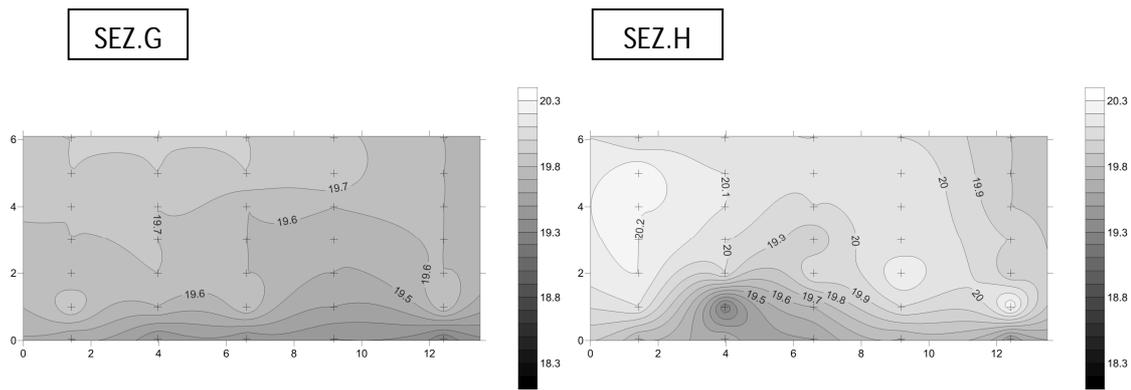


Figura 4.67: Mappe verticali delle temperature del salone 1F9 della 3° serie con la porta aperta.

Per ottenere, infine, un quadro maggiormente completo dei risultati ed avere i valori delle due fasi di analisi confrontabili direttamente tra loro, sono state create ulteriori mappe, sia orizzontali che verticali, con un campo di temperatura compreso tra 17.8-21.8 °C ossia tra i valori minimi e massimi in assoluto tra tutte le serie termografiche effettuate nelle differenti condizioni di prova.

Tali mappe, riportate nell'*allegato C* rendono visibili le stesse osservazioni riportate, in precedenza, per le singole serie e differenti solamente nella modalità di rappresentazione.

4.8 Verifica dei risultati

Mediante l'utilizzo della termografia è stato effettuato il monitoraggio dei moti convettivi all'interno del salone 1F9 della Palazzina della Viola in due differenti fasi significative in termini di condizioni termoigrometriche; nella prima fase è stato monitorato l'andamento delle temperature quando il salone entra in contatto con un flusso di aria calda mentre, nella seconda fase, è stato monitorato l'andamento delle temperature quando il salone entra in contatto con un flusso di aria fredda.

Al termine dell'elaborazione dei dati acquisiti e della visualizzazione di essi mediante mappe termiche, orizzontali e verticali, è stata svolta una verifica dei risultati al fine di comprovare la validità della prova effettuata. Tale verifica, eseguita il 30 Maggio 2011 alle ore 11.41, per esigenze organizzative è stata svolta solo per la prima fase dell'analisi ossia per la fase inerente il collegamento tra il salone e la loggia frontale 1F2, serbatoio di aria calda.

Prima di svolgere la prova è stato effettuato un monitoraggio della temperatura e dell'umidità delle due zone in esame al fine di cercare di effettuare la verifica in corrispondenza del picco massimo di calore inerente la loggia frontale 1F2 (Tab. 4.13). Avendo svolto l'acquisizione dati e la verifica dei risultati a distanza di più di un mese l'una dall'altra sono presenti sostanziali differenze tra le due prove, in particolare variano i valori di temperatura ed umidità rilevati nelle stanze in esame (Tab. 4.14) ed il salone 1F9 non risulta più essere un ambiente libero in quanto è stato riempito mediante materiale vario derivante dai lavori di ristrutturazione in opera nei locali adiacenti.

Tabella 4.13: Monitoraggio della temperatura e dell'umidità del salone 1F9 e della loggia frontale 1F2.

h	Stanza	T (°C)	RH (%)
9.30	1F9	23	44
	1F2	24	40.5
10.00	1F9	23	40.1
	1F2	24.6	37
10.30	1F9	23.4	40.8
	1F2	25.3	38
11.00	1F9	24.1	40
	1F2	25.1	36
11.34	1F9	23.8	40.7
	1F2	25	38.5

Tabella 4.14: Confronto tra i valori di T e RH misurati in centro al salone 1F9 e alla loggia 1F2, a circa 1,8 m dal pavimento, della 1° serie termografica con la finestra aperta e la verifica dei risultati mediante l'accensione del fumogeno.

Monitoraggio dei flussi di aria calda	1F9			1F2		
	h rilievo	T (°C)	RH (%)	h rilievo	T (°C)	RH (%)
Rilievo termografico	10.45	19,9	48,4	10.45	23,5	35,7
Verifica con fumogeno	11.34	23.8	40.7	11.34	25	38.8

Per rendere visibile l'andamento dei moti convettivi è stato pensato di utilizzare dei fumogeni colorati che rendessero chiaro il percorso seguito dall'aria quando vengono messi in collegamento due ambienti a differente temperatura. In particolare sono stati utilizzati due fumogeni Softair rossi dalla durata complessiva di 60 secondi. I due fumogeni sono stati disposti all'interno del salone distanti 2.30 m dall'infisso aperto

per realizzare il collegamento tra il salone e la loggia 1F2 in modo tale che essi siano investiti, in modo diretto, dal flusso di aria calda (Fig. 4.68).



Figura 4.68: Disposizione della coppia di fumogeni in corrispondenza del flusso entrante di aria calda.

La coppia dei fumogeni è stata azionata a frizione manuale da un'operatore alle ore 11.41, contemporaneamente è stato girato un video, di circa 20 minuti, dall'angolo nord del salone alla quota di circa 3 m per riprendere l'andamento del flusso dell'aria. È stato notato che nei primi minuti successivi all'accensione dei fumogeni il fumo si è diretto, in maniera repentina, verso il soffitto della parete sud-ovest in vicinanza del focolare (Fig. 4.69).

A distanza di circa 3-5 minuti il fumo comincia a diffondersi anche nelle altre zone del salone per poi scendere lentamente verso il basso; dopo circa 6-8 minuti il fumo si è distribuito in tutto il salone raggiungendo, in ultimo, l'angolo nord che in condizioni normali è il punto più freddo (Fig. 4.70-4.71).

Circa 10 minuti dopo l'accensione dei fumogeni è stato notato che il fumo, scendendo verso il basso, staziona per un po' a metà altezza, ossia è concentrato tutto tra i 4-5 m del salone (Fig. 4.72).

In seguito il fumo seguita la sua discesa verso il basso ed invade anche la loggia 1F2. A circa 20 minuti dall'inizio della prova il fumo prevale nella parte bassa del salone, piuttosto che nella parte alta, ma è distribuito in maniera piuttosto uniforme in tutto l'ambiente.



Figura 4.69: Fumo raccolto nella parte superiore della parete sud-ovest dopo 1'22'' dall'accensione del fumogeno.



Figura 4.70: Il fumo, dopo 4'34'' dall'accensione del fumogeno, inizia a diffondersi su tutto il soffitto del salone 1F9.



Figura 4.70: Il fumo raggiunge l'angolo nord del salone 1F9, dopo 6'14'' dall'accensione del fumogeno, ed inizia a scendere verso il basso.

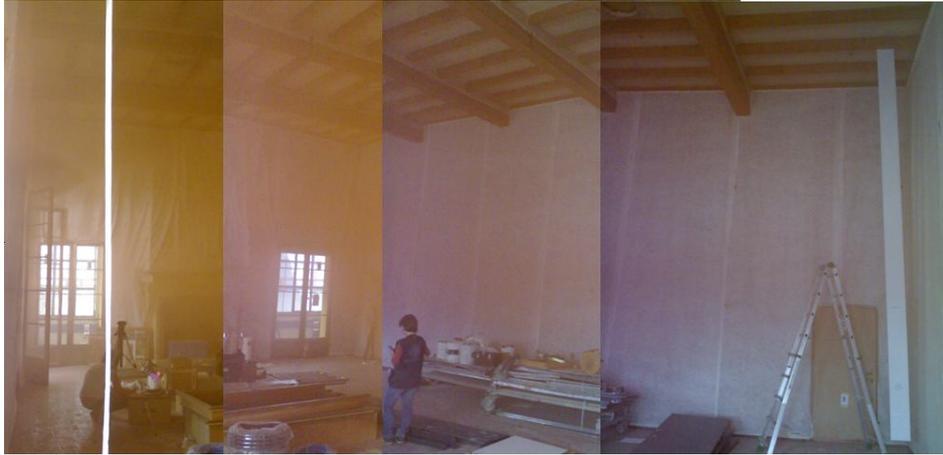


Figura 4.71: Il fumo, dopo 10'28'' dall'accensione del fumogeno, ha invaso tutto il salone 1F9 e staziona, in particolare, all'altezza di 4-5 m.

In conclusione si può affermare che, ciò che è stato in precedenza rilevato mediante l'utilizzo di una macchina termografica e, mediante le opportune scelte di realizzazione della prova e corretta elaborazione dei dati acquisiti, ha trovato riscontro nella verifica finale effettuata con i fumogeni nonostante fossero presenti delle differenze non trascurabili tra le due prove. Utilizzare la tecnica termografica, in edifici storici esistenti, è dunque un'ottima soluzione per monitorare il flusso dei moti convettivi senza dover ricorrere ad interventi invasivi e dannosi per la struttura in esame.

5 INDAGINE GPR SU SOLAI

Mediante l'utilizzo della tecnica GPR sono stati acquisiti dati radar, in data 7 Aprile 2011, sui solai presenti al primo piano della Palazzina della Viola (Bologna) al fine di indagare, in modo non distruttivo, sulle caratteristiche principali degli stessi, individuare i principali elementi costituenti e fornire un importante aiuto per la programmazione degli interventi di ristrutturazione e restauro previsti, in linea con gli obiettivi del progetto europeo 3Encult, per tale edificio.

5.1 SCOPO DELLA PROVA

La tecnica del GPR (Ground Penetrating Radar) permette di identificare oggetti e strutture situati in profondità sfruttando la propagazione delle onde elettromagnetiche. È possibile localizzare, con buona precisione, discontinuità ed elementi non visibili dall'esterno ed effettuare un'indagine completa su diverse porzioni della struttura in esame. In particolare è utilizzata per la localizzazione dei sottoservizi presenti nelle strutture (tubi e cavi degli impianti), per il controllo del manufatto in termini di fessure, distacchi ed ammaloramenti e per l'individuazione delle armature e della struttura portante.

Nello specifico, nell'analisi svolta, il GPR è stato utilizzato per rilievi su solai della Palazzina della Viola con l'obiettivo di raggiungere una completa ed accurata conoscenza degli stessi e di identificarne i singoli componenti; in particolare, per ogni elemento, è interessante ottenere informazioni inerenti la posizione, il materiale e le caratteristiche geometriche.

5.2 OGGETTO DELLA PROVA: PALAZZINA DELLA VIOLA (BOLOGNA)

Alla Palazzina della Viola, edificio del '500 situato nel centro di Bologna, sono state effettuate indagini GPR inerenti i solai del primo piano dell'edificio e riguardanti, nello specifico, il salone centrale 1F9, la loggia frontale 1F2 e la stanza sul retro 1F6 (Fig. 5.1). In tali zone sono presenti degli scassi che sono utili, in seguito

all'elaborazione dati, per effettuare il confronto tra i risultati ottenuti e la reale composizione dei solai in esame.

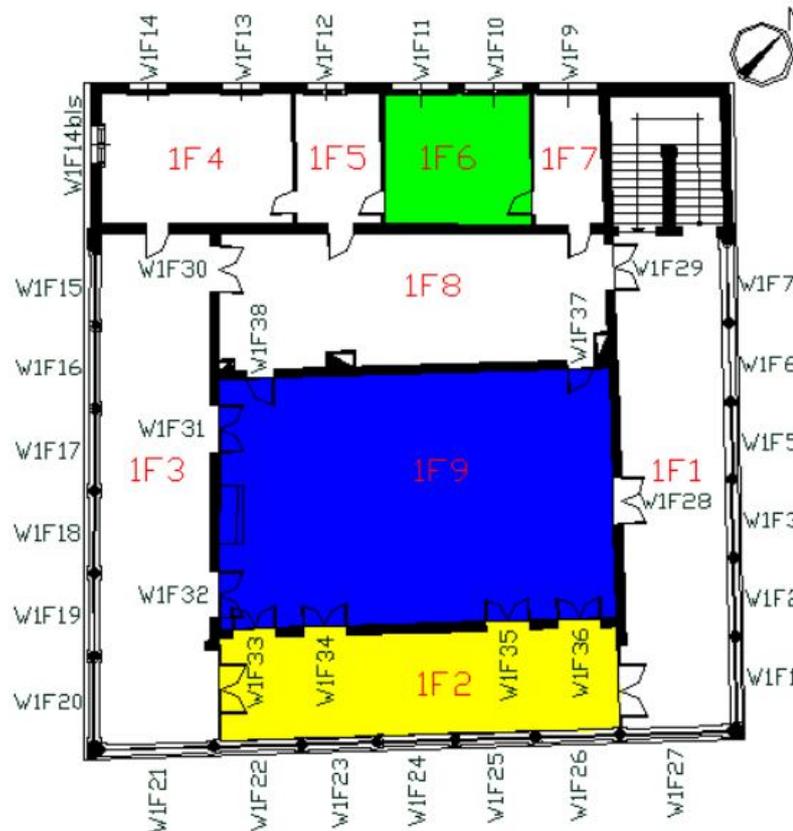


Figura 5.1: Pianta del 1° Piano della Palazzina della Viola con indicazioni sulle stanze interessate da indagini GPR.

5.3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'acquisizione dei dati radar nei pavimenti della Palazzina della Viola è stata effettuata mediante l'utilizzo di un'antenna da 900 MHz (Fig.5.2); tale tipologia di antenna è stata progettata per applicazioni che richiedono una penetrazione del segnale fino ad un massimo di 1 m (Tab. 5.1). Essa è particolarmente indicata per il rilevamento dei vuoti all'interno del materiale, la valutazione degli spessori degli strati cementizi, il posizionamento delle armature e la localizzazione di impianti superficiali.

Durante l'analisi è stata installata sull'antenna una stampella che facilita lo scorrimento della stessa da parte dell'operatore; sul manico della stampella è presente un pulsante attraverso il quale è possibile inserire i marks sui radargrammi acquisiti.



Figura 5.2: Antenna da 900 MHz.

Tabella 5.1: Scheda tecnica dell'antenna da 900 MHz.

Caratteristiche Antenna 900 MHz	
Frequenza centrale	900 MHz
Range di profondità di indagine	0-1 m
Dimensioni	33 x 18 x 8 cm
Peso	2.3 Kg
Modello	3101D (U.S.), 3101A (International)

5.4 PROCEDURA PREPARATORIA

La tecnica GPR applicata alla Palazzina della Viola è incentrata sull'analisi dei solai di alcune aree del primo piano dell'edificio ed, in particolare, del salone 1F9 e delle stanze 1F2 e 1F6. Per realizzare un'indagine il più possibile esaustiva è stata, in prima fase, effettuata un'ispezione visiva al piano terra per valutare le diverse tipologie di solai presenti al disotto delle stanze identificate per l'acquisizione dei dati.

È stato quindi pensato di realizzare una singola linea radar che attraversasse sia la loggia frontale 1F2 sia il salone 1F9, una griglia nel salone 1F9 ed una griglia nella stanza sul retro 1F6 (Fig. 5.3).

La singola linea radar presente ricopre una lunghezza pari a 12 m ed è stato deciso di suddividerla, in fase di acquisizione dati, in due o più parti.

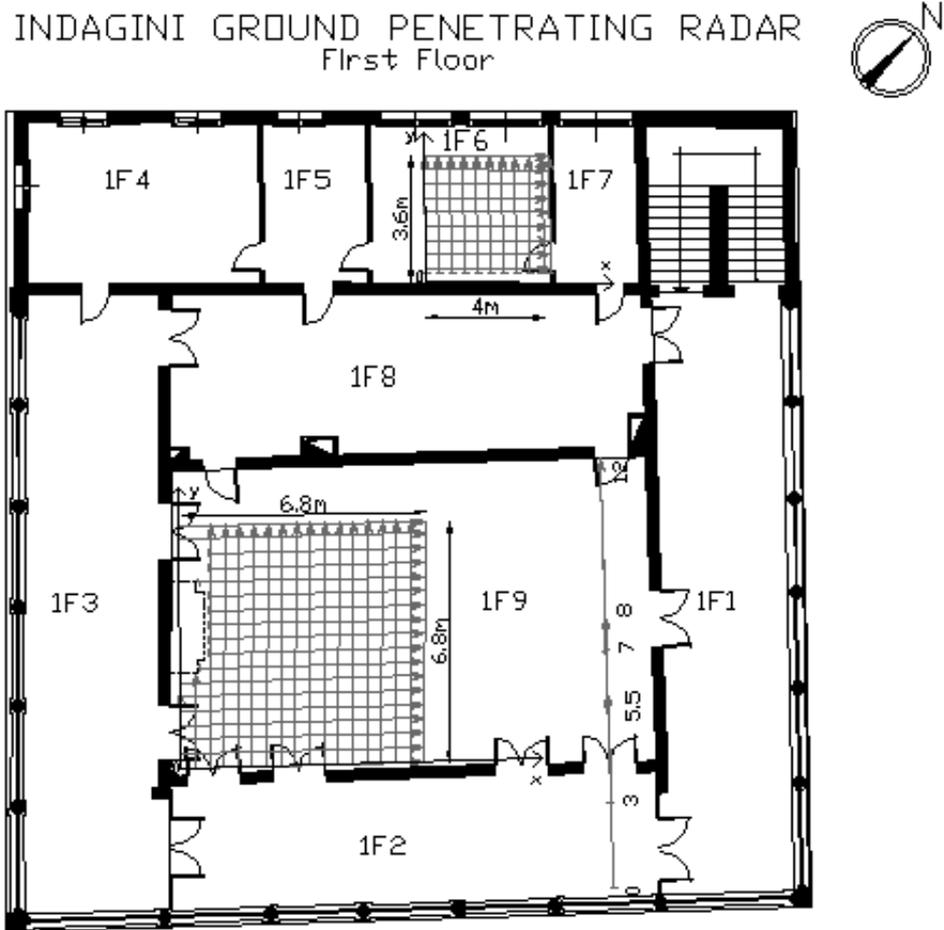


Figura 5.3: Linee radar programmate per il primo piano della Palazzina della Viola.

Individuate le aree in cui eseguire l'analisi GPR esse sono state liberate da eventuali ostacoli presenti nelle stanze e sono state segnate le tracce delle singole linee radar mediante l'apposizione di nastro adesivo sul pavimento. Prima di apporre il nastro adesivo il pavimento, nel punto in esame, è stato pulito dalla polvere mediante l'utilizzo di un panno pulito al fine di consentire l'adesione del nastro.

I pezzi di nastro adesivo sono stati posizionati, rispettivamente, ogni 50 cm per la singola linea radar ed ogni 40 cm per le due griglie e su ciascuno di essi sono state segnate le distanze progressive a partire dal punto di coordinate (0,0).

5.5 ACQUISIZIONE DATI

I dati radar sui solai della Palazzina della Viola sono stati tutti acquisiti la mattinata del 7 Aprile 2011. I primi radargrammi sono inerenti la linea radar che, a

partire dall'infisso W1F26 della parete frontale, attraversa sia la loggia 1F2 sia il salone 1F9, fino ad arrivare alla porta W1F37 (Fig. 5.4–5.5).

Per ottenere dei buoni risultati, in fase di analisi, è necessario effettuare, all'inizio dell'acquisizione, il settaggio dell'antenna utilizzata; ogni qualvolta vengono cambiati determinati parametri è possibile valutare in sito, dallo schermo presente sullo strumento, le modifiche apportate ai file. Essendo la linea radar in esame la prima della campagna di analisi sono stati necessari tre diversi settaggi della strumentazione per poter raggiungere un buon livello di rilevazione (Tab. 5.2-5.4).

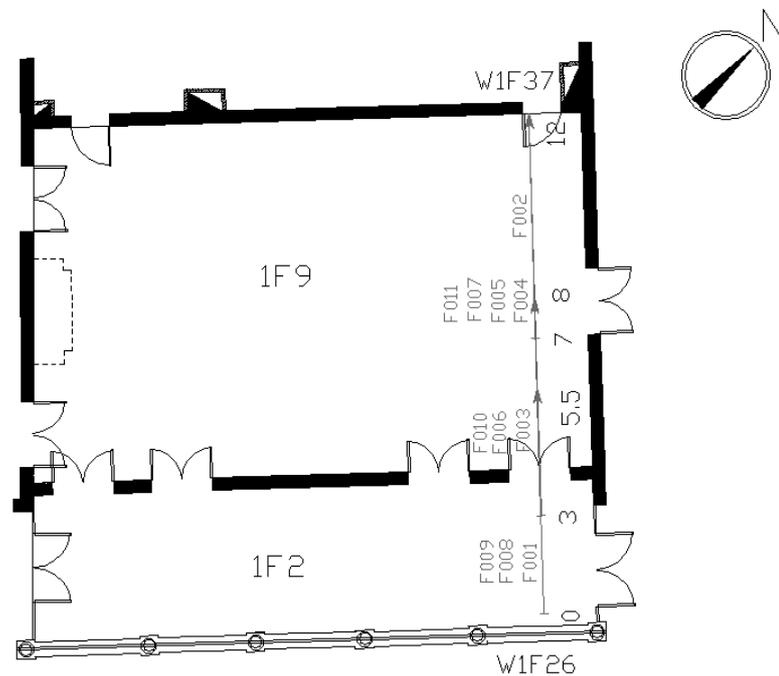


Figura 5.4: Linea radar nella loggia 1F2 e nel salone 1F9.



Figura 5.5: Traccia della linea radar nel pavimento del salone 1F9.

Tabella 5.2: 1° settaggio antenna 900 MHz.

<i>File 001 - 005</i>			
<u>Antenna</u>	900 MHz	<u>Diel</u>	6
<u>Filtri</u>	LP-IIR 2500 HP-IIR 225	<u>Rate</u>	64
<u>Sample</u>	512	<u>Scan/unit</u>	100
<u>Format (bit)</u>	16	<u>Gain manuale</u>	GP1(dB) = -3 GP2(dB) = 5
<u>Range (ns)</u>	8	<u>Offset</u>	2.55

Tabella 5.3: 2° settaggio antenna 900 MHz.

<i>File 006 - 008</i>			
<u>Antenna</u>	900 MHz	<u>Diel</u>	6
<u>Filtri</u>	LP-IIR 2500 HP-IIR 225	<u>Rate</u>	64
<u>Sample</u>	512	<u>Scan/unit</u>	100
<u>Format (bit)</u>	16	<u>Gain manuale</u>	GP1(dB) = -10 GP2(dB) = 16
<u>Range (ns)</u>	14	<u>Offset</u>	2.55

Tabella 5.4: 3° settaggio antenna 900 MHz.

<i>File 009 - 011</i>			
<u>Antenna</u>	900 MHz	<u>Diel</u>	6
<u>Filtri</u>	LP-IIR 2500 HP-IIR 225	<u>Rate</u>	64
<u>Sample</u>	512	<u>Scan/unit</u>	100
<u>Format (bit)</u>	16	<u>Gain manuale</u>	GP1(dB) = -8 GP2(dB) = 22
<u>Range (ns)</u>	20	<u>Offset</u>	2.55

L'acquisizione dei dati per i file iniziali e terminali di tale linea radar è avvenuta partendo con l'antenna appoggiata alla parete sud-est della loggia 1F2, ossia con una distanza centro antenna-parete pari a circa 23 cm, e terminando con la testa dell'antenna appoggiata alla porta 1WF37 appartenente alla parete nord-ovest del salone 1F9, ossia con una distanza centro antenna-parete pari a circa 10 cm. I markers sono stati inseriti manualmente dall'operatore per ogni punto segnato a terra con il nastro adesivo ossia ogni 50 cm. Nel salone 1F9 lungo la direzione di tale rilevamento è presente, inoltre,

uno scasso sul pavimento a circa 10 m dal punto iniziale della linea radar; i radargrammi acquisiti in tale zona sono stati fatti passare sopra il telo di nylon trasparente posizionato sopra lo scasso.

In seguito sono stati acquisiti i radargrammi della maglia progettata nell'angolo sud del salone 1F9 di dimensioni pari a 6.8 x 6.8 m; in totale sono stati rilevati 18 radargrammi in direzione x e 18 radargrammi in direzione y (Fig. 5.6-5.7). È stato utilizzato lo stesso settaggio della strumentazione degli ultimi file dell'acquisizione precedente (Tab. 5.5).

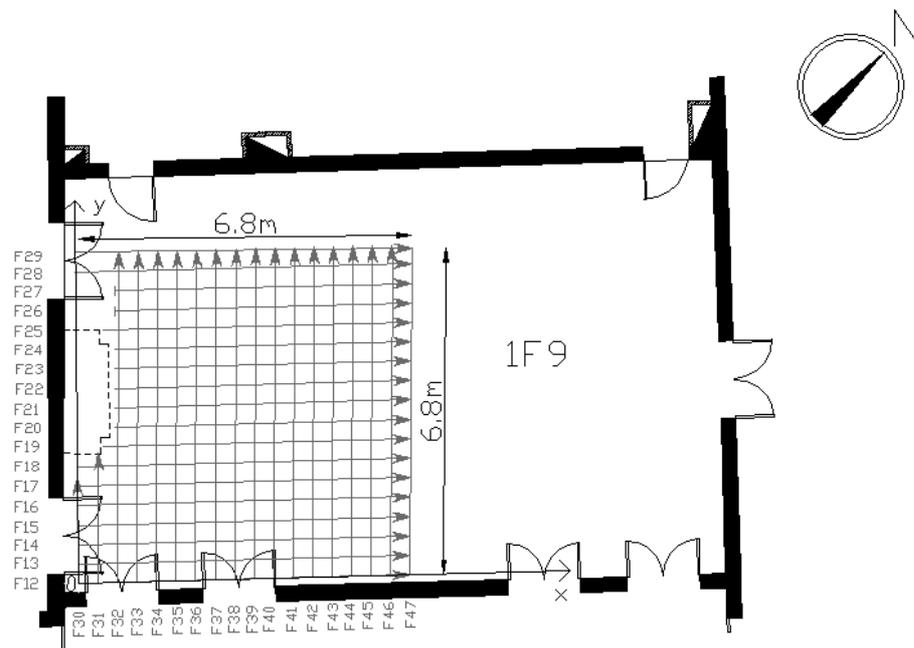


Figura 5.6: Griglia radar nel salone 1F9.



Figura 5.7: Traccia della griglia radar nel pavimento del salone 1F9.

Tabella 5.5: Settaggio antenna 900 MHz.

<i>File 012 - 047</i>			
<i>Antenna</i>	900 MHz	<i>Diel</i>	6
<i>Filtri</i>	LP-IIR 2500 HP-IIR 225	<i>Rate</i>	64
<i>Sample</i>	512	<i>Scan/unit</i>	100
<i>Format (bit)</i>	16	<i>Gain manuale</i>	GP1(dB) = -8 GP2(dB) = 22
<i>Range (ns)</i>	20	<i>Offset</i>	2.55

L'acquisizione dei dati è stata effettuata dapprima in direzione x ed in seguito in direzione y inserendo manualmente i marks per ogni punto segnato nel pavimento ossia con un passo di 40 cm; talvolta sono stati inseriti dall'operatore anche i markers di inizio e fine. In direzione x i dati sono stati acquisiti partendo con l'antenna attaccata alla parete sud-ovest del salone 1F9, ossia con una distanza centro antenna-parete pari a 23 cm, e fermandosi a 6.8 m; alcune linee radar (019-027) sono state invece rilevate con l'antenna appoggiata al focolare, presente in mezzeria della parete, la lunghezza complessiva dei radargrammi è quindi variabile da file a file. In direzione y i dati sono stati acquisiti posizionando l'antenna appoggiata alla parete sud-est del salone 1F9, ossia con una distanza centro antenna-parete pari a 23 cm, fino ad arrivare a 6.8 m; i file 030-031 presentano una lunghezza ridotta per la presenza del focolare.

Infine sono stati acquisiti, per la griglia preparata nell'angolo est della stanza 1F6 e di dimensioni pari a 3.6 x 4 m, 9 radargrammi in direzione x e successivamente 11 radargrammi in direzione y con lo stesso settaggio della strumentazione utilizzato in precedenza (Fig. 5.8-5.9 – Tab. 5.6). I dati in direzione x sono stati acquisiti con lo strumento posizionato sul primo mark segnato a terra, ossia a 40 cm dalla parete sud-est della stanza 1F6, fino ad arrivare ad appoggiare l'antenna alla parete nord-est. In direzione y, invece, i file acquisiti partono da 23 cm dalla parete sud-est, in quanto l'antenna è appoggiata ad essa, fino al segno a terra di 3.6 m. Nella stanza in esame, esattamente tra 1-2.4 m in direzione x e 2-2.5 m in direzione y, è presente uno scasso nel pavimento; durante l'acquisizione dati l'antenna è fatta passare sopra il telo in nylon che copre tale scasso.

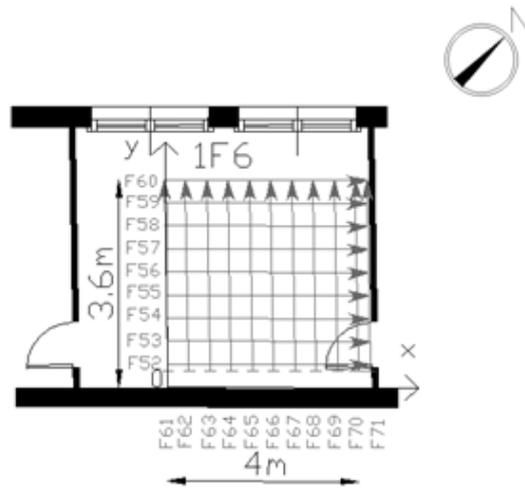


Figura 5.8: Griglia radar nel salone 1F6.



Figura 5.9: Acquisizione dati, in direzione y, nella griglia del salone 1F6.

Tabella 5.6: Settaggio antenna 900 MHz.

<i>File 052 - 071</i>			
<i>Antenna</i>	900 MHz	<i>Diel</i>	6
<i>Filtri</i>	LP-IIR 2500 HP-IIR 225	<i>Rate</i>	64
<i>Sample</i>	512	<i>Scan/unit</i>	100
<i>Format (bit)</i>	16	<i>Gain manuale</i>	GP1(dB) = -8 GP2(dB) = 22
<i>Range (ns)</i>	20	<i>Offset</i>	2.55

5.6 ELABORAZIONE DATI E VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI

Terminata la fase di acquisizione è necessario effettuare l'elaborazione dei dati, mediante l'utilizzo del software Radan 6.6 (GSSI); Radan è l'acronimo di RAdar Data ANalyzer ed è un software specifico, sviluppato nel corso degli ultimi 20 anni, per l'elaborazione ed interpretazione dei dati GPR. In particolare, per tutti i radargrammi rilevati nell'acquisizione dati è stata effettuata, in base alle caratteristiche del singolo file, la correzione del tempo zero, l'applicazione del background removal e l'applicazione del gain. La correzione del tempo zero consiste nell'aggiustare la posizione verticale dell'intero profilo del radargramma; è consigliato posizionare lo zero nel punto in cui l'asse orizzontale incontra il primo picco positivo della riflessione superficiale (Fig. 5.10).

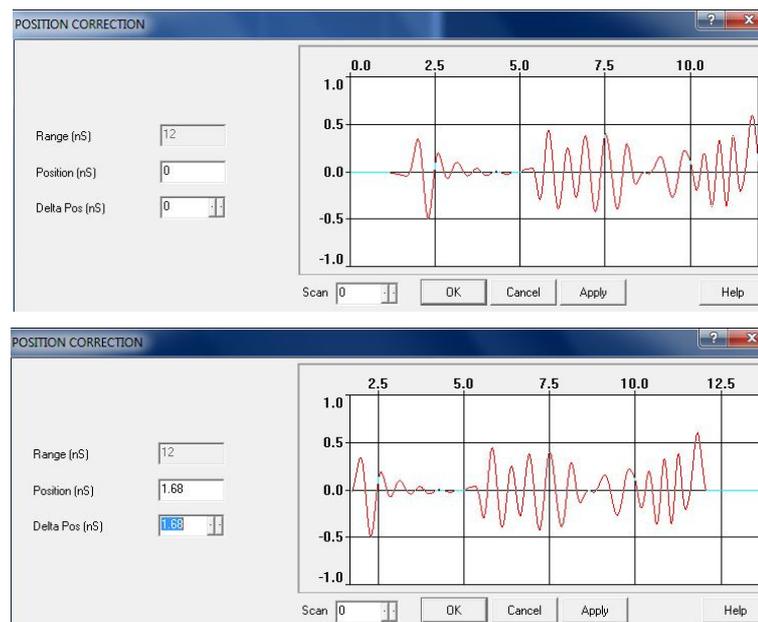


Figura 5.10: Riflessione dello scan iniziale del radargramma prima e dopo la correzione del tempo zero.

Successivamente viene applicato il background removal FIR che è un filtro necessario per la rimozione delle bande orizzontali presenti nel radargramma che, talvolta, possono oscurare le riflessioni di altri dati. Scelto opportunamente un determinato range di scan, il software calcola, in automatico, il valore medio delle ampiezze di tale range e lo sottrae ad ogni scan. Nella pratica è buona norma applicare il filtro su un numero medio di scan al fine di riuscire a cogliere sia la riflessione

superficiale sia eventuali difetti più profondi o meno riflettenti (Fig. 5.11). Infine è stato applicato al radargramma un *gain lineare* che amplifichi, ove necessario, il segnale e metta maggiormente in luce le riflessioni principali (Fig. 5.12).

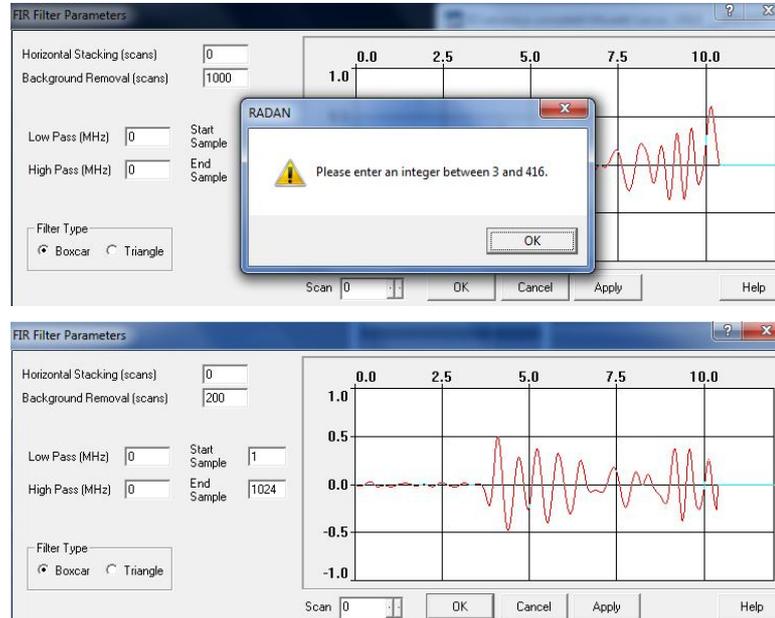


Figura 5.11: Applicazione del Background Removal FIR Filter.

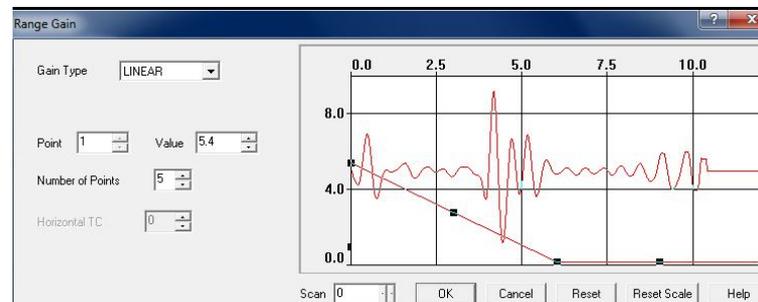


Figura 5.12: Applicazione del Gain Lineare a 5 punti.

Sono riportati, in seguito, alcuni esempi di radargrammi maggiormente significativi per le singole zone del primo piano della Palazzina della Viola in cui sono stati acquisiti i dati. I radargrammi sono sempre mostrati sia in versione originale sia in versione post-processing al fine di evidenziare gli elementi messi in evidenza mediante l'elaborazione dati.

5.6.1 Linea radar acquisita nella loggia frontale 1F2 e nel salone centrale 1F9

Per tale linea radar sono mostrati i file 009-011 che sono quelli che mettono maggiormente in luce i vari elementi presenti nei diversi solai attraversati dallo strumento nella fase di acquisizione dati. In particolare, la lunghezza complessiva della zona analizzata è pari a 12 m ed attraversa la loggia frontale 1F2 ed il salone centrale 1F9 situati al primo piano della Palazzina; da tali file è quindi visibile il pacchetto dei solai di entrambi gli ambienti in esame sovrastanti la loggia frontale GF1, la stanza GF6 ed il corridoio GF3 situati al piano terra (Fig. 5.13). Sul pavimento della loggia 1F2 e del salone 1F9 sono presenti, inoltre, degli scassi dai quali è possibile risalire agli elementi realmente presenti in ogni solaio e non tutti visibili dall'esterno (Fig.5.14).



Figura 5.13: Tipologia di solaio presente, rispettivamente, nella loggia GF1, nella stanza GF6 e nel corridoio GF3.

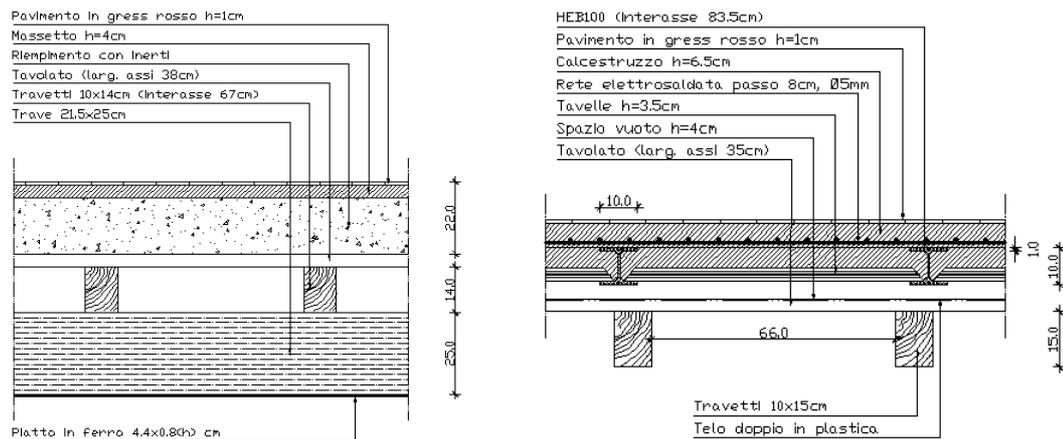


Figura 5.14: Sezione degli scassi presenti, rispettivamente, nella loggia 1F2 e nel salone 1F9.

Nel file 009 (Fig. 5.15-5.16), che copre i primi 5.5 m della linea radar complessiva, sono visibili la riflessione del *muro della loggia frontale GF1* (A), che è

molto più profonda delle altre iperboli in quanto la $\epsilon_{\text{muro}} > \epsilon_{\text{legno asciutto}}$ e quindi il segnale si propaga molto più lentamente, e le 5 iperboli attribuibili alla riflessione dei travetti lignei del solaio della loggia GF1 (B); l'ultima iperbole è meno chiara delle altre in quanto il travetto è attaccato alla parete tra la loggia e la stanza GF6 e la riflessione del legno potrebbe essere coperta dalla presenza di materiale metallico presente nella stanza successiva. L'interasse dei travetti lignei stimato dal radargramma è pari circa a 70 cm tranne, in alcuni punti, in cui le iperboli sembrano essere più vicine; tale dato conferma la misura effettuata nello scasso che fornisce un interasse di 67 cm. Inoltre è molto ben visibile la variazione dello spessore del solaio della loggia 1F2 (C) di cui viene stimata l'altezza sia iniziale (scan 3) sia finale (scan 526) e la riflessione della soglia tra la loggia 1F2 ed il salone 1F9 (D) della quale si stima la profondità; entrambe le grandezze sono confrontate con e valori delle misure effettuate in sito (Tabella 5.7-5.8).

Tabella 5.7: Stima dello spessore variabile del solaio della loggia 1F2.

SCAN	ϵ_{ghiaia}	v (m/ns)	ΔT (ns)	s (cm)	s_{SITO} (cm)
526	6	0,12	4,29	26	32
SCAN	ϵ_{ghiaia}	v (m/ns)	ΔT (ns)	s (cm)	s_{SITO} (cm)
3	6	0,12	2,54	15,3	17

Tabella 5.8: Stima della profondità della soglia tra la 1F2 e la 1F9.

Tretro soglia (ns)	v (m/ns)	Profondità calcolata (cm)	Profondità reale (cm)
1,58	0,134	10,6	7,5

Sotto la soglia è visibile un'iperbole molto riflettente pur essendo profonda (E) che potrebbe essere legata alla presenza di un elemento metallico sopra l'infisso WGF27 che è collocato tra la loggia GF1 e la stanza GF6 del piano terra. Nella parte finale del file, dopo i 4 m, si nota il cambiamento di solaio in quanto ora la linea radar è passata dalla loggia 1F2 al salone 1F9 ed è chiara la presenza di numerose iperboli superficiali dovute alla rete elettrosaldata (F) il cui passo stimato è pari a circa 12 cm contro gli 8 cm ricavati dai ferri presenti nello scasso. Tra 4 e 4.5 m è presente la forte riflessione della trave metallica (G) presente nel solaio della stanza GF6 e visibile in modo chiaro sin dal radargramma originale.

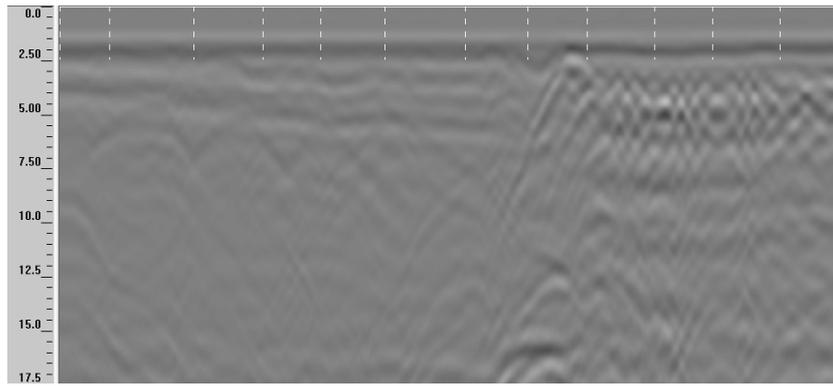
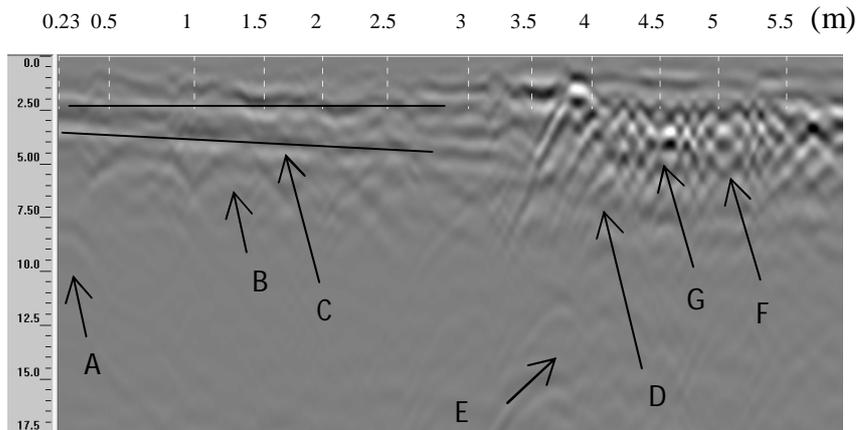


Figura 5.15: File 009 originale.



(ns)

Figura 5.16: File 009 post-processing (Background Removal = 500).

Il file 010 (Fig. 5.17-5.18) fino a 5.5 m si sovrappone alla parte finale della linea radar precedente e quindi sono colti gli stessi elementi già riportati per il file 009; nella seconda parte del radargramma, invece, è mostrata una porzione maggiore del salone 1F9 ed è possibile notare la riflessione delle 3 travi metalliche IPE presenti sul solaio della stanza GF6 (A). Non è colta la riflessione dei travetti lignei presenti al disotto delle travi metalliche in quanto il legno è più profondo e meno riflettente del metallo.

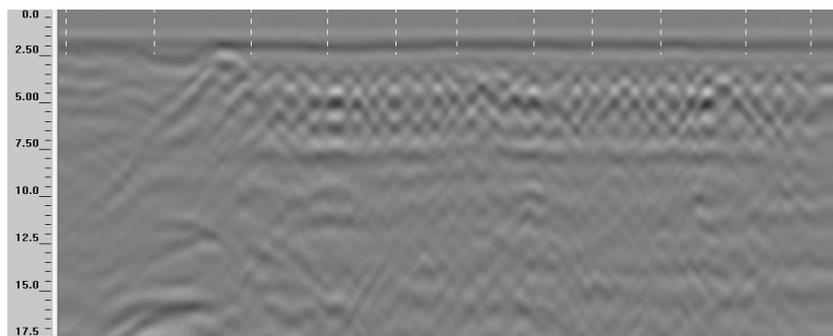
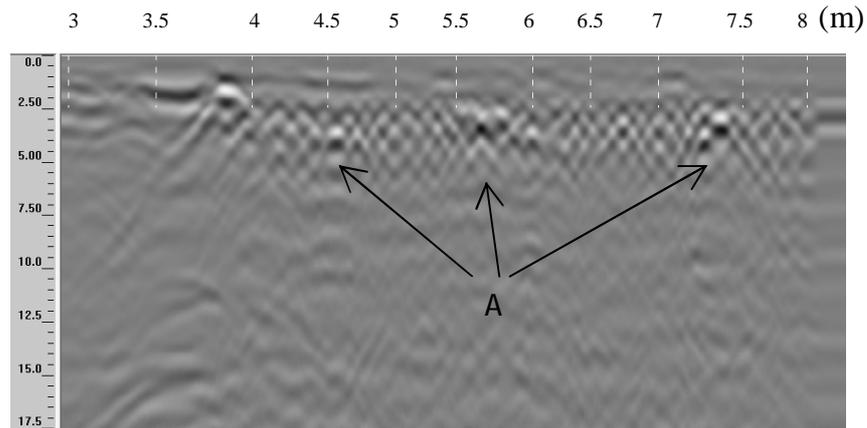


Figura 5.17: File 010 originale.



(ns)

Figura 5.18: File 010 post-processing (Background Removal = 470).

Il file 011 (Fig. 5.19-5.20), infine, si estende nella parte finale del salone 1F9 e mostra la differente tipologia di solaio tra la prima parte del file ed i 2 m finali; in particolare sono visibili, fino a 9 m, i travetti metallici IPE del soffitto della stanza GF6 (A) che non sono presenti nella parte finale del file in cui la linea radar è al disopra del soffitto a cassettoni del corridoio GF3.

Le riflessioni dei travetti lignei del cassettonato non sono visibili in quanto sono coperte dalla presenza di rete elettrosaldada (B) in tutto il solaio del salone 1F9.

La divisione tra la prima parte del file e la parte terminale è scandita anche dalla riflessione del tramezzo al piano terra tra la stanza GF6 ed il corridoio GF3 (C); dal radargramma è stato stimato il suo spessore pari a 35 cm contro i 32 cm, comprensivi dell'intonaco, misurati in sito.

Tra 9.5-10 m è inoltre presente una riflessione particolare dovuta alla presenza, in quella zona, dello scasso (D) che, essendo pieno di aria, mostra una riflessione superficiale anticipata rispetto a quella del pavimento circostante poiché la velocità di propagazione del segnale nell'aria è maggiore rispetto alla velocità di propagazione in altri materiali.

Nella parte finale del radargramma è visibile anche un ramo di iperbole che potrebbe essere legato alla riflessione del tramezzo tra il corridoio GF3 e la stanza GF12 del piano terra (E).

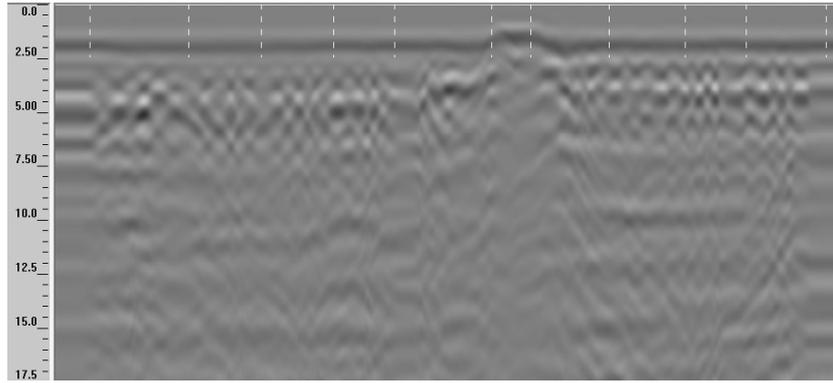


Figura 5.19: File 011 originale.

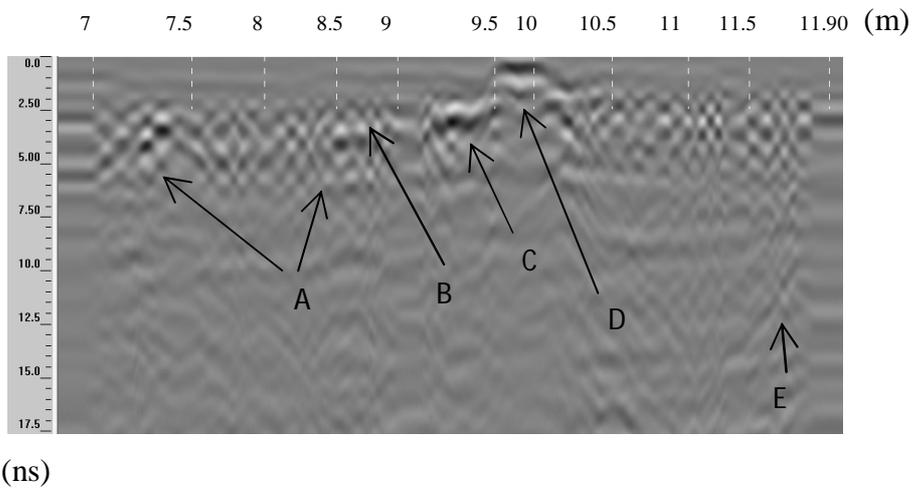


Figura 5.20: File 011 post-processing (Background Removal = 500).

5.6.2 Griglia radar acquisita nel salone centrale 1F9

Per la griglia radar rilevata nel salone 1F9 vengono riportati i radargrammi 012 e 028 acquisiti nella direzione x ed i radargrammi 036 e 041 acquisiti nella direzione y. Tale griglia è sovrastante le stanze GF9-GF8-GF7 ed il corridoio GF4 situati al piano terra della Palazzina (Fig. 5.21); durante l'acquisizione dei dati, effettuata in data 7 Aprile 2011, erano già stati abbattuti i tramezzi presenti in principio tra le stanze GF9, GF8 e GF7.



Figura 5.21: Tipologia di solaio presente, rispettivamente, nelle stanze GF9 + GF8 + GF7 e nel corridoio GF4.

Nel *file 012* (Fig. 5.22-5.23) sono nettamente visibili due grandi riflessioni tra 2.8-3.2 m e tra 5.6-6 m; la prima è attribuibile, secondo verifiche e misurazioni effettuate in sito, alla trave lignea presente sul solaio del soffitto della GF9 (A) e la seconda alla trave metallica presente sul solaio della GF8 (B); la riflessione della prima trave è più forte rispetto alla seconda in quanto la trave di legno è circondata da putrelle metalliche mentre la trave metallica è sottostante uno strato di mattoni e malta che affievolisce la riflessione. La riflessione della trave lignea stimata pari a circa 40 cm trova riscontro nelle misure effettuate in sito poiché l'elemento presenta una base di 30 cm ed è affiancato da due putrelle metalliche, disposte una a destra ed una a sinistra, di base pari a 4.5 cm. Analogamente, la riflessione della trave metallica, composta da due putrelle affiancate, è stimata pari a 20 cm contro i 24 cm reali misurati in cantiere.

Sono presenti, infine, in tutta l'estensione del radargramma iperboli superficiali ravvicinate dovute alla presenza della rete elettrosaldata sul solaio del salone 1F9 (C); nei punti in cui esse sono maggiormente chiare è possibile contare circa 6 iperboli ogni 80 cm per cui si può stimare un passo della rete pari a 13 cm; il valore ottenuto è simile a quello stimato nel file 009 che appartiene alla singola linea radar ed attraversa anch'esso, in parte, il salone 1F9. Le iperboli di tale rete, a tratti, sembrano scomparire e ciò potrebbe essere legato ad una zona marginale in cui le barre non sono presenti o ad una sovrapposizione di ferri; è lecito ricordare che, negli edifici risalenti a parecchi anni fa, le barre delle maglie di armatura venivano posizionati e collegati manualmente per cui la loro disposizione non è estremamente precisa come per le attuali maglie elettrosaldate che arrivano in cantiere già pronte per l'uso.

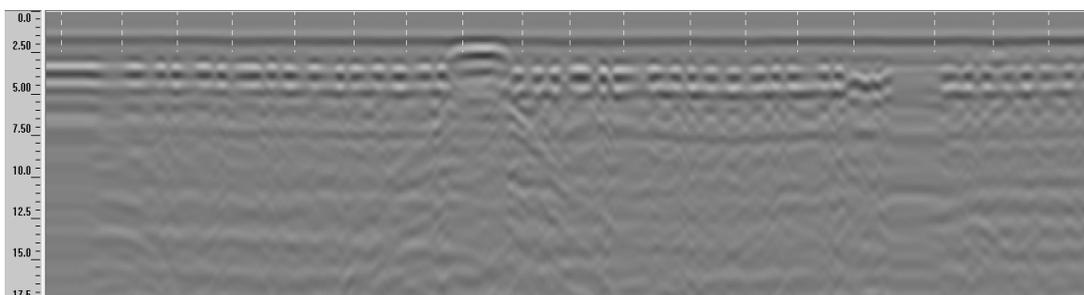


Figura 5.22: File 012 originale.

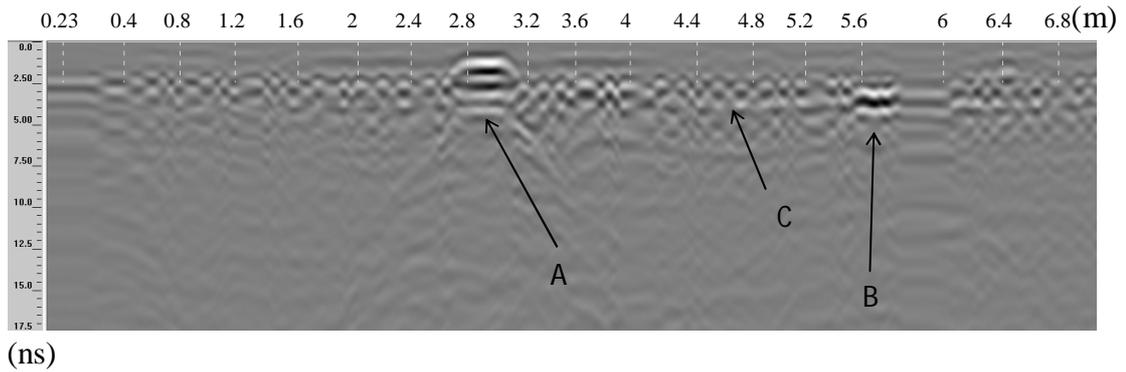


Figura 5.23: File 012 post-processing (Background Removal = 500).

Il file 028 (Fig. 5.24-5.25) appartiene alle linee radar finali, in direzione x, della griglia nel salone 1F9 ed, a differenza dei file precedenti lungo tale direzione, esso attraversa il solaio a cassettoni del corridoio GF4. La differenza di tipologia di solaio attraversato da tale radargramma rispetto al file 012 è nettamente visibile.

In particolare sono distinguibili le 8 riflessioni dei travetti lignei del soffitto a cassettoni del corridoio GF4 (A) e le iperboli superficiali della rete elettrosaldada presente nel salone 1F9 (B).

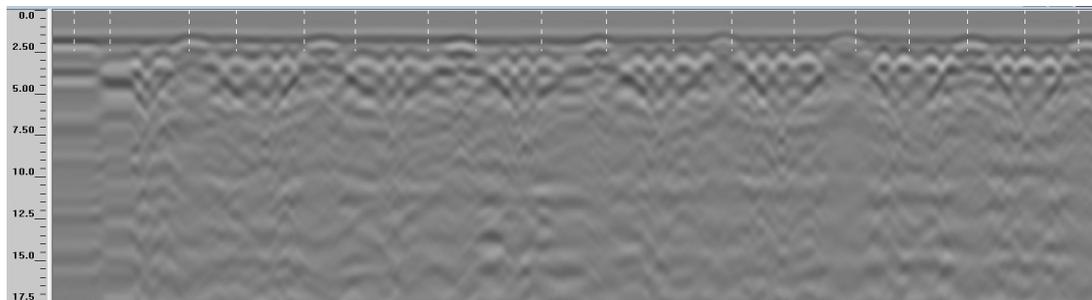


Figura 5.24: File 028 originale.

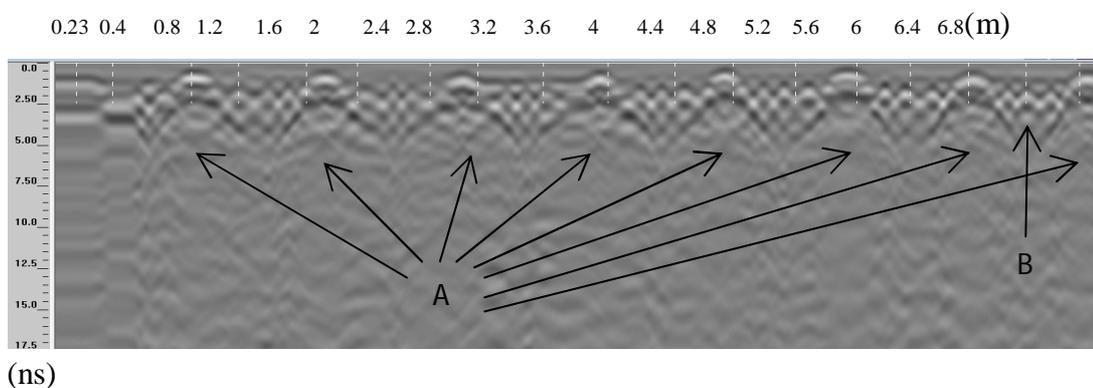


Figura 5.25: File 028 post-processing (Background Removal = 500).

Il file 036 (Fig. 5.26-5.27), perpendicolare ai precedenti, mostra la riflessione dei 6 travetti metallici secondari presenti sul soffitto della GF9+GF7 (A) ed il cambiamento di tipologia di solaio dopo i 6 m (B) in cui la linea radar è sovrastante il soffitto a cassettoni del corridoio GF4. L'interasse dei travetti metallici stimato sul radargramma è pari a 80 cm e l'errore commesso, rispetto alla misura rilevata in sito, è di circa 2 cm. È visibile, inoltre, esattamente come nei file precedenti la rete elettrosaldata (C).

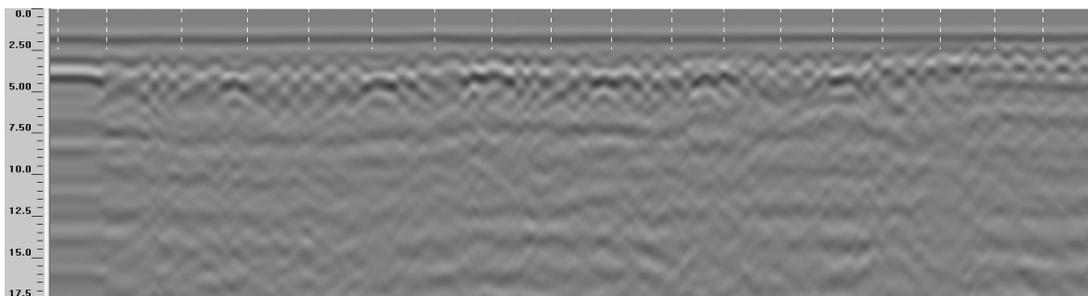
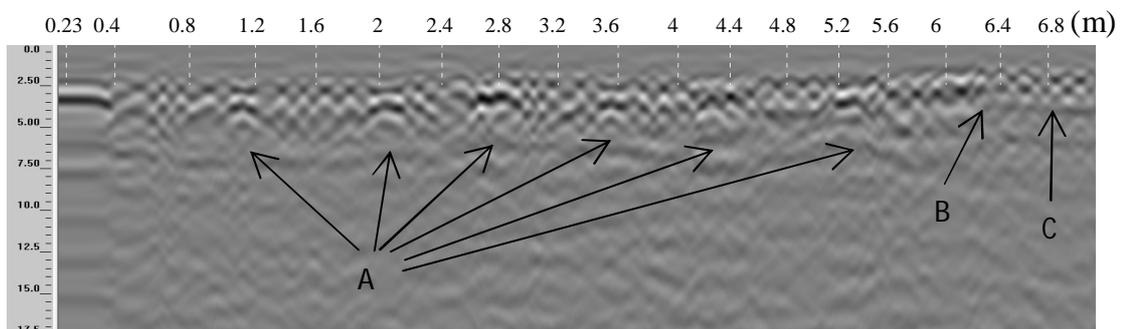


Figura 5.26: File 036 originale.



(ns)

Figura 5.27: File 036 post-processing (Background Removal = 500).

Nel file 041 (Fig. 5.28-5.29) sono visibili, come nel file precedente, le riflessioni dei travetti metallici secondari presenti sul soffitto della stanza GF9+GF7 (A) che in questo caso sono 8, il cambiamento di tipologia di solaio dopo i 6 m (B) e le iperboli superficiali della rete elettrosaldata (C).

È interessante notare come dal radargramma sembrerebbe che il 2°, 3°, 4°, 5° e 6° travetto metallico siano tra loro più ravvicinati rispetto agli altri situati agli estremi; tale affermazione è confermata dalla visualizzazione del solaio in esame poiché i travetti centrali sembrano avere un interasse minore rispetto ai travetti laterali (Fig. 5.30). Nel file è visibile, inoltre, la riflessione del tramezzo tra la stanza GF7 ed il corridoio GF4

(D) il cui spessore stimato è pari a 35 cm ed il suo valore reale, comprensivo dell'intonaco, è pari a 32 cm.

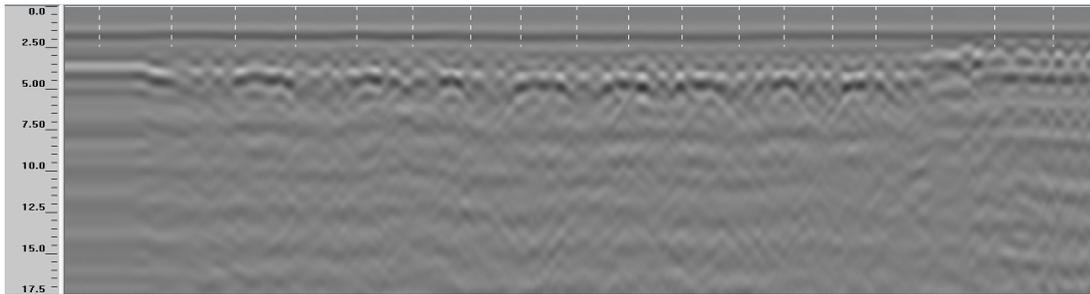
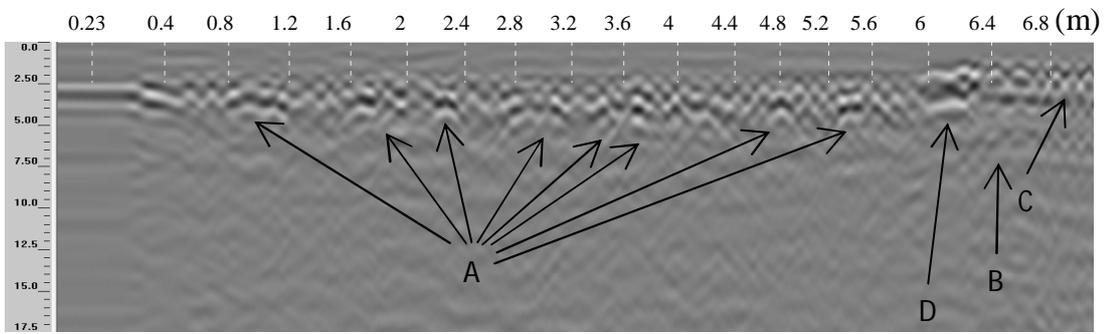


Figura 5.28: File 041 originale.



(ns)

Figura 5.29: File 041 post-processing (Background Removal = 500).



Figura 5.30: Solaio del soffitto della GF7+GF8+GF9.

5.6.3 Griglia radar acquisita nella stanza 1F6

Per la griglia radar della stanza 1F6 sono riportati i file 053 e 057, acquisiti in direzione x, ed i file 061, 063 e 069, acquisiti in direzione y. Tale griglia è posizionata al disopra delle stanze GF13, GF14 e GF15 del piano terra (Fig. 5.31) ed in data di

acquisizione dati i tramezzi tra la stanza GF14 e GF15 erano già stati demoliti. Nel pavimento della stanza 1F6 è presente, inoltre, uno scasso da cui è stato possibile risalire agli elementi costituenti il solaio in esame (Fig. 5.32); in sede di verifica dei dati, effettuata in cantiere il 23 Luglio 2011, il solaio della 1F6 era stato demolito ed è stato possibile osservare e rilevare tutti gli elementi principali della struttura portante della zona in esame (Fig. 5.33).



Figura 5.31: Tipologia di solaio presente sul soffitto, rispettivamente, della GF14+GF15 e della GF13.

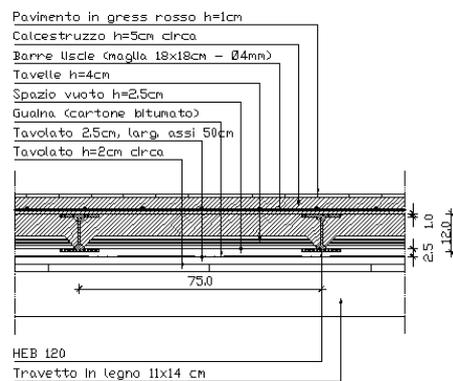


Figura 5.32: Sezione dello scasso presente sul pavimento della stanza 1F6.



Figura 5.33: Struttura portante del solaio della 1F6.

Nel file 053 (Fig. 5.34-5.35) sono presenti le tre riflessioni dei travetti metallici HEB 120 (A) presenti nel solaio della stanza 1F6 ed il ramo dell'iperbole di un eventuale quarto travetto metallico presente nel solaio della stanza adiacente 1F7 (B). L'interasse tra gli ultimi travetti è stimato pari a 80 cm ed è coerente con la misura rilevata in sito pari a 75 cm; il primo travetto, dalla verifica in cantiere, è effettivamente posto ad un interasse maggiore rispetto agli altri.

A 2 m è appena accennata una riflessione che potrebbe essere associata al tramezzo tra la stanza GF 14+GF15 e la stanza GF13 (C).

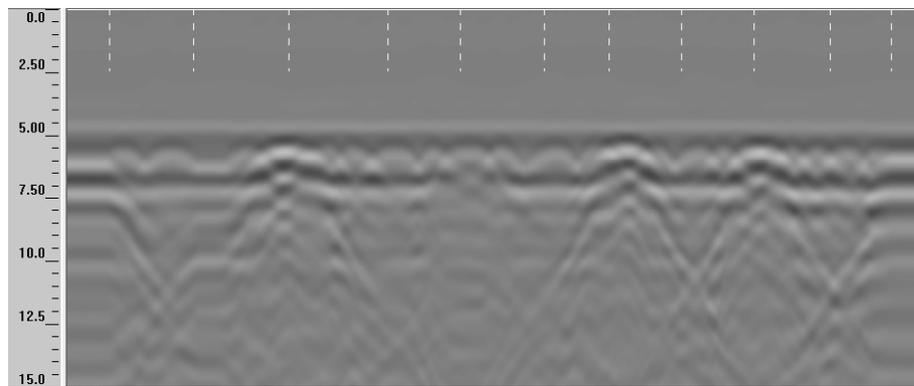
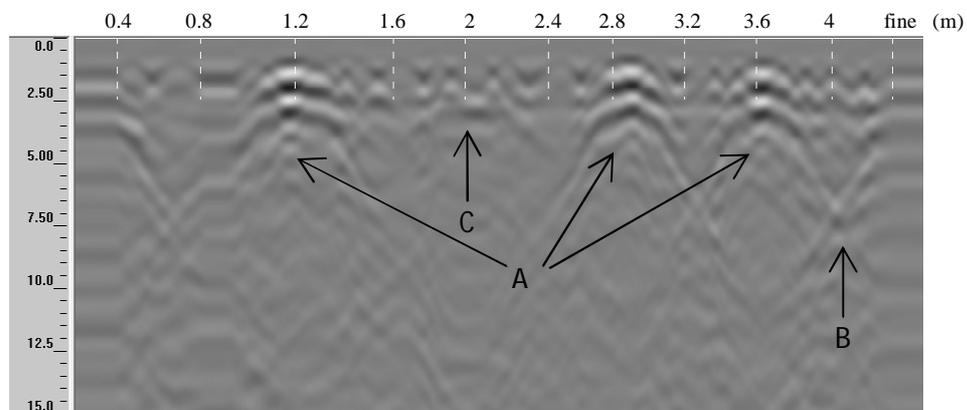


Figura 5.34: File 053 originale.



(ns)

Figura 5.35: File 053 post-processing (Background Removal = 450).

Nel file 057 (Fig. 5.36-5.37) vengono colte le stesse informazioni del file 053 a cui si aggiungono la riflessione, tra 0.8-2 m, dello scasso presente sul pavimento della 1F6 (A) e le iperboli superficiali della rete elettrosaldata (B) il cui passo è stimato pari a 17.7 cm compatibile con i 18 cm misurati in sito.

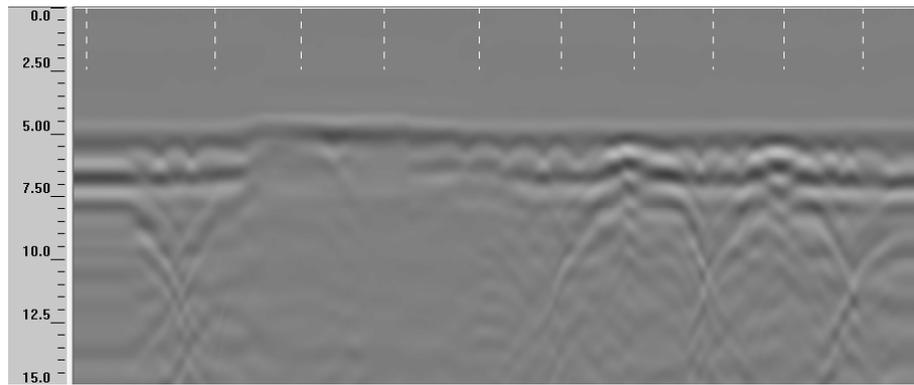
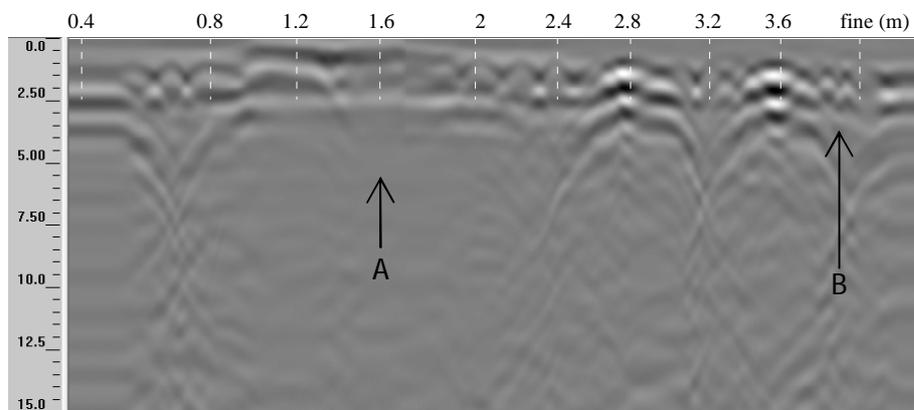


Figura 5.36: File 053 originale.



(ns)

Figura 5.37: File 053 post-processing (Background Removal = 450).

Nel *file 061* (Fig. 5.38-5.39) è possibile vedere, in particolar modo nel file originale, le iperboli dei travetti lignei secondari del solaio della 1F6 (A); essendo le riflessioni difficilmente identificabili le une dalle altre non è possibile quantificare l'interasse e l'effettivo numero di travetti colti con tale linea. La debole riflessione di tali elementi può derivare, oltre al fatto che sono molto profondi e sottostanti ad elementi metallici, dalla presenza nel soffitto di cassettoni con delle cornici nel contorno ulteriormente in legno; il segnale radar potrebbe quindi fare molta fatica a penetrare attraverso i diversi strati di legno. Sono presenti, inoltre, le iperboli dei ferri di armatura (B) ma esse non sono costanti su tutta l'estensione del radargramma; probabilmente ciò è sintomo della presenza non di una vera e propria rete elettrosaldata ma di singole barre. Dal file originale, infine, essendo molto chiara la riflessione dell'intero pacchetto del solaio della stanza 1F6 è stato stimato il suo spessore complessivo, non considerando i travetti metallici e lignei, e confrontato con le misure rilevate dallo scasso (Tabella 5.9).

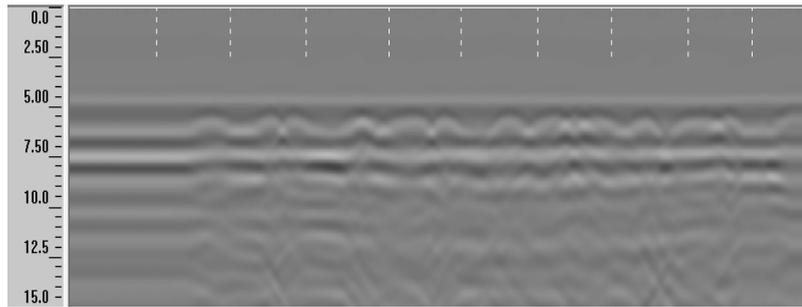
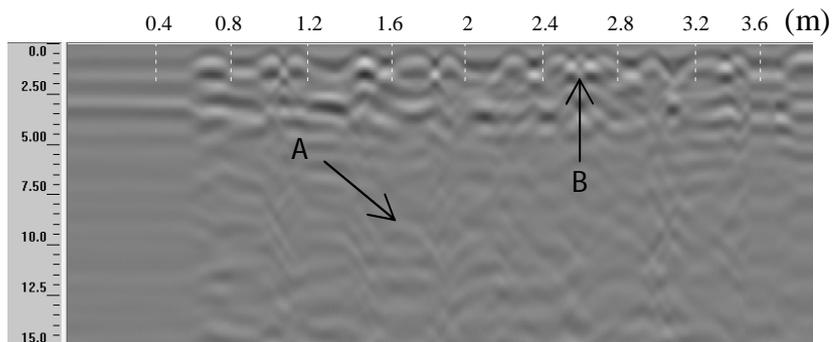


Figura 5.38: File 061 originale.



(ns)

Figura 5.39: File 061 post-processing (Background Removal = 400).

Tabella 5.9: Stima dello spessore totale del solaio della stanza 1F6.

ϵ_{media}	v (m/ns)	s (cm)	$s_{stto}(cm)$
5	0,13	25	23.5

Il file 063 (Fig. 5.40-5.41) mostra le stesse informazioni descritte nel file precedente con l'aggiunta, tra 2.4-2.8 m, della riflessione superficiale anticipata rispetto al resto della stanza per la presenza dello scasso sul pavimento della 1F6 (A).

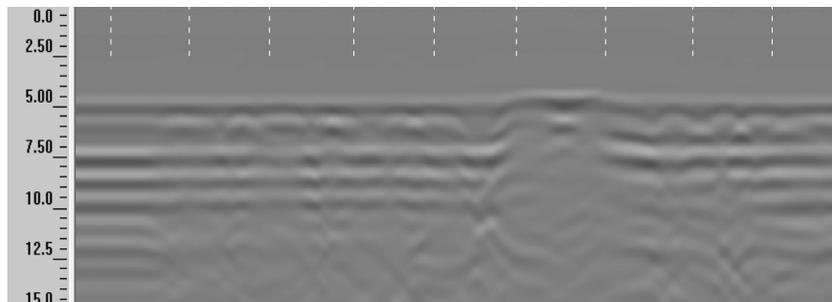
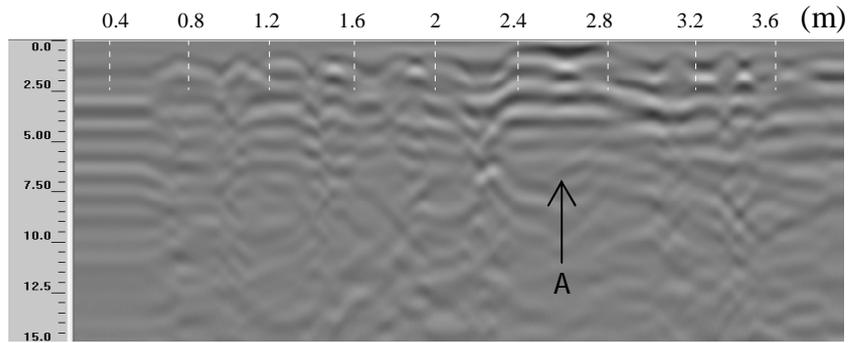


Figura 5.40: File 063 originale.



(ns)

Figura 5.41: File 063 post-processing (Background Removal = 400).

Il *file 069* (Fig. 5.42-5.43), infine, è nettamente differente dagli altri radargrammi in quanto la sua estensione è totalmente al disopra di un travetto metallico HEB 120 presente nel solaio della 1F6 (A) e parallelo a tale linea radar.

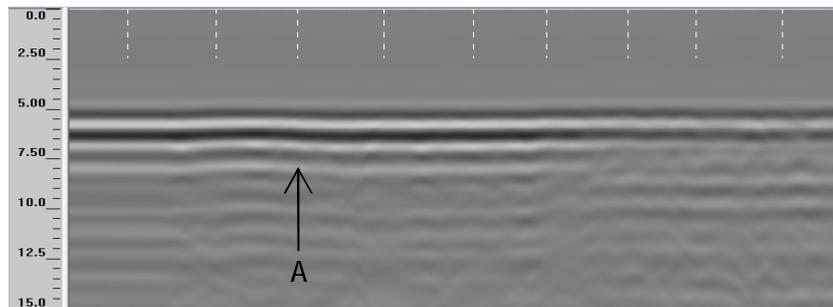
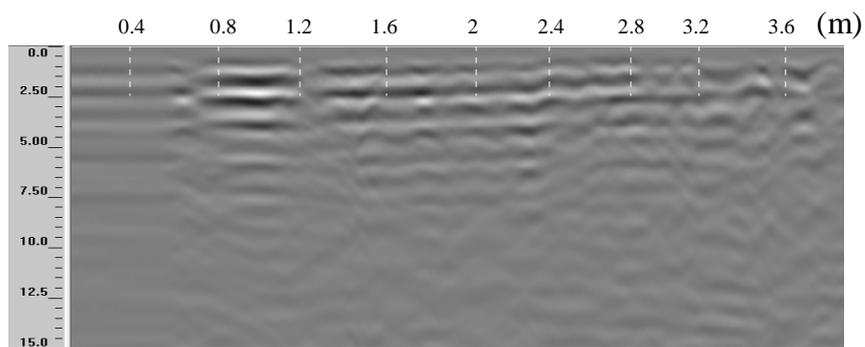


Figura 5.42: File 069 originale.



(ns)

Figura 5.43: File 069 post-processing (Background Removal = 380).

Per la griglia della stanza 1F6 è stata realizzata, inoltre, una rappresentazione 3D che mostrasse l'insieme delle linee radar acquisite in entrambe le direzioni. Per comporre un modello tridimensionale occorre, all'interno del software Radan 6.6, impostare le caratteristiche della griglia in esame ed associare ad ogni linea radar il file

corrispondente (Fig. 5.44). Per una corretta modellazione nello spazio è importante che tutti i file inseriti abbiano il passo tra i markers costante ed uguale tra loro; a tal fine, occorre eliminare eventuali marks doppi, iniziali o finali ed impostare, per ogni file, lo stesso valore di m/mark. Inserendo tale valore i markers, segnati manualmente dall'operatore in fase di acquisizione, vengono riequilibrati e spalmati su tutta la lunghezza del radargramma acquisito e lo zero spaziale del file coinciderà con il primo marker inserito (Fig 5.45). Infine, per una migliore visualizzazione del modello 3D, occorre che i file associati ad ogni linea radar siano stati elaborati mediante la correzione del tempo zero, l'applicazione del gain e della migrazione. La migrazione è necessaria per ridurre gli effetti della diffrazione dell'energia che, talvolta, tendono a falsare le caratteristiche degli elementi posti più in profondità; mediante l'applicazione di tale filtro le parabole collassano in un unico punto situato, esattamente, nella posizione in cui si trova il riflettore.

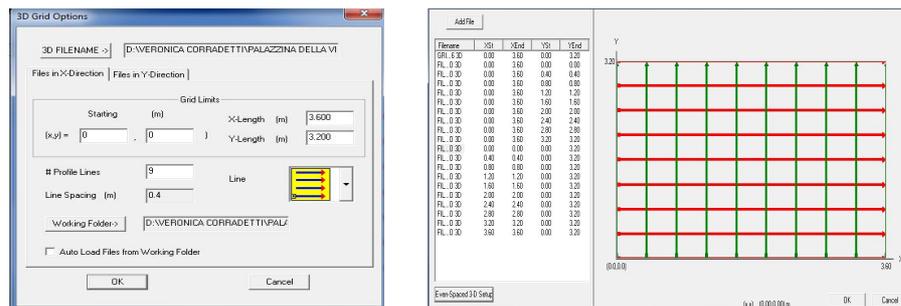


Figura 5.44: Impostazioni griglia e creazione del file 3D.

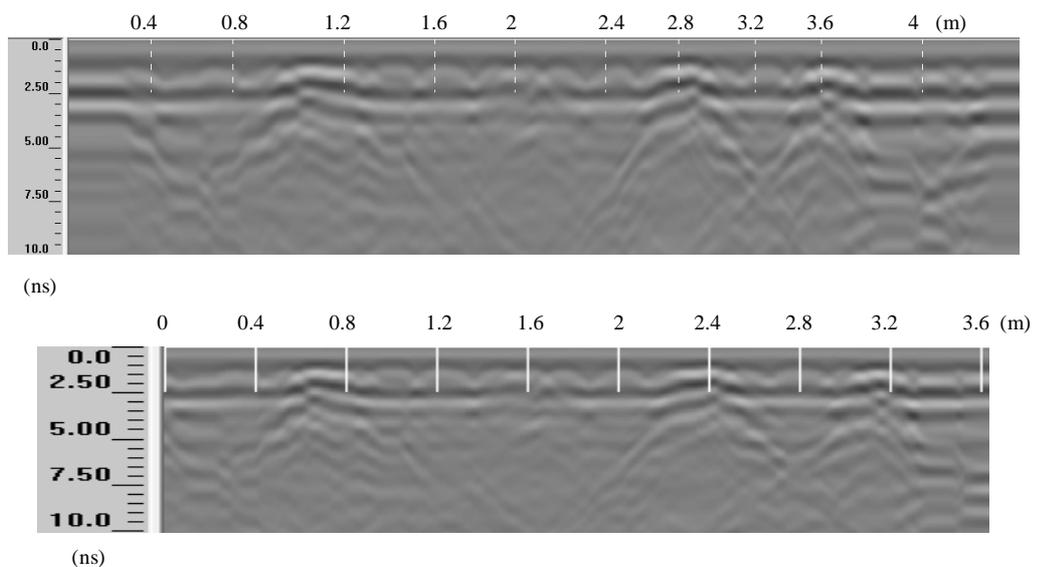
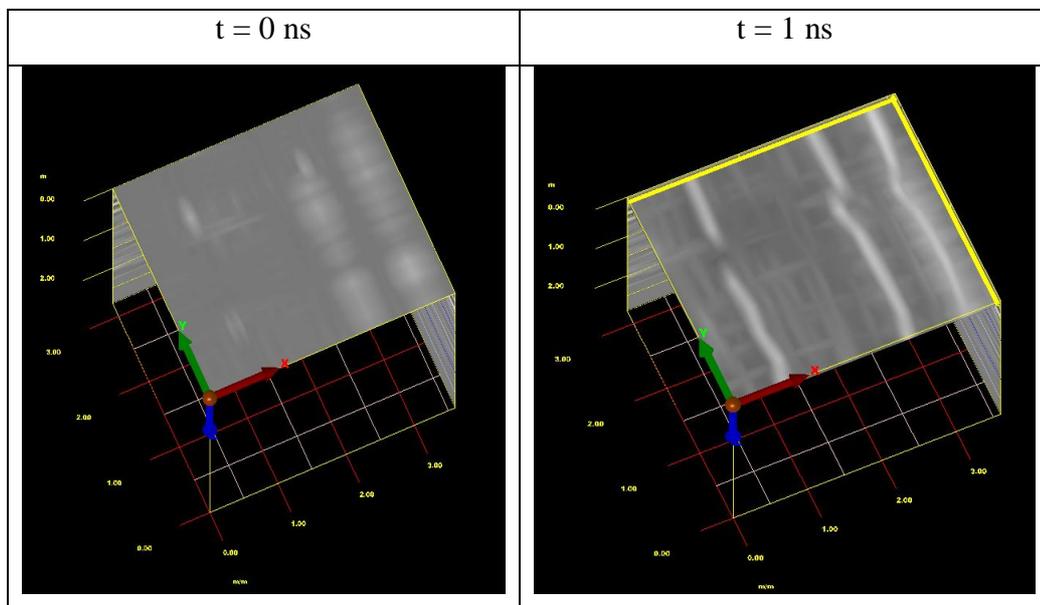
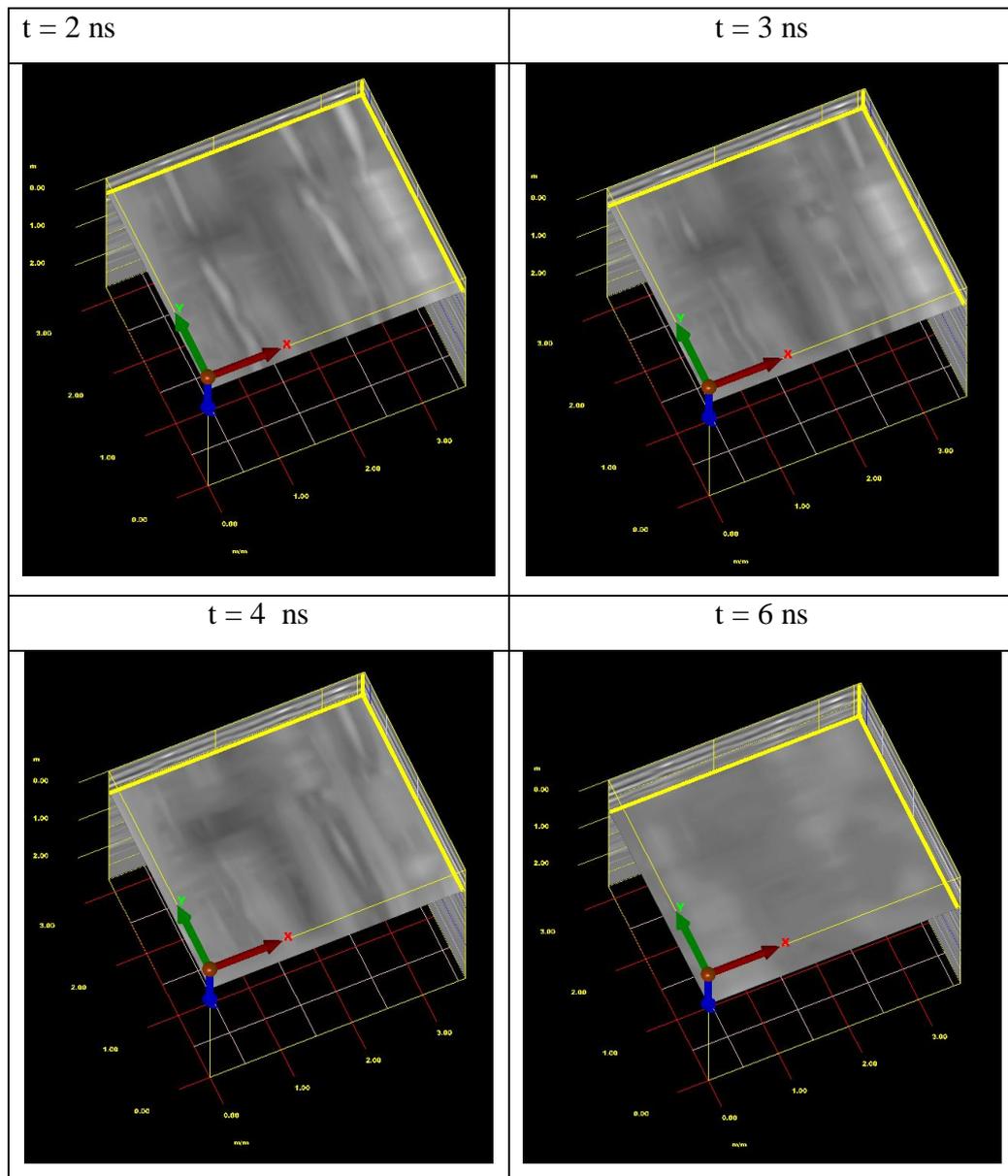


Figura 5.45: Radargramma originale con i marks manuali inseriti durante l'acquisizione e radargramma modificato inserendo il valore di m/mark = 0.40.

Inseriti tutti i dati necessari, precedentemente descritti, il software fornisce in output il modello tridimensionale della griglia radar e permette la visualizzazione, al variare dei ns, o della profondità o degli scan, delle diverse sezioni orizzontali ottenute. Per la griglia in esame, acquisita nella stanza 1F6, sono riportate in seguito le sezioni maggiormente significative estrapolate dalla rappresentazione 3D ottenuta ed appartenenti al range temporale 0-6 ns (Tab. 5.10). È stato notato che al tempo pari a 0 ns le informazioni mostrate non sono ancora significative mentre al tempo pari a 1 ns sono nettamente visibili sia le riflessioni dei tre travetti metallici HEB del solaio della stanza 1F6 sia la presenza dei ferri della rete elettrosaldata distribuita su tutta la zona in esame. Procedendo con l'avanzare del tempo, e quindi della profondità, si nota come le riflessioni metalliche, ben visibili dalle sezioni precedenti, tendono ad affievolirsi ed iniziano ad apparire, seppur in modo molto fioco, le riflessioni dei travetti lignei sottostanti i travetti metallici ($t = 2/3$ ns). Al tempo pari a circa 4 ns sembrano essere visibili, in alcuni punti, le riflessioni dei cassettoni del soffitto sottostante la stanza 1F6. Infine, al tempo pari a 6 ns, si torna ad una situazione simile alla sezione iniziale in cui non sono presenti dati significativi.

Tabella 5.10: Sezioni maggiormente significative estrapolate dalla rappresentazione 3D della griglia radar acquisita nella stanza 1F6.





Al termine della visualizzazione degli esempi maggiormente significativi dei radargrammi, rilevati sui solai di tre diverse zone del primo piano della Palazzina della Viola, è possibile affermare che l'acquisizione dati, mediante l'utilizzo dell'antenna 900 MHz avente risoluzione pari a circa 5 cm, ha prodotto buoni risultati ed ha permesso l'individuazione degli elementi principali costituenti le diverse tipologie di solaio presenti. Nello specifico è stato possibile indicare per i diversi elementi, ed in modo piuttosto corretto, il materiale costituente, la posizione, l'interasse e le loro dimensioni geometriche principali. Le maggiori difficoltà riguardano l'individuazione degli elementi lignei in quanto la loro debole riflessione è stata, in quasi la totalità dei file, coperta dalla forte riflessione degli elementi metallici ed in particolar modo della rete elettrosaldata presente nel solaio delle stanze del primo piano. In sintesi è lecito

affermare che il metodo GPR, in seguito all'elaborazione dei dati acquisiti, ha fornito un notevole contributo per la conoscenza globale del manufatto e l'individuazione della sua struttura principale non visibile ad occhio nudo.

6 INDAGINE GPR SU MURETTI

Mediante l'utilizzo della tecnica GPR sono stati acquisiti dati radar, in data 20 Luglio 2011, su muretti in pietra leccese realizzati all'interno del laboratorio CETMA (Brindisi) al fine di indagare sulla struttura portante degli stessi, individuare difetti di varia dimensione e materiale presenti all'interno e rilevare la risalita dell'acqua nel muretto immerso in una soluzione di acqua e cloruri.

6.1 SCOPO DELLA PROVA

In tale analisi specifica è stata utilizzata la tecnica del GPR (Ground Penetrating Radar) per risalire, in modo non distruttivo, alla struttura, in termini di corsi di mattoni, giunti di malta ed eventuali difetti presenti, dei muretti analizzati in quanto essi sono intonacati e non è visibile la loro conformazione interna.

Sono state eseguite inoltre acquisizioni radar al fine di cogliere il fenomeno di risalita dell'acqua nel muretto immerso, rispettivamente per 2h e 30' e 5h, in una soluzione di acqua e cloruri di sodio presenti allo 0.05 %.

6.2 OGGETTO DELLA PROVA: MURETTI IN PIETRA LECCESE (CETMA, Brindisi)

L'analisi sui muretti in pietra leccese è stata svolta presso il laboratorio CETMA di Brindisi dove sono state prese in considerazione due differenti strutture rappresentanti, per caratteristiche e materiali, le tipiche costruzioni del Sud Italia.

In particolare sono stati considerati, per la prova in esame, due differenti muretti, W1 e W2, di dimensioni pari a 146 x 150 x 25 cm³; il muretto W1 è caratterizzato da una muratura a singola foglia ed è intonacato in entrambi i fronti, il muretto W2 è identico al precedente ma contiene difetti che si differenziano tra loro per dimensione e materiale (Fig.6.1).



Figura 6.1: Prospetto dei muretti W1 e W2 pre-intonaco.

6.3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'acquisizione dei dati radar sui muretti di pietra leccese è stata effettuata sia mediante l'utilizzo di un'antenna da 900 MHz, descritta in precedenza per le prove effettuate alla Palazzina della Viola (cfr Cap. 5.3), sia mediante l'utilizzo di un'antenna Palm da 2GHz (Fig. 6.2 – Tab. 6.1). L'antenna Palm offre all'operatore la possibilità di raggiungere, data la sua piccola dimensione, punti inaccessibili con altre tipologie di antenna quali, ad esempio, angoli ed ostruzioni, ed inoltre, è dotata di un odometro che è in grado di valutare in modo corretto le distanze percorse dall'antenna durante l'analisi.

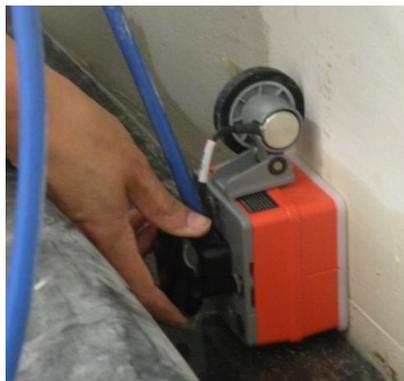


Figura 6.2: Antenna Palm 2 GHz.

Tabella 6.1: Scheda tecnica dell'antenna Palm 2 GHz.

Caratteristiche Antenna Palm 2 GHz	
Frequenza centrale	2000 MHz
Range di profondità di indagine	0-0.4 m

Dimensioni	10.4 x 9.1 x 15.4 cm
Lunghezza cavo di controllo	7 m
Peso	0.49 Kg (senza cavo di controllo) 1.5 Kg (con cavo di controllo)
Modello	62000

6.4 PROCEDURA PREPARATORIA

Per effettuare l’acquisizione dei dati radar su muretti di pietra leccese è stata necessaria, all’interno del laboratorio CETMA di Brindisi, la realizzazione degli stessi (Fig.6.3). I due muretti in esame, W1 e W2, sono stati costruiti mediante l’utilizzo di mattoni di pietra leccese di tipo “oro pallido” (25 x 25 x 50 cm³) e giunti di malta di spessore pari a 1.5 cm, composti per 1/3 da pasta di calce e per 2/3 da polvere di pietra leccese. All’interno del muretto W2, a differenza del muretto W1 definito “di riferimento”, sono stati inseriti difetti in differenti posizioni (Fig.6.4 – Tab. 6.2).



Figura 6.3: Realizzazione, rispettivamente, del muretto W1 (struttura di riferimento) e del muretto W2 (struttura contenente difetti).

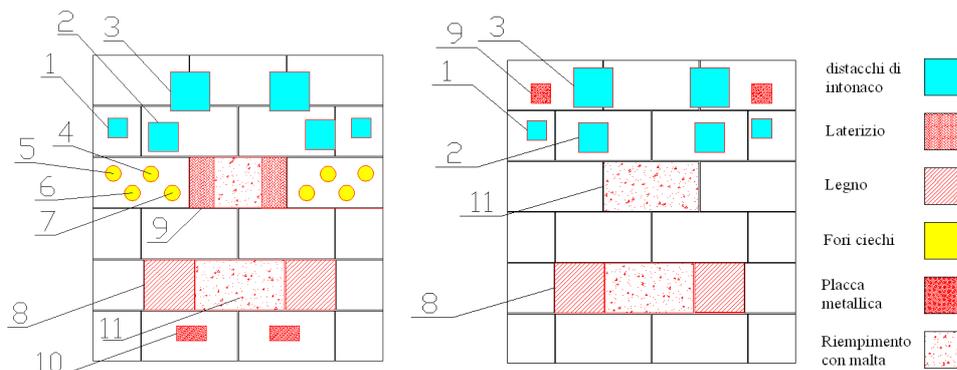


Figura 6.4: Posizione dei difetti sul fronte e sul retro del muretto W2.

Tabella 6.2: Caratteristiche dei difetti inglobati nel muretto W2.

<u>DIFETTI</u>	<u>CARATTERISTICHE</u>	<u>CODICE</u>
Distacco di intonaco realizzato con fogli di Teflon	Dimensioni: 10 x 10 cm ²	1
	15 x 15 cm ²	2
	20 x 20 cm ²	3
Fori ciechi	Diametro: 80 mm	5
	Profondità: 5 cm	6
	10 cm	4
	15 cm	7
Inserti in legno	20 cm	7
	Dimensioni 25 x 25 x 25 cm ³	8
Differenti tipi di mattoni	Dimensioni 25 x 12.5 x 4.5 cm ³	9
Inclusioni metalliche	Dimensioni 70 x 150 mm ²	10
Mattoni con riempimento in malta	Spessore: 12.5 cm	11

Entrambi i muretti sono stati intonacati mediante l'apposizione di uno strato di intonaco a base di cemento sul fronte sinistro, uno strato di intonaco di calce sul fronte destro, tre strati di intonaco di calce sul retro sinistro e due strati di intonaco di calce sul retro destro (Fig. 6.5). Poiché l'analisi sui muretti prevede anche una fase in cui il muretto W1 viene immerso in una soluzione di acqua e cloruro di sodio è stato, infine, realizzato un serbatoio in legno per la raccolta dell'acqua di dimensioni pari a 183 x 55 x 15 cm³; i lati di tale serbatoio sono stati ricoperti con teli in plastica impermeabili.

**Figura 6.5:** Applicazione dello strato di intonaco di calce sul fronte del W1.

Terminata la fase di realizzazione dei muretti è stata programmata la griglia di linee radar da eseguire sia nel fronte sia nel retro degli stessi. In riferimento al muretto W1, privo di difetti, è stata progettata una maglia di acquisizione dati piuttosto regolare che coprisse in tutta l'estensione il muretto in esame e riuscisse a cogliere la struttura composta da mattoni in pietra leccese e giunti in malta (Fig. 6.6).

Per quanto riguarda il muretto W2, contenente difetti, è stata studiata una griglia di acquisizione dati focalizzata alle posizioni specifiche dei singoli difetti al fine di cogliere, durante l'elaborazione dati, le loro caratteristiche principali (Fig. 6.7). L'inizio di ogni singola linea delle griglie proposte è stato segnato, mediante un gesso colorato, sull'intonaco dei muretti.

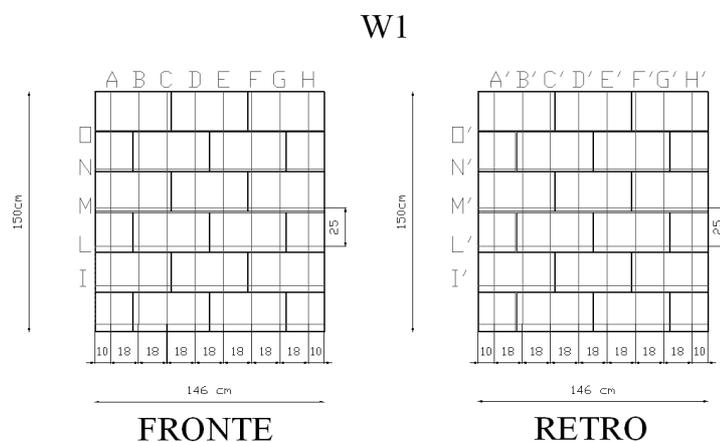


Figura 6.6: Griglia per l'acquisizione dei radargrammi sul muretto W1.

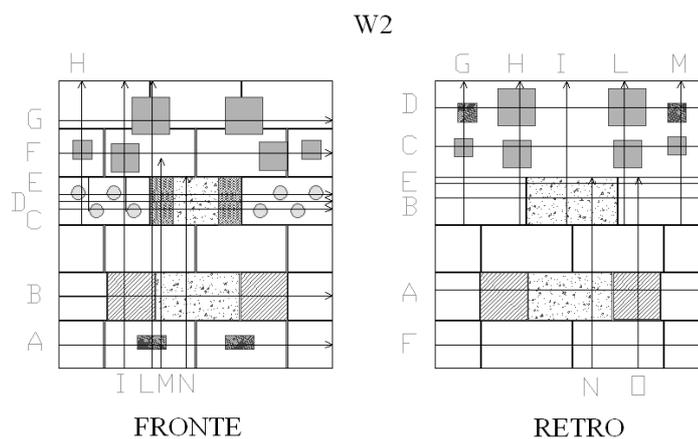


Figura 6.7: Griglia per l'acquisizione dei radargrammi sul muretto W2.

6.5 ACQUISIZIONE DATI

I dati radar sui muretti in pietra leccese W1 e W2 sono stati acquisiti in data 20 Luglio 2010 presso il laboratorio di ricerca CETMA di Brindisi. I primi radargrammi

sono stati rilevati sul fronte e sul retro del muretto asciutto W1 mediante l'utilizzo dell'antenna 900 MHz che, prima dell'analisi, è stata opportunamente settata (Tab. 6.3).

Tabella 6.3: Settaggio antenna 900 MHz.

<i>File 001 - 026</i>			
<i>Antenna</i>	900 MHz	<i>Diel</i>	6.26
<i>Filtri</i>	LP-IIR 2500 HP-IIR 225	<i>Rate</i>	64
<i>Sample</i>	512	<i>Scan/unit</i>	30
<i>Format (bit)</i>	16	<i>Gain manuale</i>	GP1(dB) = -1 GP2(dB) = 12
<i>Range (ns)</i>	12	<i>Offset</i>	1.04

Nello specifico sono stati acquisiti dati prima sul retro del muretto (file 01-13) poi sul fronte (file 14-26) realizzando delle linee radar sia verticali, dal basso verso l'alto, sia orizzontali, da sinistra verso destra (Fig. 6.8). I marks, segnati manualmente dall'operatore, sono stati inseriti sia in corrispondenza dei profili della griglia, realizzata mediante gesso sull'intonaco del muretto, sia all'inizio ed alla fine dell'acquisizione. Nei profili verticali l'antenna è fatta partire con il cavo posteriore attaccato al bordo inferiore del muretto, ossia con una distanza centro antenna- bordo pari a circa 23 cm, ed è stata spostata fino a fermarsi con il fronte sul bordo superiore del muretto, ossia con una distanza centro antenna- bordo di circa 16 cm. Nei profili orizzontali, avendo a disposizione spazio maggiore, l'antenna viene fatta partire ed arrivare direttamente con il centro antenna in corrispondenza del bordo sinistro e destro del muretto (Fig. 6.9).

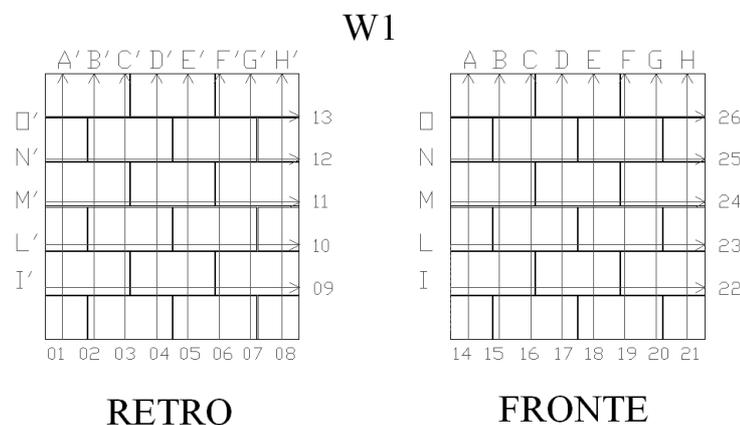


Figura 6.8: Linee radar verticali ed orizzontali per l'acquisizione dati sul muretto W1.

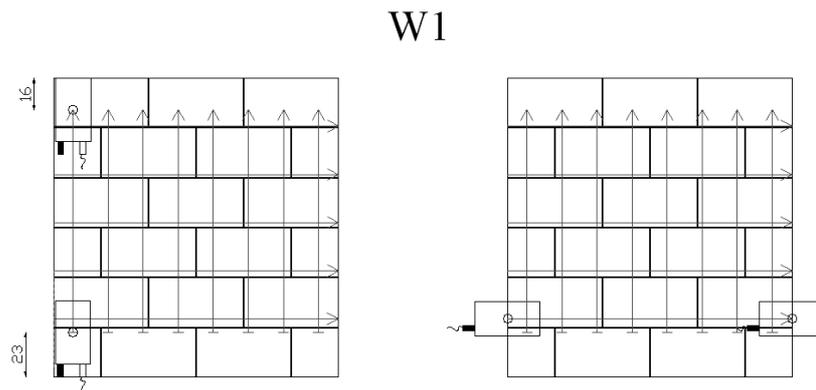


Figura 6.9: Posizionamento antenna 900 MHz e reale estensione delle linee radar verticali ed orizzontali.

In seguito, tutte le altre acquisizioni sono state effettuate mediante l'utilizzo dell'antenna Palm 2 GHz opportunamente settata in sito (Tab. 6.4). In particolare sono state dapprima rilevate le linee radar verticali ed orizzontali sul fronte (file 27-39) e sul retro (file 40-52) del muretto W1 (Fig. 6.10). I marks manuali, inseriti dall'operatore, sono in corrispondenza dei profili della griglia radar segnata sull'intonaco dei muretti; i markers iniziali e finali sono inseriti in modo automatico dall'antenna. Nei profili verticali, dal basso verso l'alto, l'antenna parte con la ruota appoggiata nel bordo inferiore del muretto e viene arrestata con il centro antenna corrispondente al bordo superiore; nei profili orizzontali, da sinistra verso destra, l'antenna è fatta partire con la ruota fuori dal muretto e la sua corsa termina con il centro antenna esattamente sopra il bordo laterale (Fig. 6.11-6.12).

Tabella 6.4: Settaggio antenna Palm 2 GHz.

<i>File 052 - 071</i>			
<i>Antenna</i>	2 GHz	<i>Diel</i>	6,26
<i>Sample</i>	1024	<i>Rate</i>	64
<i>Format (bit)</i>	16	<i>Scan/unit</i>	300
<i>Range (ns)</i>	12	<i>Gain manuale</i>	GP1(dB) = 7 GP2(dB) = 68
<i>Offset</i>	- 14.08	<i>surface</i>	0 %

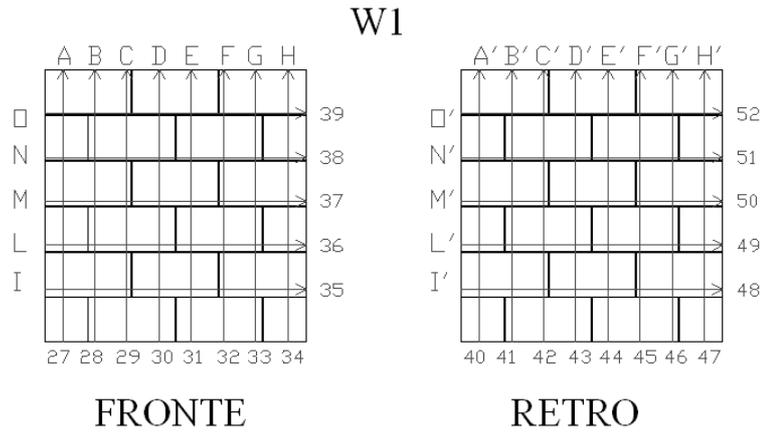


Figura 6.10: Linee radar verticali ed orizzontali per l’acquisizione dati sul muretto W1.

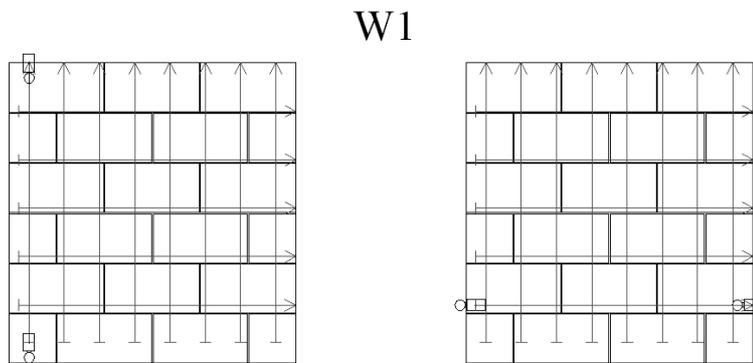


Figura 6.11: Posizionamento antenna Palm 2 GHz e reale estensione delle linee radar verticali ed orizzontali.

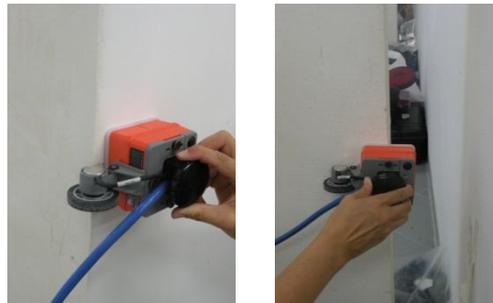


Figura 6.12: Particolari del posizionamento dell’antenna Palm 2 GHz nei profili orizzontali.

Al termine di tali acquisizioni sul muretto W1, alle ore 12.20 circa, viene preparata e fatta fluire, nel serbatoio realizzato alla base, una soluzione di acqua e cloruro di sodio allo 0.05 % (Fig. 6.13-6.14) per poi proseguire con l’acquisizione dati mediante linee radar sul fronte del muretto W2 contenente difetti.

In particolare sono state rilevate linee orizzontali, da sinistra verso destra, passanti sopra i sette profili segnati sull’intonaco durante la procedura preparatoria; il

posizionamento dell'antenna Palm, all'inizio ed alla fine di ogni acquisizione, è lo stesso descritto per i file precedenti (Fig. 6.15).



Figura 6.13: Preparazione della soluzione di acqua e cloruro di sodio.



Figura 6.14: Inserimento della soluzione di acqua e cloruro di sodio alla base del muretto W1.

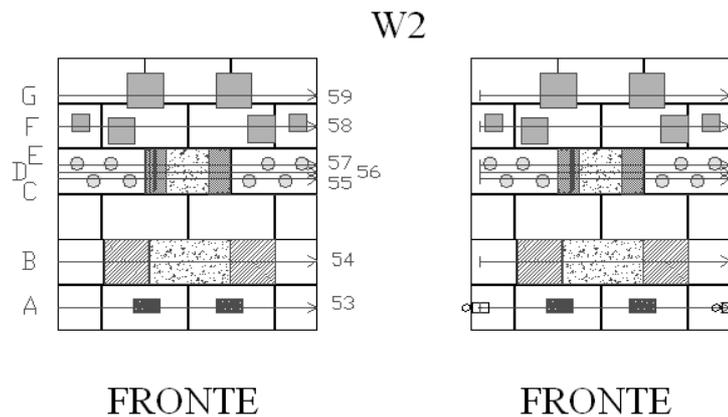


Figura 6.15: Linee radar orizzontali per l'acquisizione dati sul fronte del muretto W2 e posizionamento antenna Palm 2 GHz.

Alle ore 14.50, 2h e 30' dopo l'immersione del muretto W1 nella soluzione di acqua e cloruro di sodio, è stata interrotta l'analisi sul fronte del muretto W2 e sono stati acquisiti dati radar secondo 8 profili verticali ed 1 orizzontale sul retro (file 60-68) e successivamente sul fronte (file 69-77) del muretto W1. In particolare i radargrammi

verticali si estendono fino a metà altezza del muretto ed i marks manuali sono inseriti in corrispondenza dei primi tre profili orizzontali della griglia utilizzata nelle precedenti acquisizioni, ossia I', L' ed M' sul retro e I, L ed M sul fronte; il radargramma orizzontale si estende, invece, per tutta la larghezza del muretto ed i markers sono in corrispondenza degli otto profili verticali (Fig. 6.16). Le linee radar sono state acquisite posizionando l'antenna Palm esattamente secondo quanto descritto per le rilevazioni precedenti. Terminata tale acquisizione sul muretto bagnato W1 è stato proseguito con il retro del muretto W2 (file 78-88 e 94-95) per poi completare il fronte dello stesso interrotto in precedenza (file 89-93). Le linee verticali ed orizzontali sono state eseguite, dal basso verso l'alto e da sinistra verso destra, secondo i profili della griglia progettata nella procedura preparatoria e finalizzata al cogliere al meglio le diverse tipologie di difetti inseriti (Fig. 6.17).

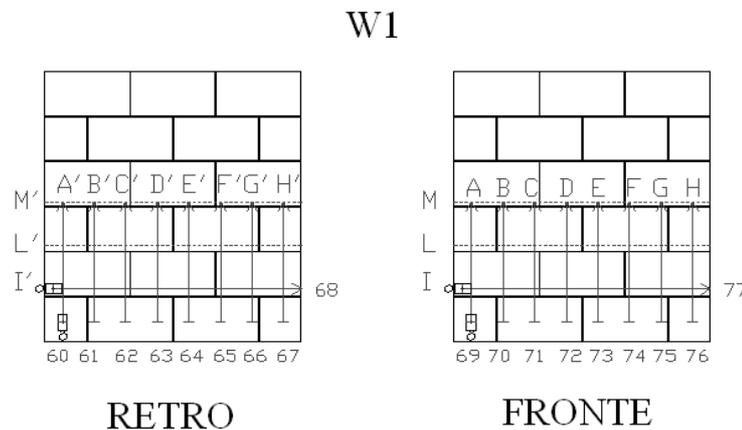


Figura 6.16: Linee radar orizzontali e verticali per l'acquisizione dati sul muretto W1 dopo 2h 30' dall'immersione in acqua e cloruro di sodio.

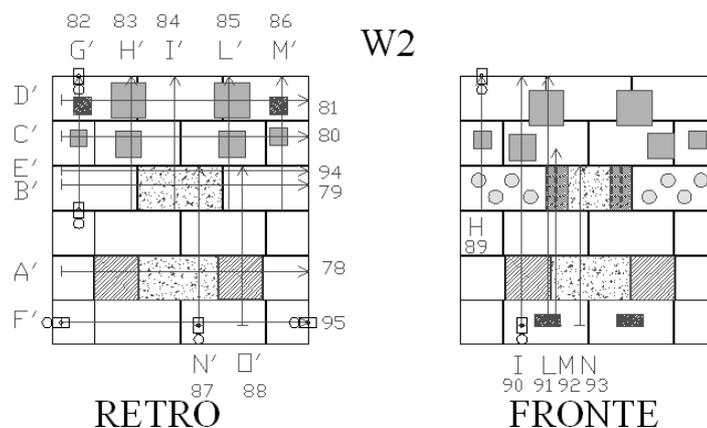


Figura 6.17: Linee radar orizzontali e verticali per l'acquisizione dati sul retro e sul fronte del muretto W2.

Alle ore 17.20, infine, sono stati acquisiti file radar sul fronte (file 129-139) e successivamente sul retro (file 140-151) del muretto W1 dopo 5 h dall'immersione dello stesso nella soluzione di acqua e cloruro di sodio allo 0.05 %. In particolar modo sono stati rilevati, per ciascun lato, 8 profili verticali, dal basso verso l'alto, che coprono circa $\frac{1}{4}$ dell'altezza complessiva del muretto ed un profilo orizzontale, da sinistra verso destra, posto a 30 cm dal bordo inferiore. Al fine di riuscire a cogliere al meglio con il centro antenna la risalita dell'acqua nei primi cm del muretto bagnato sono stati, inoltre, tracciati due profili verticali, E-G per il fronte e B'-D' per il retro, dall'alto verso il basso, ed un profilo orizzontale sul retro, da sinistra verso destra, a circa 15 cm dal bordo inferiore del muretto (Fig. 6.18-6.20).

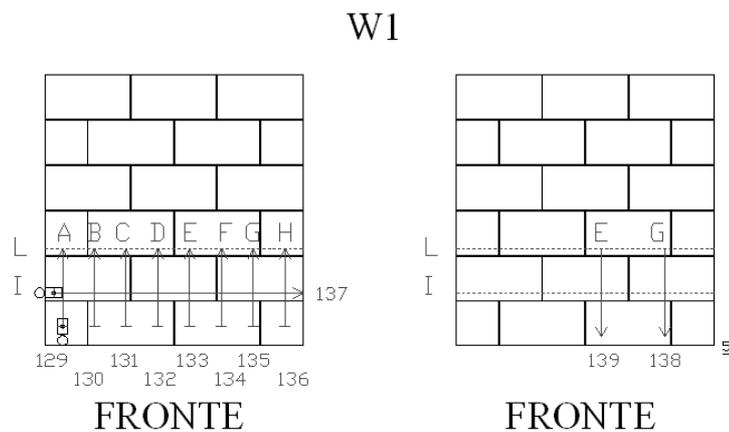


Figura 6.18: Linee radar orizzontali e verticali per l'acquisizione dati sul fronte del muretto W1 dopo 5h dall'immersione nella soluzione di acqua e cloruro di sodio.

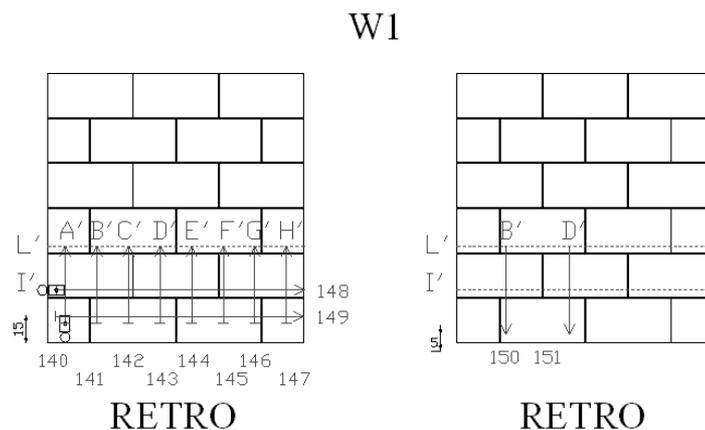


Figura 6.19: Linee radar orizzontali e verticali per l'acquisizione dati sul retro del muretto W1 dopo 5h dall'immersione nella soluzione di acqua e cloruro di sodio.



Figura 6.20: Acquisizione radar sul muretto W1 bagnato.

6.6 ELABORAZIONE DATI E VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI

Terminata la fase di acquisizione in sito dei file radar sui muretti W1 e W2 è stata necessaria l'elaborazione degli stessi mediante il software Radan 6.6 (GSSI) secondo le procedure descritte per l'indagine gpr su solai della Palazzina della Viola (cfr Cap. 5.6). In seguito sono riportati gli esempi di radargrammi maggiormente significativi che mostrano gli elementi principali colti con tale tecnica e messi in luce dall'elaborazione dati.

6.6.1 Muretto W1

Sul muretto W1 asciutto sono stati acquisiti, in principio, file radar sul fronte e sul retro mediante l'utilizzo dell'antenna da 900 MHz; successivamente, sono stati acquisiti radargrammi, lungo gli stessi profili, mediante l'utilizzo dell'antenna Palm 2 GHz, come descritto nel paragrafo 6.4. In seguito, a titolo dimostrativo, sono riportati un radargramma verticale per il retro (file 02) ed uno orizzontale per il fronte (file 26) acquisiti con l'antenna 900 MHz e i radargrammi corrispondenti agli stessi profili (file 41 e file 39) acquisiti con l'antenna Palm 2 GHz (Fig. 6.21-6.24). In tali file, oltre alla riflessione sulla superficie e sul retro del muretto, si colgono delle onde che potrebbero essere legate ai giunti di malta ed agli strati di intonaco; la loro presenza è molto chiara nei file acquisiti con l'antenna Palm piuttosto che con l'antenna da 900 MHz.

Facendo il confronto, infatti, tra i radargrammi acquisiti in verticale si nota che nel *file 02* sono presenti onde superficiali (A) di difficile interpretazione mentre nel *file*

41 sono molto chiare le quattro iperboli superficiali legate alla presenza di giunti di malta (B); la quinta iperbole è probabilmente disturbata dagli effetti di bordo.

Per i radargrammi lungo i profili orizzontali l'antenna 900 MHz riesce a fornire risultati migliori, rispetto ai profili verticali, in quanto nel *file 26* sono ben visibili le iperboli superficiali dei due giunti di malta attraversati (A); con l'antenna Palm tale informazione è maggiormente chiara e nel *file 41* sono visibili sia le due riflessioni sulla superficie e sul retro dei giunti di malta (B) sia le ondate superficiali legate agli strati di intonaco (C). È possibile cogliere questa ulteriore informazione poiché, in tal caso, l'antenna Palm fornisce una risoluzione compresa tra 1,4-2,5 cm e l'intonaco in questa zona è composto da tre strati di circa 1 cm l'uno. Per ogni radargramma acquisito sul muretto W1 asciutto è stato, inoltre, rilevato il tempo di volo e sono stati calcolati la velocità di propagazione, la costante dielettrica del materiale e la risoluzione dello strumento utilizzato (Tab. 6.5).

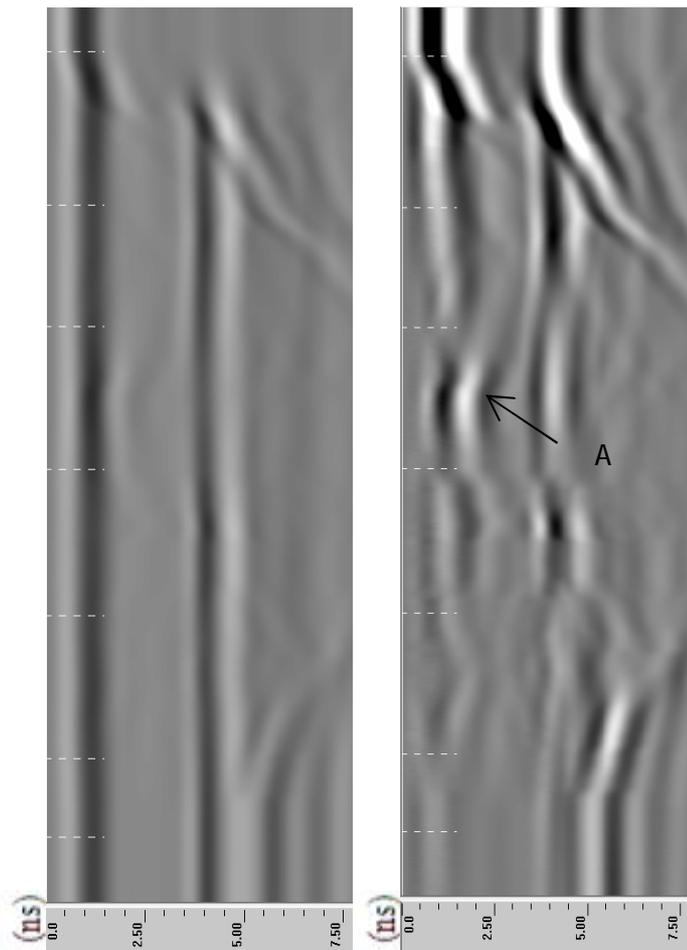


Figura 6.21: File 02 (profilo verticale B') originale e post-processing (Background Removal = 500).

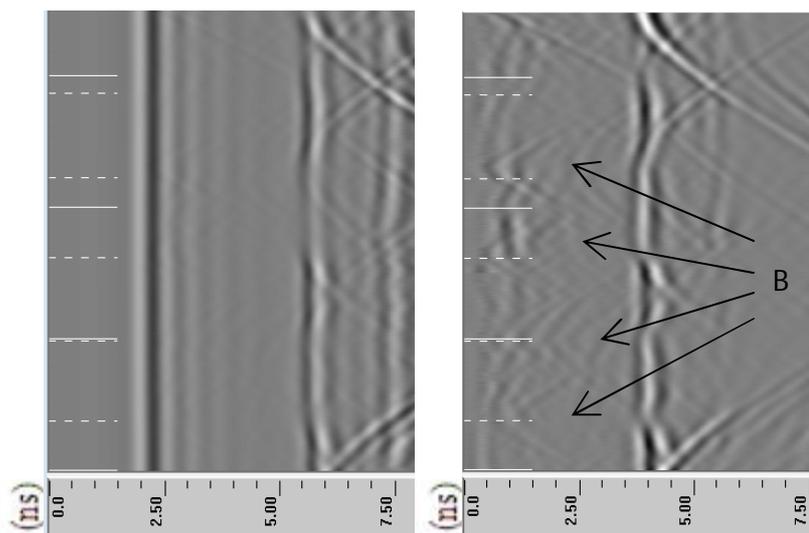


Figura 6.22: File 41 (profilo verticale B') originale e post-processing (Background Removal = 200).

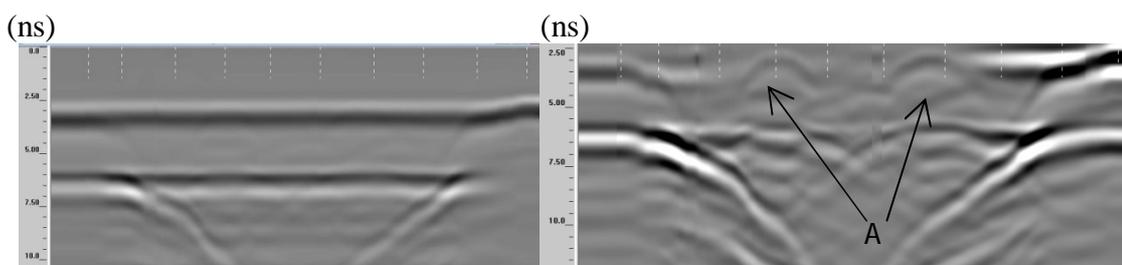


Figura 6.23: File 26 (profilo orizzontale O) originale e post-processing (Background Removal = 550).

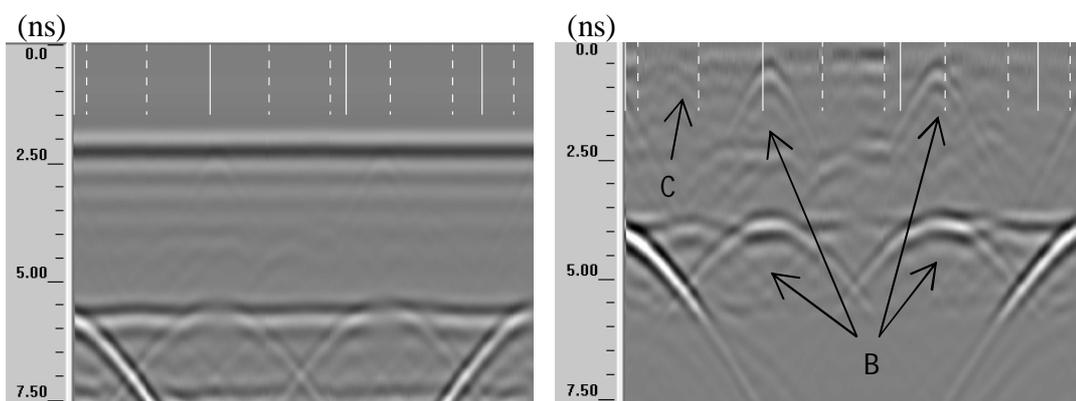


Figura 6.24: File 41 (profilo orizzontale O) originale e post-processing (Background Removal = 300).

Tabella 6.5: Parametri principali calcolati per i file 1-52 acquisiti sul muretto W1 asciutto.

	<i>File</i>	<i>T volo (ns)</i>	<i>s (cm)</i>	<i>V prop. (m/ns)</i>	ϵ	<i>Risoluzione (cm)</i>	
Antenna da 900 MHz	1	3,76	29	0,154	3,8	3 - 5,7	
	2	3,84	29	0,151	3,9	3 - 5,7	
	3	3,71	29	0,156	3,7	3,3 - 5,8	
	4	3,66	29	0,158	3,6	3,3 - 5,9	
	5	3,66	28	0,153	3,8	3,2 - 5,7	
	6	3,63	28	0,154	3,8	3,2 - 5,7	
	7	3,7	28	0,151	3,9	3,2 - 5,6	
	8	3,6	28	0,155	3,7	3,2 - 5,8	
	9	3,4	28/29	0,165	3,3	3,9 - 6	
	10	3,35	28/29	0,167	4	4 - 6,2	
	11	3,45	28/29	0,162	3,4	3,9 - 6	
	12	3,45	28/29	0,162	3,4	3,9 - 6	
	13	3,41	28/29	0,164	3,3	3,9 - 6	
	14	3,7	28	0,151	3,9	3,6 - 5,6	
	15	3,66	28	0,153	3,8	3,6 - 5,7	
	16	file corrotto					
	17	3,66	28	0,153	3,8	3,9 - 5,7	
	18	3,69	29	0,157	3,6	4 - 5,8	
	19	3,6	29	0,161	3,5	4 - 5,9	
	20	file corrotto					
	21	3,6	29	0,161	3,5	4 - 5,9	
	22	3,54	28/29	0,161	3,5	4 - 5,9	
	23	3,48	28/29	0,163	3,4	3,9 - 6	
	24	3,6	28/29	0,158	3,6	3,8 - 5,9	
	25	3,48	28/29	0,164	3,3	3,9 - 6	
	26	3,53	28/29	0,161	3,4	3,8 - 6	
Antenna Palm 2 GHz	27	3,76	28	0,149	4	1,5 - 2,5	
	28	3,78	28	0,148	4,1	1,6 - 2,5	
	29	3,69	28	0,151	3,9	1,8 - 2,5	
	30	3,78	28	0,148	4,1	1,7 - 2,5	
	31	3,78	29	0,153	3,8	1,8 - 2,6	
	32	3,74	29	0,155	3,7	1,7 - 2,6	
	33	3,84	29	0,151	3,9	1,6 - 2,5	
	34	3,78	29	0,154	3,8	1,6 - 2,6	
	35	3,69	28/29	0,154	3,7	1,6 - 2,6	
	36	3,71	28/29	0,154	3,8	1,8 - 2,6	
	37	3,77	28/29	0,151	3,9	1,7 - 2,5	
	38	3,6	28/29	0,158	3,6	1,6 - 2,6	
	39	3,74	28/29	0,152	3,9	1,5 - 2,5	
	40	3,76	29	0,154	3,8	1,6 - 2,6	
	41	3,8	29	0,153	3,9	1,4 - 2,5	

	42	3,76	29	0,154	3,8	1,6 - 2,6
	43	3,8	29	0,153	3,9	1,6 - 2,5
	44	3,78	28	0,148	4,1	1,8 - 2,5
	45	3,66	28	0,153	3,8	1,8 - 2,6
	46	3,8	28	0,147	4,1	1,6 - 2,5
	47	3,77	28	0,148	4	1,5 - 2,5
	48	3,63	28/29	0,157	3,6	1,6 - 2,6
	49	3,63	28/29	0,157	3,6	1,5 - 2,6
	50	3,63	28/29	0,157	3,6	1,5 - 2,6
	51	3,67	28/29	0,155	3,7	1,6 - 2,6
	52	3,63	28/29	0,157	3,6	1,6 - 2,6

Per le acquisizioni effettuate sul muretto W1 dopo 2h 30' dall'immersione in acqua e cloruro di sodio sono riportati il *file 75* per il fronte ed il *file 65* per il retro in quanto sono gli unici radargrammi in cui la risalita sembra essere appena accennata.

In entrambi i file è ben visibile l'iperbole superficiale del primo giunto di malta (A) attraversato dalla linea radar; alla fine del file è presente un ulteriore giunto ma la sua riflessione non è chiara in quanto è probabilmente coperta dagli effetti di bordo. Nella parte iniziale dei radargrammi corrispondente ai primi cm inferiori del muretto, in particolar modo nei file originali, sembra essere accennata la risalita della soluzione (B) in quanto la riflessione sul retro sembra essere leggermente in ritardo rispetto alla riflessione sul retro della porzione superiore (Fig. 6.25-6.26).

Tuttavia, analizzando il tempo di volo del segnale per i singoli file non è stata percepita una sostanziale differenza tra il tempo necessario per la riflessione negli scan iniziali, che sarebbe dovuto essere maggiore, e quello negli scan finali.

Il fatto che la risalita, di qualche cm, non sia colta in modo opportuno è legato alla scelta, durante l'acquisizione dei dati, di partire con il centro antenna distante circa 10 cm dal bordo inferiore.

Per ogni radargramma acquisito sul muretto W1 dopo 2h 30' dall'immersione è stato, inoltre, rilevato il tempo di volo e sono stati calcolati la velocità di propagazione, la costante dielettrica del materiale e la risoluzione dello strumento utilizzato (Tab. 6.6).

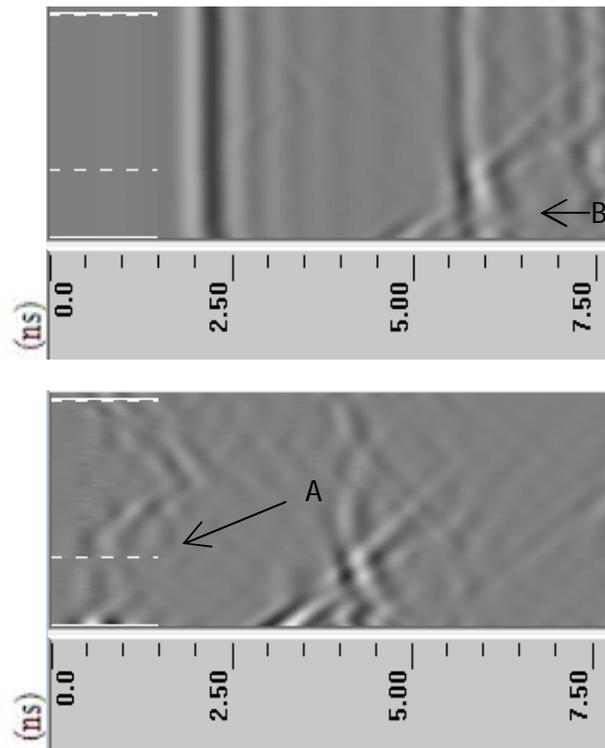


Figura 6.25: File 75 (profilo verticale G) originale e post-processing (Background Removal = 60).

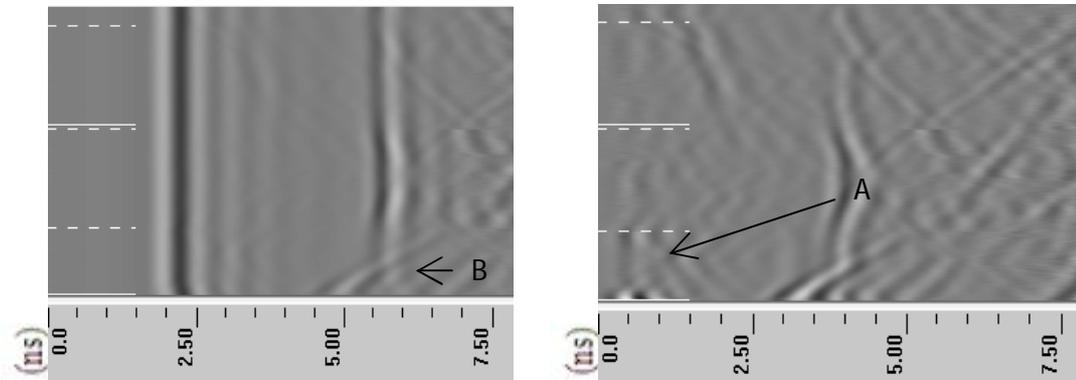


Figura 6.26: File 65 (profilo verticale F') originale e post-processing (Background Removal = 100).

Tabella 6.6: Parametri principali calcolati per i file 60-77 acquisiti sul muretto W1 dopo 2h 30' dall'immersione in acqua e cloruro di sodio allo 0.05 %.

	File	T_{vol} (ns)	s (cm)	$V_{prop.}$ (m/ns)	ϵ	Risoluzione (cm)
Antenna Palm 2 GHz	60	3,74	29	0,155	3,7	1,6 - 2,6
	61	3,65	29	0,158	3,6	2 - 2,6
	62	3,68	29	0,157	3,6	1,8 - 2,6
	63	3,71	29	0,156	3,7	1,8 - 2,6
	64	3,71	28	0,151	3,9	1,7 - 2,5

65	3,64	28	0,154	3,8	1,5 - 2,6
66	3,68	28	0,152	3,8	1,6 - 2,5
67	3,8	28	0,147	4,1	1,4 - 2,5
68	3,72	28/29	0,153	3,8	1,7 - 2,6
69	3,79	28	0,147	4,1	1,7 - 2,5
70	3,73	28	0,15	3,9	1,6 - 2,5
71	3,69	28	0,152	3,9	1,7 - 2,5
72	3,76	28	0,149	4	1,3 - 2,5
73	3,76	29	0,154	3,8	1,9 - 2,6
74	4	29	0,145	4,3	1,5 - 2,4
75	3,72	29	0,155	3,7	1,6 - 2,6
76	3,78	29	0,153	3,8	1,6 - 2,6
77	3,64	28/29	0,156	3,7	1,5 - 2,6

Infine, per il muretto W1 dopo 5h dall'immersione in acqua e cloruro di sodio sono riportati i file 139 e 151 che sono dei radargrammi acquisiti, rispettivamente sul fronte e sul retro, mediante profili verticali dall'alto verso il basso.

Nel *file 139* è ben visibile la presenza delle iperboli dei giunti di malta (A) attraversati dal profilo; in particolare sono molto evidenti le iperboli sul retro mentre sono meno percepibili quelle superficiali. Inoltre è accennata l'attenuazione del segnale (B) nella parte finale del file, corrispondente ai primi cm inferiori del muretto, dovuta alla risalita di qualche cm della soluzione che, probabilmente, interessa solo gli strati superficiali dell'intonaco (Fig. 6.27). Al contrario, nel *file 151*, oltre alla presenza delle iperboli relative ai giunti di malta (A) attraversati dal profilo, è molto chiara la presenza di acqua che riduce la velocità di propagazione del segnale dando luogo ad una forte attenuazione del segnale (B) (Fig. 6.28). Avendo notato una riduzione della velocità di propagazione dell'onda nella parte finale del file, è stata stimata l'attenuazione delle ampiezze tra la riflessione sulla superficie e la riflessione sul retro sia all'interno di uno stesso scan che tra lo scan 0 (iniziale) e lo scan 151 (finale). Come è lecito aspettarsi, analizzando lo scan 151 si nota che la differenza dell'ampiezza della riflessione, tra superficie e retro del muretto, è molto elevata essendo stata già avvertita in zona la presenza dell'acqua; inoltre, tale aspetto è ulteriormente confermato dal fatto che l'ampiezza della riflessione sul retro del muretto per lo scan 151 presenta una netta diminuzione rispetto al valore ottenuto per lo scan iniziale (Fig. 6.29-Tab. 6.7). In questo radargramma, a differenza degli altri, è stato possibile cogliere la risalita della soluzione sia perché il livello, dopo 5h, era aumentato (Fig. 6.30) sia perché, invertendo la direzione di acquisizione dei dati lungo il profilo verticale, è stato possibile far

arrivare l'antenna fino ai cm finali del bordo inferiore del muretto. Per tutti i file acquisiti sul muretto W1 dopo 5 ore dall'immersione è stato, inoltre, in analogia ai radargrammi analizzati in precedenza, rilevato il tempo di volo e calcolata la velocità di propagazione, la costante dielettrica del materiale e la risoluzione dello strumento; nei file in cui è colta la risalita dell'acqua tale operazione è stata effettuata sia per lo scan iniziale sia per lo scan finale (Tab. 6.8).

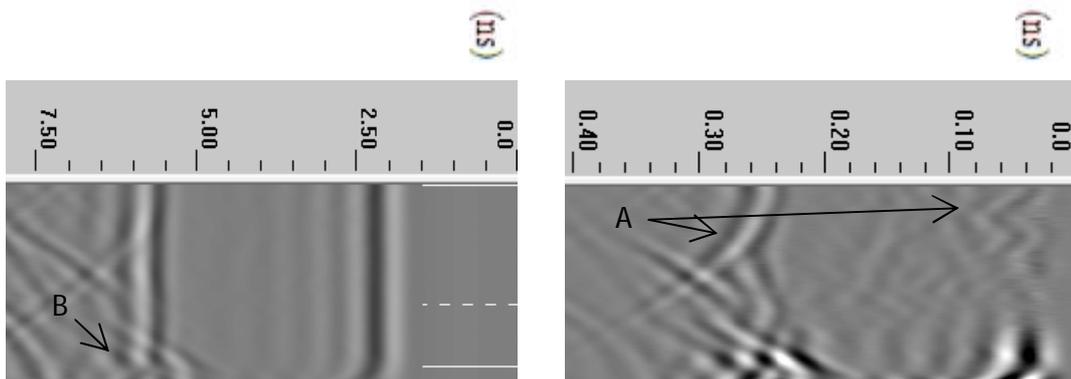


Figura 6.27: File 139 (profilo verticale E) originale e post-processing (Background Removal = 70).

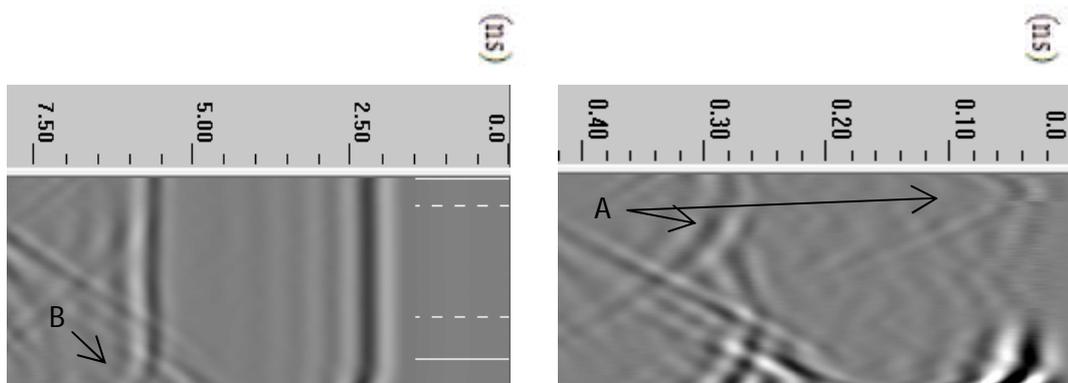


Figura 6.28: File 151 (profilo verticale D') originale e post-processing (Background Removal = 70).

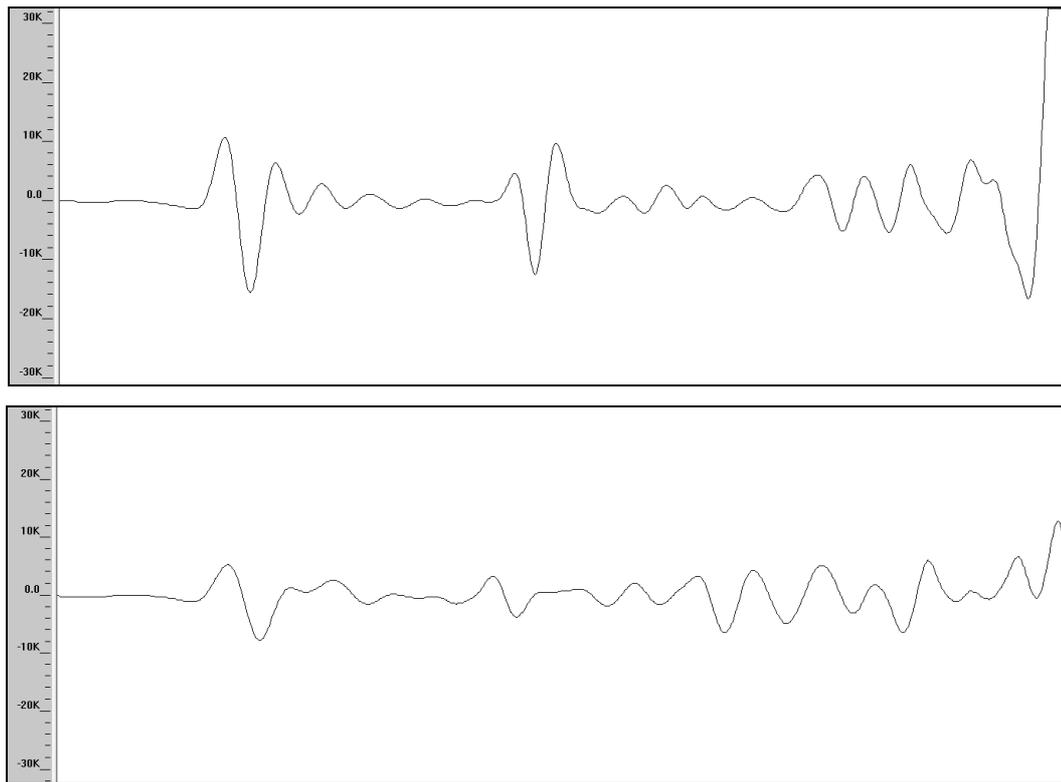


Figura 6.29: Profilo della riflessione per lo scan 0 (iniziale) e per lo scan 151 (finale) del file 151.

Tabella 6.7: Calcolo dell'attenuazione del segnale per il radargramma 151.

SCAN 0		SCAN 151		
Riflessione superficiale	$\Delta A_{sup} = 26277$	Riflessione superficiale	$\Delta A_{sup} = 13195$	$\Delta A_{sup} - scan0/scan 151 = 13081$
Riflessione sul retro	$\Delta A_{retro} = 22483$	Riflessione sul retro	$\Delta A_{retro} = 3872$	$\Delta A_{retro} - scan0/scan 151 = 18665$
	$\Delta A(scan 0) = 3795$		$\Delta A(scan 0) = 9368$	



Figura 6.30: Risalita della soluzione di acqua e cloruro di sodio sul muretto W1 dopo 5h dall'immersione.

Tabella 6.8: Parametri principali calcolati per i file 129-151 acquisiti sul muretto W1 dopo 5h dall'immersione in acqua e cloruro di sodio allo 0.05 %.

	File	<i>T volo (ns)</i>	<i>s (cm)</i>	<i>V prop. (m/ns)</i>	ε	<i>Risoluzione (cm)</i>
Antenna Palm 2 GHz	129	3,88	28	0,144	4,3	1,4 - 2,4
		3,72	28	0,15	4	1,6 - 2,5
	130	3,84	28	0,145	4,2	1,8 - 2,4
		3,69	28	0,151	3,9	1,6 - 2,5
	131	3,76	28	0,148	4	1,8 - 2,5
		3,66	28	0,153	3,8	1,8 - 2,6
	132	3,75	28	0,149	4	1,5 - 2,5
	133	3,75	29	0,155	3,8	1,6 - 2,6
	134	3,95	29	0,147	4,2	1,6 - 2,4
	135	3,9	29	0,149	4,1	1,7 - 2,5
		3,74	29	0,155	3,7	1,5- 2,6
	136	3,85	29	0,15	3,96	1,5 - 2,5
		3,72	29	0,155	3,7	1,5 - 2,6
	137	3,66	28/29	0,155	3,7	1,4 - 2,6
	138	3,73	29	0,155	3,7	1,6 - 2,6
		4,25	29	0,136	4,8	1,7 - 2,3
	139	3,78	29	0,153	3,8	1,8 - 2,6
	140	3,76	29	0,154	3,8	1,6 - 2,6
	141	4,02	29	0,144	4,3	1,5 - 2,4
		3,86	29	0,15	3,9	1,5 - 2,5
	142	4,25	29	0,136	4,8	1,6 - 2,3
		3,69	29	0,157	3,6	1,6 - 2,6
	143	3,9	29	0,149	4	1,9 - 2,5
		3,78	29	0,154	3,8	1,5 - 2,6
	144	3,8	28	0,147	4	1,9 - 2,5
	145	3,75	28	0,149	4	1,7 - 2,5
		3,66	28	0,153	3,8	1,7 - 2,6
	146	3,9	28	0,143	4,4	1,6 - 2,4
		3,75	28	0,149	4	1,7 - 2,5
	147	3,86	28	0,145	4,3	1,5 - 2,4
3,75		28	0,149	4	1,6 - 2,5	
148	3,68	28/29	0,155	3,8	1,6 - 2,6	
149	3,81	28/29	0,149	4	1,6 - 2,5	
150	3,67	29	0,158	3,6	1,7 - 2,6	
	3,98	29	0,146	4,2	1,7 - 2,4	
151	3,8	29	0,153	3,9	1,7 - 2,5	
	4,54	29	0,127	5,5	1,5 - 2,1	

6.6.2 Muretto W2

Tra i radargrammi acquisiti sul muretto W2 sono riportati, in particolare, i file 53, 54, 55 e 58 per il fronte ed i file 73 ed 82 per il retro al fine di offrire una panoramica completa di tutti i difetti inseriti all'interno del muretto in fase di costruzione e rilevati mediante la tecnica GPR. Nello specifico, nel *file 53* sono visibili, sin dall'originale, due forti riflessioni superficiali (A) che si estendono per 17-18 cm; tali riflessioni sono attribuibili, per posizione e dimensione, alle due piastre metalliche ($70 \times 150 \text{ mm}^2$) applicate sulla superficie del fronte (Fig. 6.31). Nel *file 54*, invece, sono presenti due riflessioni (A) di 22-23 cm che danno luogo sia a iperboli superficiali sia a iperboli sul retro attribuibili alla presenza di due scatole in legno ($25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$); la riflessione di tali elementi è, difatti, meno forte rispetto alla riflessione del metallo presente nel file precedente. Tra le due riflessioni sono, inoltre, appena accennate delle ondinie superficiali (B) che potrebbero essere legate alla presenza di un blocco di malta ($45 \times 25 \times 28 \text{ cm}^3$) inserito tra i due blocchi in legno; l'interpretazione di tale difetto non è però chiara come per gli altri elementi individuati (Fig. 6.32).

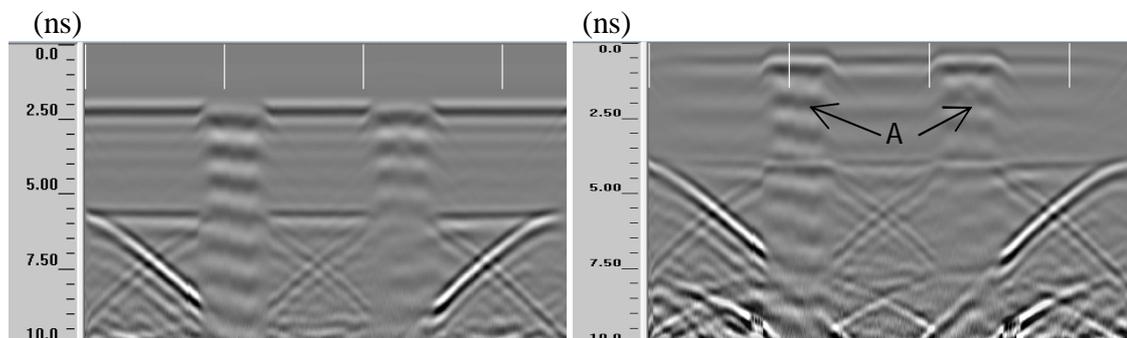


Figura 6.31: File 53 (profilo orizzontale A) originale e post-processing (Background Removal = 200).

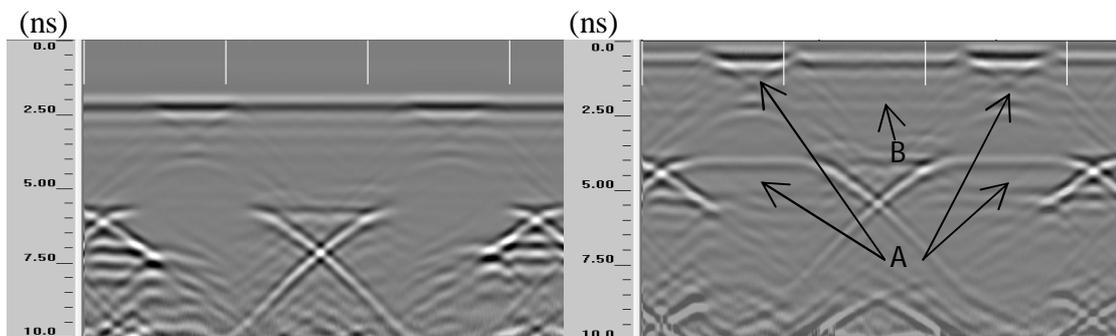


Figura 6.32: File 54 (profilo orizzontale B) originale e post-processing (Background Removal = 250).

Proseguendo con il *file 55* (Fig. 6.33) in esso sono molto ben visibili 4 iperboli superficiali (A) localizzate esattamente nella posizione in cui, nella realtà, sono stati realizzati 4 fori ciechi. Per approfondire il grado di conoscenza sono stati rilevati, dal radargramma, il tempo di riflessione del retro di ciascun foro e la velocità di propagazione del segnale in modo tale da poter calcolare la profondità dei difetti individuati. I risultati ottenuti (Tab. 6.9) sono, però, abbastanza discordi dalle misure reali e tale errore potrebbe derivare dall'aver considerato la velocità di propagazione del segnale in un generico punto del muretto in esame. Per ovviare a tale discrepanza viene calcolata la velocità di propagazione mediante l'utilizzo della costante dielettrica ϵ pari a 1 essendo i fori ciechi pieni di aria; i risultati ottenuti sono migliori seppur ancora non perfettamente in linea con le dimensioni reali (Tab. 6.10). Nella parte centrale del file, inoltre, sono presenti ulteriori riflessioni ed in particolare due iperboli imputabili agli inserti di differenti tipi di mattoni (B), rispetto alla pietra leccese, situati in tale zona del muretto. Prendendo in considerazione l'iperbole posta a destra, più chiara dell'altra, è stata valutata l'estensione del difetto pari a 11 cm e la sua profondità pari a 4.5 cm; tali valori rispecchiano con buona approssimazione la realtà dei fatti in quanto i blocchi inseriti in fase di costruzione hanno dimensioni pari a 12 x 25 x 4.5 cm³.

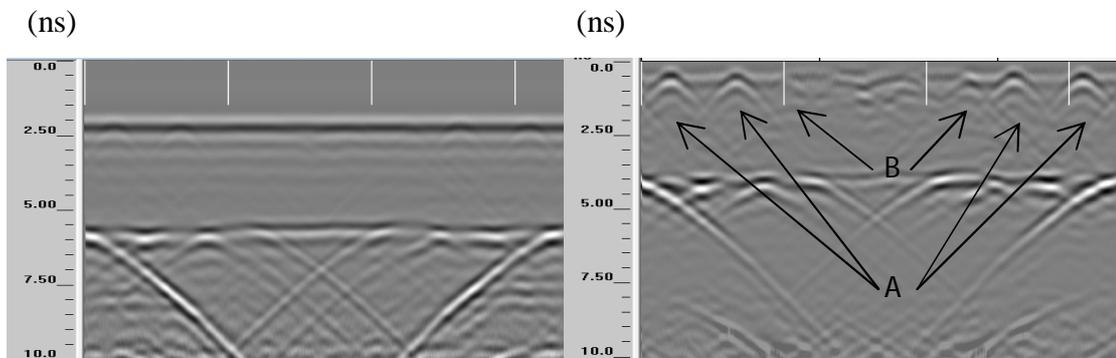


Figura 6.33: File 55 (profilo orizzontale C) originale e post-processing (Background Removal = 200).

Tabella 6.9: Calcolo della profondità dei fori dal radargramma mediante l'utilizzo della velocità di propagazione media del muretto W2.

	Tretro foro (ns)	V (m/ns)	Profondità calcolata (cm)	Profondità reale (cm)	errore
1°foro	0,64	0,15	5	10	10
2°foro	0,63	0,15	5	20	15

3°foro	0,59	0,15	4	10	9
4°foro	0,6	0,15	4,5	20	16

Tabella 6.10: Calcolo della profondità dei fori dal radargramma mediante l'utilizzo della velocità di propagazione specifica del difetto.

	Tretro foro (ns)	V (m/ns)	Profondità calcolata (cm)	Profondità reale (cm)	errore
1°foro	0,64	0,3	10	10	5
2°foro	0,63	0,3	9	20	11
3°foro	0,59	0,3	9	10	6
4°foro	0,6	0,3	9	20	11

Nel file 58 (Fig. 6.34) è stata colta sia la presenza di 3 iperboli, in superficie e sul retro, attribuibili ai *giunti di malta* (A) sia una certa discontinuità della riflessione superficiale con la presenza di una zona particolare stimata larga pari a 14 cm, che potrebbe essere legata all'interposizione di un *foglio di teflon* (15 x 15 cm²) tra gli strati di intonaco (B). In realtà, lungo tale profilo, sono presenti quattro fogli di teflon ma essi non sono facilmente localizzabili.

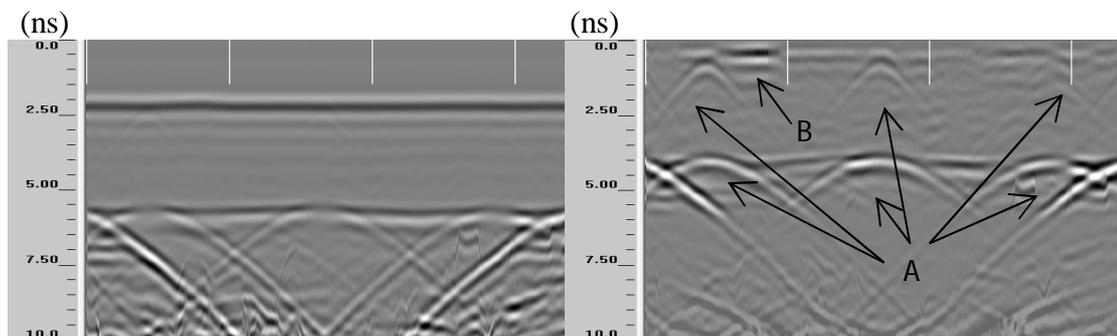


Figura 6.34: File 58 (profilo orizzontale F) originale e post-processing (Background Removal = 200).

Per il retro del muretto W2, infine, è mostrato solamente il file 79 (Fig. 6.35) in quanto gli altri radargrammi presentano gli stessi difetti già individuati e descritti per il fronte. Nel file in esame, al contrario, è presente, a 40 cm dall'inizio, una *zona ricca di riflessioni superficiali* (A) che si estende per circa 50 cm; ponendosi in corrispondenza di un'iperbole maggiormente chiara è stata stimata la profondità di tale riflessione pari a 4.8 cm. Nella realtà in tale area è presente un blocco di malta di dimensioni pari a 48 x

25 x 4.5 cm³ e le iperboli notate nel file potrebbero essere attribuite a tale difetto (Tab. 6.11).

Nella parte centrale del file, inoltre, vicino alla riflessione del retro del muretto è presente un'iperbole (B) la cui distanza dal fronte dello stesso è stata calcolata pari a 20 cm; tale riflessione è, con buona approssimazione, legata alla presenza di un blocco di malta di 8 cm di spessore sul fronte (Tab. 6.12). Tale file analizzato è l'unico che mette in mostra, in modo chiaro, le riflessioni dei blocchi di malta inseriti nel muretto W2 poiché, in questo caso, tale difetto non è oscurato dalle riflessioni di altri oggetti accorpati ad esso quali blocchi di legno o di mattoni vari.

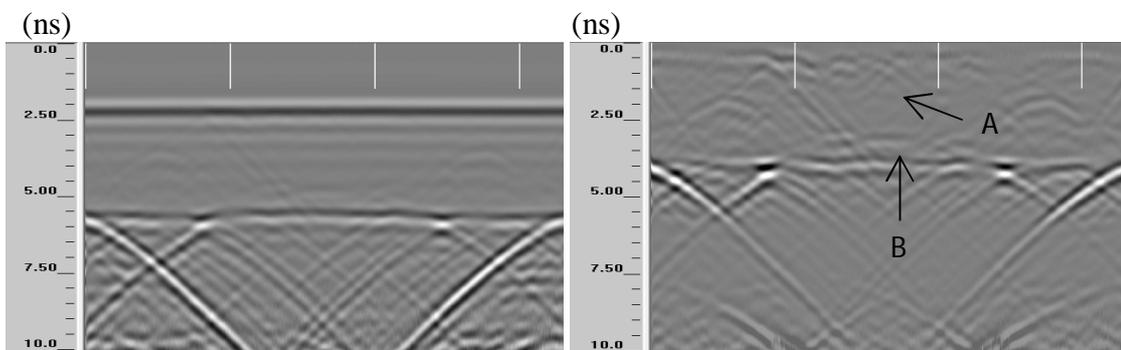


Figura 6.35: File 79 (profilo orizzontale B') originale e post-processing (Background Removal = 200).

Tabella 6.11: Calcolo della profondità del blocco di malta posto sul retro del muretto W2.

Tetro blocco (ns)	V (m/ns)	Profondità calcolata (cm)	Profondità reale (cm)	errore
0,64	0,15	4,80	4,5	-0,30

Tabella 6.12: Calcolo della profondità del blocco di malta posto sul fronte del muretto W2.

Tetro Blocco (ns)	V (m/ns)	Profondità calcolata (cm)	Profondità reale (cm)	errore
2,71	0,15	20,33	17	-3,33

Terminata l'elaborazione dati, per entrambe le tipologie di muretti analizzati, è possibile affermare che le indagini svolte mediante GPR hanno offerto dei buoni risultati, portando all'individuazione di tutte le componenti principali della struttura e

dei difetti inseriti in essa non visibili dall'esterno avendo intonacato i muretti da entrambi i lati. In particolare, mediante tale tecnica, è stato possibile localizzare, nel muretto W1, i giunti di malta tra i diversi mattoni in pietra leccese e caratterizzare, in termini di posizione, materiali e dimensioni, i vari difetti inglobati nel muretto W2. Dal confronto dei radargrammi acquisiti mediante le diverse tipologie di antenna è stato accertato che, per tale tipologia di analisi, i risultati migliori si ottengono con l'antenna Palm 2 GHz piuttosto che con l'antenna da 900 MHz.

7 PROVA DI PERMEABILITÀ ALL'ARIA DI UN EDIFICIO STORICO IN MURATURA

È stata effettuata nei mesi primaverili, mediante Blower Door Test, la verifica di permeabilità all'aria di alcune zone rappresentative di Palazzo D'Accursio in Bologna, secondo le prescrizioni della normativa EN 13829/2000 recepita in Italia dalla UNI EN 13829/2002. Per effettuare la valutazione delle infiltrazioni di aria negli involucri edilizi tale metodologia di prova è già largamente diffusa nel continente americano e nei Paesi dell'Europa del Nord (essendo nata in Svezia), attualmente sta ottenendo una notevole diffusione anche tra gli esperti del settore italiani.

Nello specifico è stata svolta una prima campagna di acquisizione dati nei mesi di Marzo-Aprile 2011 ma una parte dei risultati ottenuti, a causa di un guasto tecnico, è andata persa ed è stato necessario eseguire una seconda campagna di acquisizione dati nei mesi di Maggio-Giugno 2011.

7.1 SCOPO DELLA PROVA

Il Blower Door Test permette, utilizzando il metodo di pressurizzazione mediante ventilatore, di individuare le perdite di aria presenti nell'edificio in esame e di valutare l'efficienza energetica dello stesso.

Nello specifico è stata effettuata tale analisi all'interno di diverse aree di Palazzo D'Accursio (Bologna) al fine di localizzare i principali punti non ermetici e di fornire indicazioni circa la sua ermeticità globale. Eventuali infiltrazioni di aria e dispersioni di calore possono infatti influire in modo significativo sia sul comfort degli utilizzatori della struttura sia sulla conservazione dei numerosi beni culturali presenti all'interno. Nel caso in esame, tale analisi risulta maggiormente complessa poiché l'oggetto della prova è un edificio storico ed è quindi caratterizzato da una scarsa conoscenza del manufatto in termini di fasi progettuali-costruttive, materiali utilizzati e diverse modifiche che esso ha subito nel corso degli anni.

Ulteriore scopo dell'indagine è quello di fornire indicazioni utili, inerenti in particolare gli svantaggi e le criticità incontrate, nell'applicazione inusuale del Blower

Door Test per la valutazione della tenuta all'aria di edifici storici piuttosto che edifici appartenenti all'edilizia comune; l'Unione Europea mira infatti ad estendere la normativa vigente in quanto, attualmente, gli edifici storici sono esclusi dall'obbligo di certificazione energetica previsto invece per il resto degli edifici.

7.2 OGGETTO DELLA PROVA: PALAZZO D'ACCURSIO

Uno dei casi studio del progetto europeo 3ENCULT è Palazzo D'Accursio (Bologna) (Fig. 7.1). Tale palazzo, situato nel centro della città, è la sede storica del Municipio ed è un patrimonio nazionale di arte e cultura; una delle finalità di tale progetto è quella di conservarlo tale e renderlo maggiormente efficiente e funzionale.



Figura 7.1: Palazzo D'Accursio, Piazza Maggiore (Icaro P., 2011).

A tal fine occorre eseguire prove diagnostiche non distruttive che possano rilevare lo stato di fatto dell'edificio senza che esso subisca danni che, data l'importanza dell'oggetto di studio, risulterebbero irreparabili. È stato previsto di svolgere il Blower Door Test sia nell'ala degli Uffici sia nelle Collezioni Comunali d'Arte, fondate nel 1936 e situate al secondo piano nell'ex appartamento dei Cardinali Legati (Bernardini C., 2002). Seguendo tale logica è possibile inquadrare i punti critici dell'edificio seguendo due differenti punti di vista; da un lato si vogliono valutare le condizioni di lavoro del personale addetto, che opera quotidianamente all'interno del Palazzo, al fine di consentire loro di svolgere le proprie attività in uno stato di comfort e benessere generale, dall'altro si cerca di migliorare, ove necessario, le condizioni climatiche delle zone del Palazzo adibite a Museo al fine di preservare le opere d'arte presenti.

Le diverse zone in cui è stato effettuato il Blower Door Test sono inoltre differenti anche dal punto di vista costruttivo e strutturale in quanto sono state realizzate in epoche differenti e solo successivamente raccolte in un unico corpo. Il corpo sud-ovest del Palazzo fu infatti acquistata dal Comune alla fine del Duecento, in tale zona furono fatti innalzare da Accursio i tre piani attualmente ancora presenti e sede degli Uffici Comunali; lo stesso giurista aveva la propria residenza nella Torre dell'Orologio che sovrasta tutt'oggi l'edificio (Bernardini C., 2002). Il corpo nord del Palazzo, oltre il portale d'ingresso, venne costruito alla fine del Cinquecento, affinché il Governatore dalla città, ossia il Cardinale Legato, avesse qui i suoi ricchi appartamenti; in tale zona sono allestite le Collezioni Comunali d'Arte.

7.3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Il Blower Door Test, attraverso la sua particolare strumentazione, permette di instaurare una depressione o sovrappressione tra l'involucro interno, luogo della misurazione, e l'ambiente esterno circostante. In seguito è descritta la strumentazione utilizzata per effettuare la prova a Palazzo D'Accursio che, nello specifico, è composta da:

- un telaio in alluminio dotato di barre telescopiche che viene installato in un infisso (una porta o finestra) della zona in esame (Fig. 7.2). Su tale telaio viene fissato il telo in nylon rosso che permette la chiusura del vano su cui esso è stato sistemato; nella parte inferiore del telo è presente un foro in cui si inserisce il ventilatore. Il telaio utilizzato nell'analisi è caratterizzato da una larghezza massima pari a 1.05 metri ad un'altezza massima di 2.27 metri.



Figura 7.2: Montaggio del telaio utilizzato per l'analisi.

- il ventilatore “Minneapolis Model 4” che viene annesso al telaio e permette di immettere/aspirare l'aria nella zona in esame; ad esso si possono applicare tre anelli di plastica concentrici (A,B,C, rispettivamente dal più grande al più piccolo) che permettono la regolazione della portata di aria del ventilatore stesso. La ventola utilizzata in tale analisi è in grado di fornire una portata massima di $\approx 8000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Fig. 7.3).



Figura 7.3: Ventola “Minneapolis Model 4”.

- l'unità di controllo ed acquisizione dei dati “DG700E, matricola 6375-105” che è collegata ai vari elementi della strumentazione mediante dei tubi in plastica di piccolo diametro e ha lo scopo di raccogliere i dati necessari per l'analisi ed inviarli ad un elaboratore. In particolare tale centralina (Fig. 7.4) è divisa in due canali: nel canale A vengono collegati il tubo bianco ed il tubo verde ed è rilevato il valore della differenza di pressione $\Delta p = |p_{\text{int}} - p_{\text{est}}|$; nel canale B vengono collegati il tubo rosso ed il tubo blu e sono rilevate le caratteristiche di pressione nell'intorno della ventola.

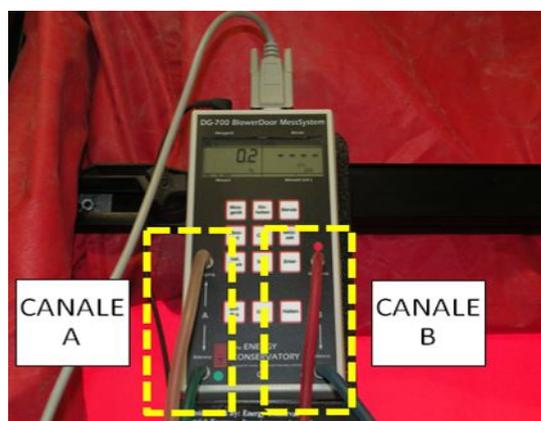


Figura 7.4: Particolare dell'unità di controllo ed acquisizione dei dati DG700E.

Nello specifico la pressione interna viene rilevata dal tubo bianco che viene situato all'interno dell'edificio nelle vicinanze della strumentazione mentre la pressione esterna viene rilevata dal tubo verde che, mediante una valvola verde presente nel telaio, è collegato ad un tubo bianco situato all'esterno dell'edificio. La pressione della ventola viene rilevata dal tubo rosso che è inserito nella sua parte superiore mentre il tubo blu rileva la pressione in un punto vicino alla ventola; nella fase di depressione il tubo blu viene in genere appoggiato sopra la ventola che è interna all'edificio, in pressione viene inserito nella valvola blu presente nel telaio e collegato con l'esterno in quanto in tale fase la posizione del ventilatore è invertita. È mostrata la strumentazione completa (Fig. 7.5) utilizzata per il Blower Door Test durante una prova in depressione mettendo in evidenza il posizionamento dei diversi tubi di plastica.

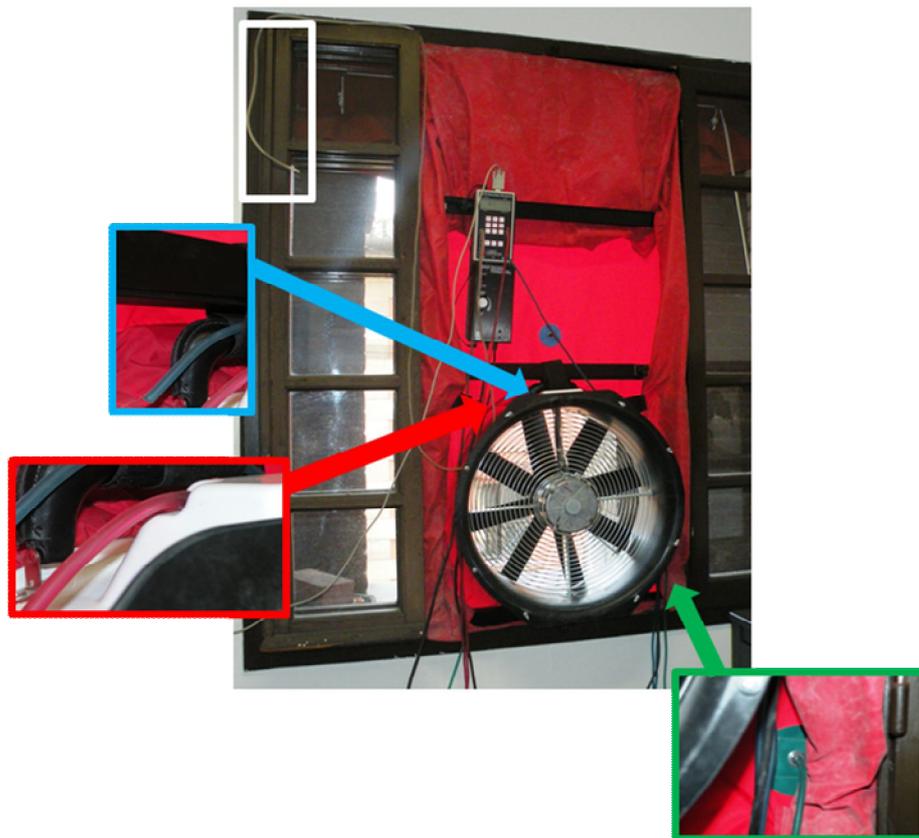


Figura 7.5: Strumentazione del Blower Door Test per effettuare la prova in depressione.

- il software Tectite Airtightness (Fig. 7.6) che, mediante l'ausilio di un calcolatore, riceve i dati dall'unità di controllo ed acquisizione dei dati e fornisce i valori di output

ossia i risultati dell'analisi; in particolare il software costruisce la Building Leakage Curve e ricava il numero di ricambi di aria orari.

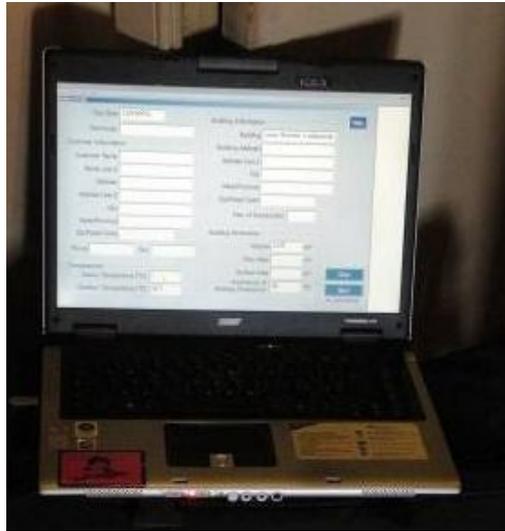


Figura 7.6: Schermata del software Tectite Airtightness utilizzato per l'analisi dati.

A tali componenti principali si affianca uno strumento utile per la localizzazione delle infiltrazioni di aria ed il rilievo della temperatura, il termoanemometro (Fig. 7.7). In genere tale strumento è composto da un'elica ed una sonda di temperatura situata nelle vicinanze dell'elica, quando il flusso di aria mette in movimento l'elica contemporaneamente la sonda rileva la temperatura. Talvolta, per specifiche esigenze di utilizzo di sonde di piccole dimensioni, l'elica può essere sostituita da un filo caldo che, se colpito da un flusso di aria, subisce un raffreddamento e tale raffreddamento è proporzionale alla velocità di infiltrazione dell'aria stessa.



Figura 7.7: Termoanemometro.

Durante alcune fasi della prova è stato fatto ricorso anche all'utilizzo della termocamera per la visualizzazione dei punti non ermetici dell'edificio, in particolare quelli non raggiungibili mediante l'anemometro, e la struttura portante dell'area in esame. In prevalenza è stata utilizzata la termocamera FLIR P620 ed in alternativa, nelle prove in cui non è stata disponibile, una termocamera compatta FLIR B400 (Fig. 7.8). La termocamera FLIR P620 ha una risoluzione di 640 x 480 pixel mentre la termocamera FLIR B400 ha una risoluzione di 320 x 240 pixel.



Figura 7.8: Termocamera FLIR P620 e FLIR B400.

Per rilevare, con esattezza, le dimensioni delle sale prese in esame in ciascuna prova e calcolare le volumetrie da inserire nel software è stato utilizzato un disto digitale (Fig. 7.9). Tale strumento è dotato di un puntatore laser ed è in grado di misurare, con precisione millimetrica, la distanza tra la superficie colpita dal puntatore e lo strumento stesso.



Figura 7.9: Disto digitale per il calcolo delle distanze.

7.4 ACQUISIZIONE DATI

Il Blower Door Test viene eseguito creando una differenza di pressione tra l'esterno e l'interno dell'involucro in esame e misurando il flusso di aria sia in una condizione di depressione sia in una condizione di sovrappressione al fine di ottenere il numero di ricambi d'aria orari, indice delle permeabilità dell'involucro edilizio, in riferimento ad una Δp pari a 50 Pa (UNI EN 13829: 2002).

Nell'edificio in esame, essendo un edificio storico, le incertezze sui parametri della prova sono molto elevate in quanto la struttura ha un comportamento differente rispetto ai casi dell'edilizia comune. In tale analisi occorre dunque, prima di iniziare il test, azionare manualmente il ventilatore per valutare il valore di differenza di pressione che si riesce a raggiungere per lo specifico caso, tale valore sarà poi impostato come valore massimo di partenza per eseguire il test nelle sue diverse fasi.

Sono riportate in seguito le specifiche procedure di svolgimento della prova per ogni singola zona analizzata; considerata infatti l'elevata volumetria e complessità dell'edificio in esame è stato pensato di suddividere l'area da testare in diverse sotto-aree in modo da poter raggiungere differenze di pressione significative. In particolare è stata effettuata una prima campagna di acquisizioni dati, nei mesi di Marzo ed Aprile 2011, sia nell'ala degli Uffici sia nella zona adibita a Collezioni Comunali D'Arte; successivamente, a causa di un guasto tecnico che ha provocato la perdita di parte dei risultati ottenuti, è stato necessario eseguire una seconda campagna di acquisizione dati effettuata nei mesi di Maggio e Giugno 2011.

7.4.1 PRIMA CAMPAGNA DI ACQUISIZIONE DATI

7.4.1.1 UFFICI COMUNALI (2° TRAPIANO)

In data 8 Aprile 2011 è stato effettuato il Blower Door Test nel corridoio del secondo trapiano di Palazzo D'Accursio (Fig. 7.10), nel corpo di fabbrica in cui sono sistemati gli uffici municipali; l'area in esame è caratterizzata dalla presenza di controsoffitto e pavimenti in granito (Fig. 7.11). La lunghezza complessiva del corridoio è pari a 45 m e la larghezza del corpo di fabbrica è pari a 8.5 metri.

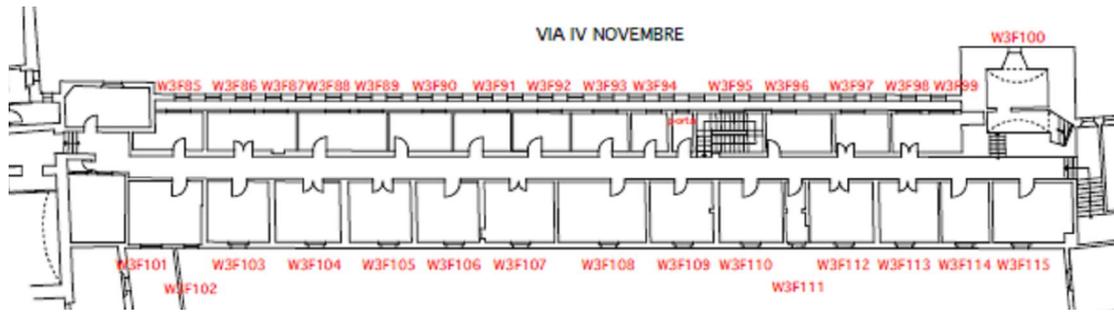


Figura 7.10: Pianta del corridoio del secondo trapiano di Palazzo D'Accursio.



Figura 7.11: Scorcio del corridoio del secondo trapiano di Palazzo D'Accursio.

Tale zona è stata delimitata mediante due chiusure realizzate nelle parti terminali del corridoio tramite teli di nylon e nastro adesivo adattati alle pareti ed agli architravi presenti al termine dei gradini situati sia all'inizio sia alla fine del corridoio (Fig. 7.12). La strumentazione del Blower Door Test è stata posizionata nella stanza n°63 ed in particolare il telaio con il ventilatore è stato installato nell'infisso W3F94 (Fig. 7.13); è stato preferito tale lato del corridoio in quanto l'infisso è raggiungibile anche dall'esterno essendo presente un camminamento di ronda.



Figura 7.12: Chiusure realizzate agli estremi del corridoio in esame.



Figura 7.13: Strumentazione installata nell'infisso W3F94 e camminamento di ronda presente all'esterno di tale infisso.

Prima di iniziare con l'esecuzione del test sono state chiuse tutte le finestre delle stanze presenti in tale corridoio ed aperte le porte interne; le porte n°70, 71, 75, 76, 77 erano chiuse a chiave per cui non è stata possibile la loro apertura. La porta n°75 è stata sigillata con del nastro adesivo per tutta l'estensione del suo perimetro per cui è stata detratta dal volume totale della zona analizzata. È stata sigillata con nastro adesivo anche la porta della bussola situata all'inizio del vano scala (Fig. 7.14) che, dal piano sottostante, permette di salire al piano in cui è stato svolto il test. Infine, l'infisso W3F95, che si affaccia sul vano scala, è stato puntellato con un'asta lignea (Fig. 7.15) per non correre il rischio che durante il test si potesse aprire. Sono state chiuse con nastro adesivo anche eventuali prese d'aria dei sistemi di condizionamento (Fig. 7.16), presenti nei vetri degli infissi, anche laddove esse avessero il tappo di copertura in plastica. Infine sono stati inseriti nel software tali dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} \approx 1500 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 25^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 25^\circ\text{C}$;
- Vento assente;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).



Figura 7.14: Chiusura, mediante nastro adesivo, della porta situata all'inizio del vano scala.



Figura 7.15: Puntellamento dell'infisso W3F95.



Figura 7.16: Chiusura delle prese d'aria nei vetri degli infissi.

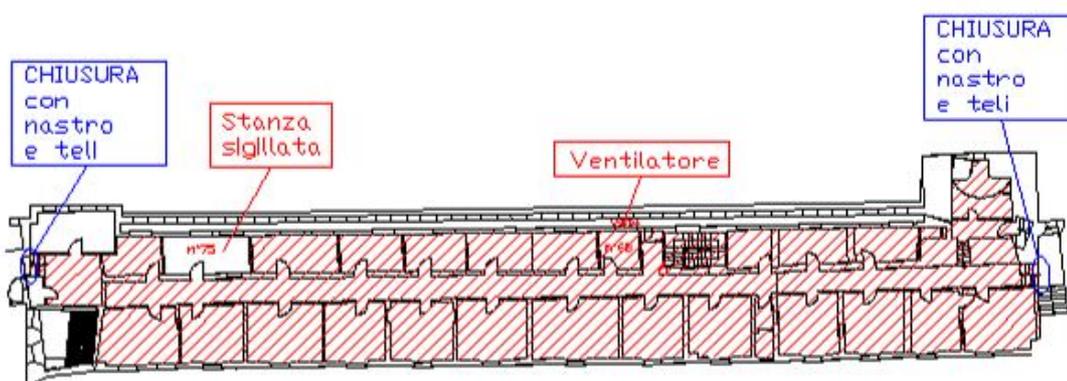


Figura 7.17: Pianta del corridoio del terzo piano di Palazzo D'Accursio con le informazioni relative allo svolgimento del Blower Door Test.

Al termine di tali operazioni preliminari inerenti la procedura preparatoria e riportati nella pianta della zona in esame (Fig. 7.17) è avvenuta dapprima una prova del

test (h. 11.00) e poi l'esecuzione vera e propria. Azionato manualmente il ventilatore è stata raggiunta, per tale area, un $\Delta p_{\max} \approx 33$ Pa ed è stato deciso di far iniziare il test da un valore di Δp pari a 32 Pa fino al raggiungimento, con intervalli variabili, del valore di $\Delta p = 10$ Pa. Durante la fase di prova è stato notato che le chiusure effettuate alle estremità del corridoio in alcuni punti avevano ceduto per cui, prima di effettuare il test, sono state rafforzate tali chiusure ponendo davanti ai teli di nylon delle aste in legno (Fig. 7.18). In particolare sono state utilizzate aste di legno di 1,5 x 4 x 300 cm e di 3 x 3 x 300 cm.



Figura 7.18: Rafforzamento delle chiusure presenti alle estremità del corridoio.

Terminata la fase di prova e di rafforzamento delle chiusure si è proceduto con lo svolgimento del test effettuando una prova in depressione (h. 11.34) ed una prova in pressione (h. 11.53). In seguito, sottoponendo l'area ad una depressione costante con un $\Delta p \approx 30$ Pa, è stata effettuata la ricerca dei punti non ermetici rilevando con l'anemometro le eventuali infiltrazioni d'aria presenti.

Sono stati esaminati, rispettivamente, un infisso tipo del lato cortile (W3F109) ed un infisso tipo del lato via IV novembre (W3F93) in quanto gli infissi di ciascun lato sono uguali tra loro. In particolare, al fine di mettere in risalto i punti critici dell'elemento, sono state effettuate delle misurazioni in corrispondenza dei punti più significativi (Fig. 7.19-7.20).

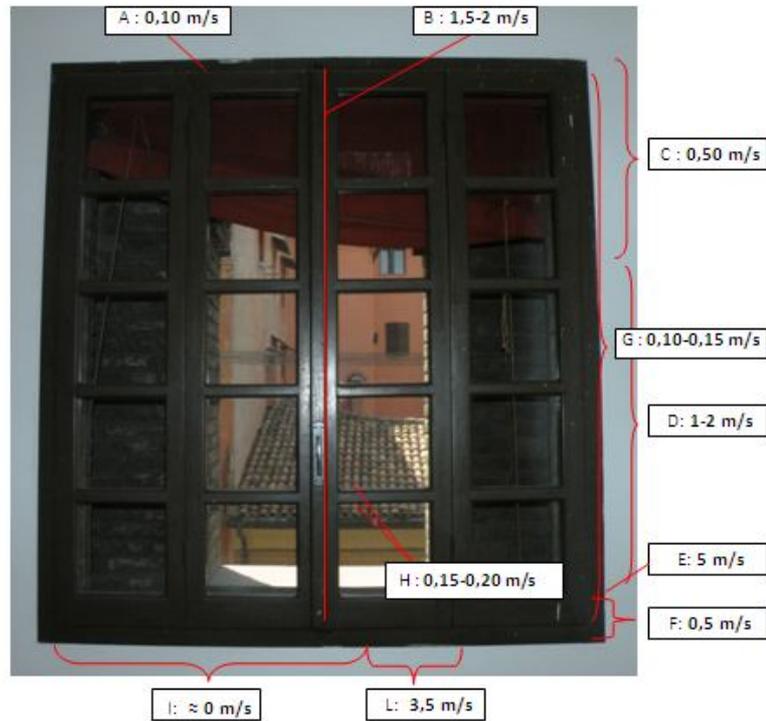


Figura 7.19: Infiltrazioni di aria rilevate nell'infisso W3F93 presente nella stanza n°61 (lato via VI Novembre).

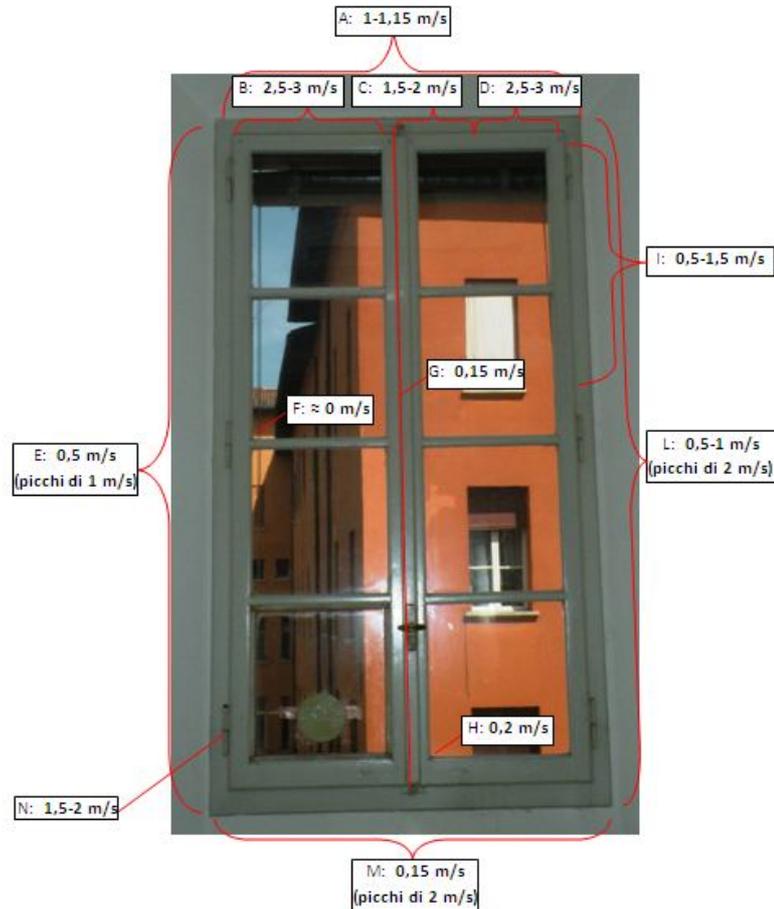


Figura 7.20: Infiltrazioni di aria rilevate nell'infisso W3F109 presente nella stanza n°62 (lato cortile).

7.4.1.2 COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE

7.4.1.2.1 Sala Urbana

In data 8 Aprile 2011 è stato effettuato il Blower Door Test nella Sala Urbana, tale zona appartiene alle Collezioni Comunali d'Arte ed è situata al secondo piano di Palazzo D'Accursio. La Sala Urbana fu fatta costruire intorno al 1750 dal Cardinale Girolamo Farnese; le sue pareti sono state affrescate, verso metà settecento, con circa duecento stemmi inerenti i governatori e legati pontefici che ressero la città di Bologna a partire dal XIV secolo, per tale ragione è conosciuta anche come Sala degli Stemmi (Fig. 7.21). Il soffitto, decorato con affreschi come il resto della Sala, presenta una doppia orditura di travi principali e travetti secondari visibili mediante l'ausilio di una termocamera (Fig. 7.22).



Figura 7.21: Sala Urbana, Collezioni Comunali.

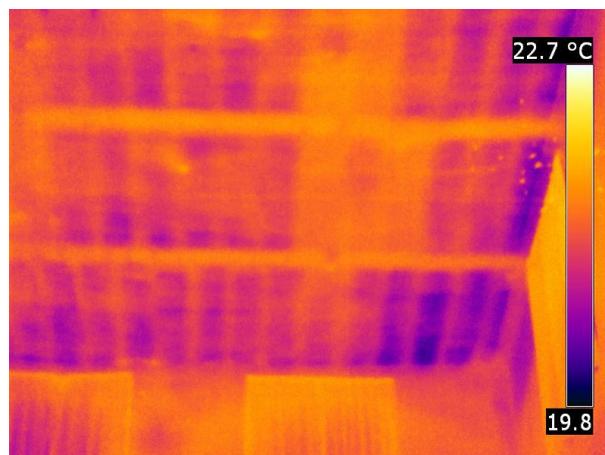


Figura 7.22: Termogramma relativo al soffitto della Sala Urbana.

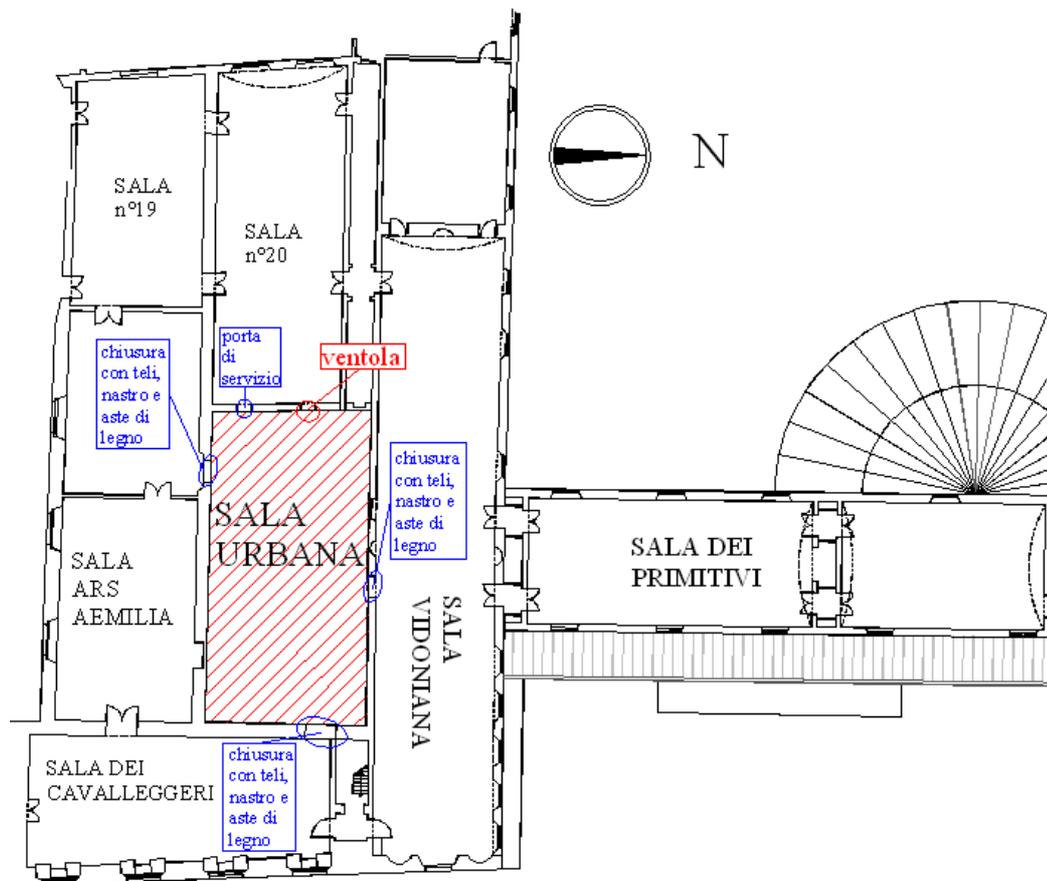


Figura 7.23: Pianta della Sala Urbana, e delle sale circostanti, con indicazioni relative al Blower Door Test.

Come è indicato nella pianta dell'area in esame (Fig. 7.23), la strumentazione del Blower Door, ed in particolare la ventola, è stata installata nella porta presente nella parete situata ad ovest e che si affaccia nella stanza n°20 (Fig. 7.24); la porta in esame è alta 2.69 metri e larga 1.35 metri. Per una corretta esecuzione del test il ventilatore dovrebbe essere in comunicazione con l'esterno ma in tal caso ciò non risulta possibile poiché la Sala Urbana non presenta infissi che si affacciano all'esterno dell'edificio; è stato risolto il problema lasciando aperte, durante la prova, le due finestre presenti nella sala n°20. Le altre tre aperture presenti nella Sala Urbana sono state sigillate mediante l'utilizzo di teli in nylon fissati con il nastro adesivo (Fig. 7.25-7.26); è stato cercato di applicare il nastro adesivo sul cornicione in pietra, piuttosto che sulle pareti dipinte ed affrescate, in modo tale che l'intervento fosse il meno invasivo possibile. Tali chiusure sono state ulteriormente rafforzate mediante l'interposizione di aste in legno trasversali opportunamente tagliate in sito pari alla larghezza delle aperture presenti (Fig. 7.27).

Sulla parete ovest, in cui è stato installato il ventilatore, è presente anche una porta di servizio che, essendo in realtà murata, non è stato necessario sigillare come le altre aperture.



Figura 7.24: Installazione della strumentazione del Blower Door nella Sala Urbana.

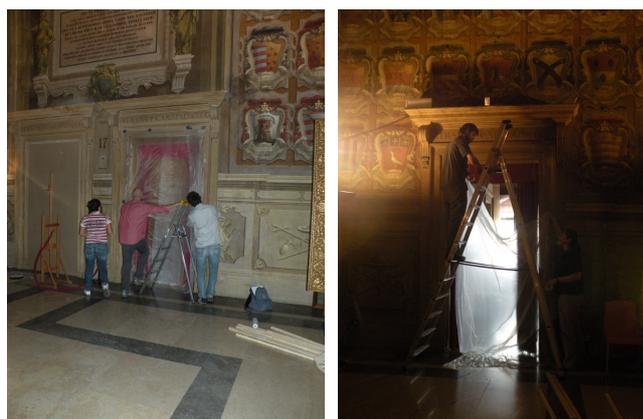


Figura 7.25: Installazione del telo in nylon sulle aperture presenti nella parete nord e nella parete est.



Figura 7.26: Chiusure mediante teli di nylon, nastro adesivo e aste di legno delle aperture situate, rispettivamente, nella parete nord, est e sud della Sala Urbana.



Figura 7.27: Preparazione delle aste in legno utilizzate per effettuare le chiusure.

Nella Sala Urbana sono presenti anche 10 infissi situati nella parte superiore delle pareti a ridosso del soffitto, essi presentano una base pari a 153 cm ed un'altezza pari a 238 cm (Fig. 7.28). Per svolgere la prova in modo corretto essi sono stati tutti chiusi ed, in particolare, è stato necessario rimuovere il sensore installato nell'infisso situato esattamente sopra la porta in cui è stato posizionato il ventilatore al fine di poter effettuare anche la sua chiusura.



Figura 7.28: Inquadratura interna ed esterna di un infisso tipo della Sala Urbana.

Prima di proseguire con lo svolgimento del test sono stati inseriti nel software i seguenti dati:

- $V_{TOT} \approx 1665 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 26,5^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 28^\circ\text{C}$ (T_{SALAn}^{20});
- Vento assente;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

Al termine di tali operazioni preliminari per la preparazione dell'area da analizzare si prosegue con una prova del test (h. 16.12) raggiungendo un $\Delta p_{max} \approx 55$ Pa; si decide quindi di svolgere il test a partire dal valore di $\Delta p = 55$ Pa fino al raggiungimento, mediante intervalli regolari di 5 Pa, del valore di $\Delta p = 10$ Pa. Durante tale prova è stato notato che la chiusura realizzata nell'apertura presente sulla parete situata a sud aveva ceduto in sommità per cui, prima di effettuare il test, si rafforza tale chiusura inserendo un ulteriore asta di legno nella parte superiore (Fig. 7.29).



Figura 7.29: Cedimento, in sommità, della sigillatura dell'apertura presente nella parete sud e relativo rafforzamento della chiusura con ulteriore aste in legno.

Terminata sia la fase di prova sia il rafforzamento delle sigillature è stato effettuato il test, dapprima in una condizione di depressione (h. 16.40) ed in seguito di pressione (h. 17.00). Durante la prova il software, raggiunto il valore di ≈ 40 Pa, ha richiesto l'applicazione sul ventilatore del disco A sia per la fase in depressione sia in pressione (Fig. 7.30) mentre raggiunto il valore di 15 Pa è stato necessario inserire, per la sola fase in pressione, il disco B. Durante lo svolgimento di tale test nella Sala Urbana la ricerca dei punti non ermetici non è stata effettuata in quanto gli infissi, in genere elementi disperdenti, sono impossibili da raggiungere dall'interno essendo situati a ridosso del soffitto e non è stata focalizzata l'attenzione su ulteriori punti critici quali, ad esempio, i condotti di riscaldamento situati nel pavimento presenti in quasi la totalità del perimetro della Sala.



Figura 7.30: Disco di plastica A applicato al ventilatore.

7.4.1.2.2 Sala dei Primitivi e Sala del '500

In data 11 Aprile 2011 è stato effettuato il Blower Door Test nella Sala dei Primitivi e nella Sala del '500, tali sale sono consecutive tra loro e data la loro piccola volumetria sono state testate in un'unica prova. Esse hanno inoltre le stesse caratteristiche costruttive in quanto entrambe sono dotate di pavimento in parquet e falsa volta, come è possibile notare dai rilievi termografici effettuati (Fig. 7.31-7.32).



Figura 7.31: Sala dei Primitivi (n°5) e termogramma del soffitto nell'angolo nord-est.

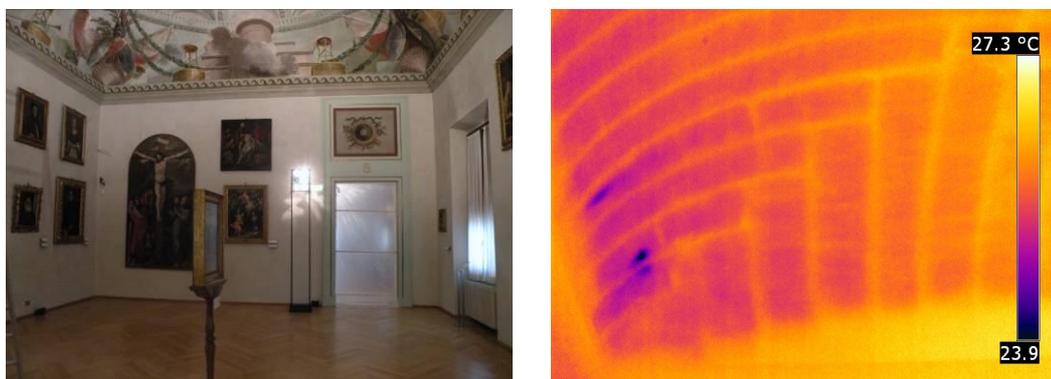


Figura 7.32: Sala del '500 (n°6) e termogramma del soffitto nell'angolo nord-ovest.

Per la zona in esame è stato pensato di installare il ventilatore sulla prima apertura presente tra la Sala dei Primitivi e la Sala Vidoniana; con tale strategia sarà

possibile, in seguito, utilizzare tale sistemazione della strumentazione per effettuare anche il test della Sala Vidoniana. L'apertura presente nella parete sud della Sala dei Primitivi, e scelta per il posizionamento del ventilatore, è alta 2.56 metri e larga 1.27 metri; essendo tali valori superiori alle dimensioni massime del telaio del Blower Door Test è stato necessario porre dei blocchi di EPS, alti singolarmente 10 cm ed opportunamente tagliati in sito, sia sotto sia di lato al ventilatore (Fig. 7.33).



Figura 7.33: Posizionamento dei blocchi di EPS e della ventola nella Sala dei Primitivi.

Durante lo svolgimento della prova, non essendo il ventilatore posto a diretto contatto con l'esterno, sono stati lasciati aperti gli infissi della Sala Vidoniana ed il tubo bianco, rilevante le condizioni esterne all'edificio, è stato posizionato sul davanzale dell'infisso adiacente l'apertura dove è stato installato il ventilatore. Di fianco al ventilatore è presente un vano la cui porta è stata chiusa a chiave e sigillata mediante nastro adesivo in quanto esso ha, in sommità, un infisso che non è stato possibile chiudere.

Per effettuare l'isolamento dell'area in esame sono state realizzate due chiusure sulle aperture presenti, rispettivamente, tra la Sala Vidoniana e la Sala dei Primitivi ed alla fine della Sala del '500. Le chiusure (Fig. 7.34-7.35) sono state effettuate utilizzando un telo in nylon mantenuto fisso mediante il posizionamento, all'interno dell'apertura, di un telaio in legno; tali telai sono stati realizzati mediante aste appositamente tagliate, in sito, delle stesse dimensioni del vano da sigillare ed applicate ad esso mediante l'ausilio di un martello. La chiusura dell'apertura presente al termine della Sala del '500 è risultata maggiormente complessa in quanto è presente, nella parte inferiore, uno zoccolo ed è stato necessario, quindi, realizzare un telaio in legno che in

basso fosse meno largo rispetto alla parte superiore. Tali chiusure sono state ulteriormente rafforzate da aste di legno posizionate diagonalmente al telaio di legno realizzato ed i teli sono stati, mediante nastro adesivo, fissati ulteriormente al telaio e, nella parte inferiore, al pavimento della sala.



Figura 7.34: Sigillatura delle chiusure, mediante aste in legno, teli in nylon e nastro adesivo, delle aperture presenti, rispettivamente, nella parete sud della Sala dei Primitivi e nella parete nord della Sala del '500.



Figura 7.35: Particolari della sigillatura effettuata nella parete nord della Sala del '500.

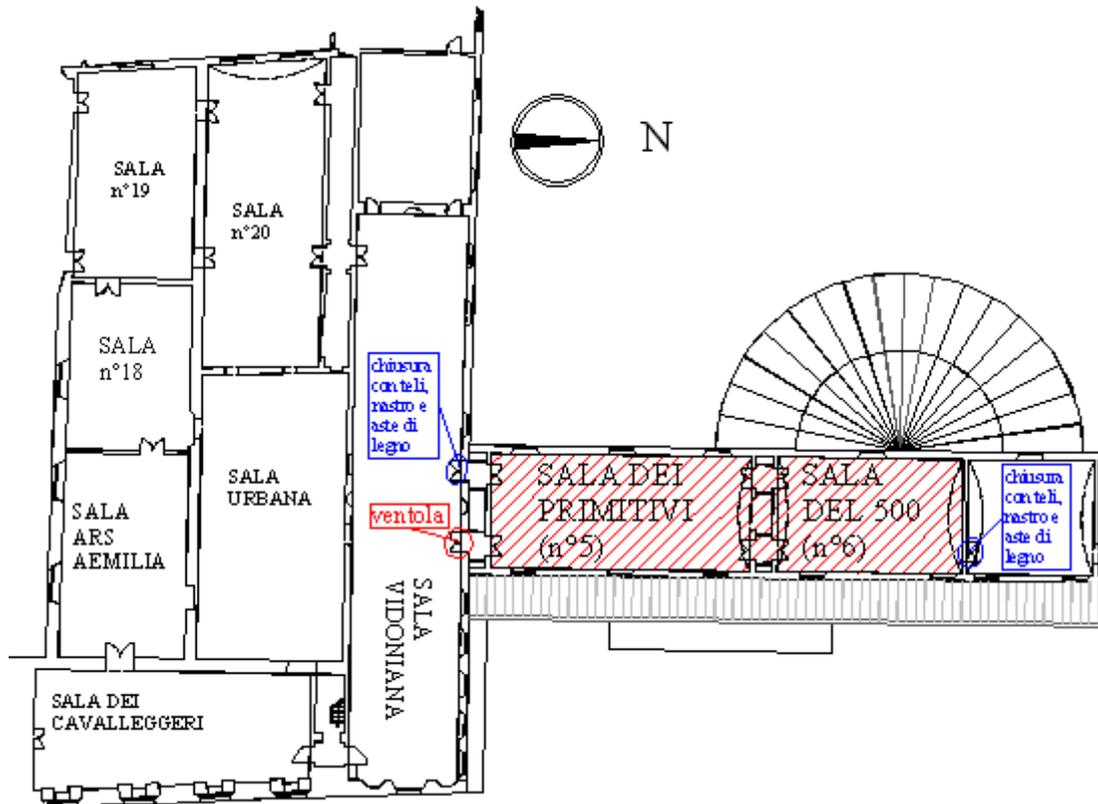


Figura 7.36: Pianta della Sala dei Primitivi e Sala del '500 contenente le indicazioni inerenti l'isolamento del volume in esame ed il posizionamento della strumentazione del Blower Door Test.

Terminata la procedura preparatoria ed installata tutta la strumentazione necessaria per lo svolgimento del test (Fig. 7.36) sono stati inseriti, nel software, i dati necessari per la prova in esame:

- $V_{TOT} = V_{PRIMITIVI} + V_{500} = (668 + 444) \approx 1175 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 24,5^{\circ}\text{C}$;
- $T_{esterna} = 22,5^{\circ}\text{C}$;
- Vento leggero;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

Prima di effettuare il test è stato controllato che tutti gli infissi presenti all'interno dell'area da analizzare fossero correttamente chiusi ed è stata effettuata una prova in depressione (h. 11.15) per la valutazione del Δp_{max} raggiungibile; durante tale prova le chiusure delle aperture, in alcuni punti, hanno ceduto ed è stato necessario spegnere il ventilatore e provvedere alla riparazione. In particolare è stata rafforzata,

con ulteriori aste trasversali in legno, la chiusura realizzata tra la Sala Vidoniana e la Sala dei Primitivi poiché in essa erano state notate le perdite maggiori (Fig. 7.37); nella chiusura realizzata nella Sala del '500, dove le perdite di aria percepite mediante l'utilizzo delle mani non erano elevate, si è preferito non intervenire per non applicare ulteriore nastro adesivo tra il telo di nylon e l'architrave dell'apertura che, essendo laccato, si sarebbe potuto gravemente danneggiare.



Figura 7.37: Rafforzamento della chiusura effettuata sull'apertura presente tra la Sala Vidoniana e la Sala dei Primitivi.

Terminata la riparazione delle chiusure è stata di nuovo effettuata una prova in depressione (h. 11.30) per valutare il Δp_{\max} raggiungibile; in tali condizioni è stato raggiunto un $\Delta p_{\max} \approx 60$ Pa. A partire dal valore di $\Delta p = 55$ Pa è stato quindi effettuato il test in depressione (h. 11.35) fino al raggiungimento del valore di 10 Pa mediante intervalli costanti di 5 Pa; a circa 30 Pa è stato necessario installare il disco A sul ventilatore.

Al termine del test in depressione è stata effettuata, mediante l'utilizzo di un anemometro, la ricerca dei punti non ermetici dell'area in esame; in particolare sono state rilevate le infiltrazioni presenti sul secondo infisso del lato della Sala dei Primitivi che si affaccia su Piazza Maggiore (lato est) (Fig. 7.38); è stato effettuato un solo rilievo poiché tutti gli infissi dell'area sottoposta al Blower Door Test sono uguali tra loro. Mediante l'utilizzo della termocamera FLIR B400 sono stati inoltre visualizzati, per l'infisso in esame, i punti non ermetici attraverso cui vi sono infiltrazioni d'aria; in particolare è stata notata la presenza di zone più fredde rispetto all'ambiente circostante nell'intorno perimetrale degli infissi (Fig. 7.39).

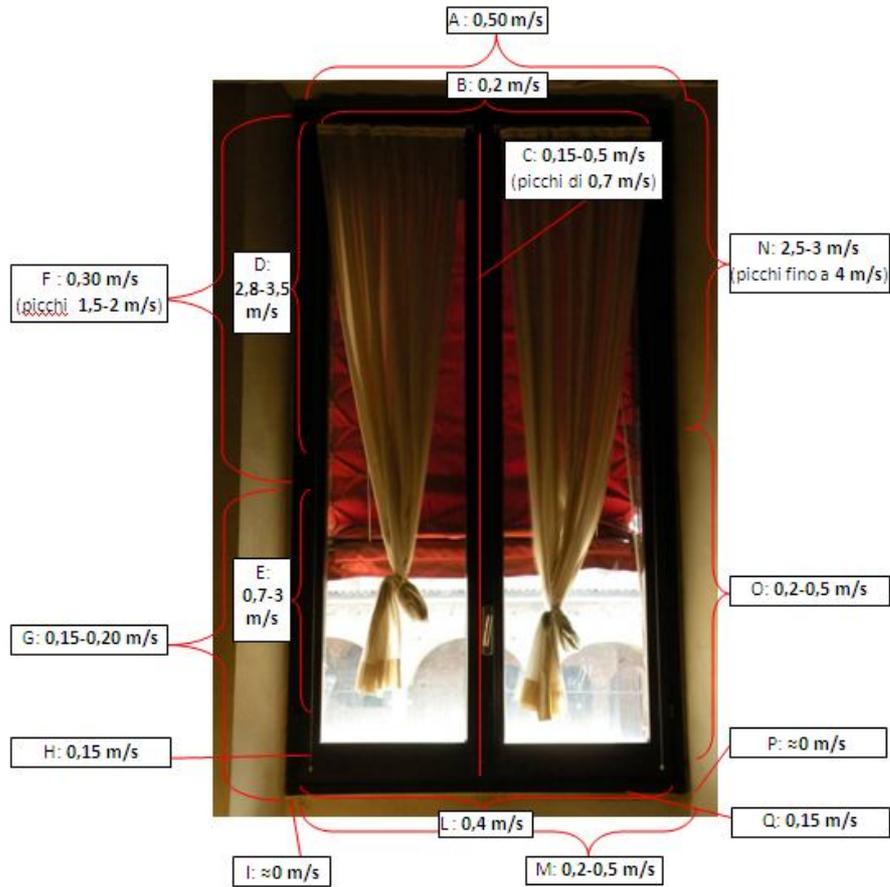


Figura 7.38: Infiltrazioni di aria rilevate in un infisso tipo della parete est dell'area analizzata.



Figura 7.39: Termogramma dell'infisso tipo sul lato est della Sala dei Primitivi.

Sono state inoltre effettuate, utilizzando l'anemometro, misurazioni sul pavimento della Sala dei Primitivi per verificare se fossero presenti delle infiltrazioni; nello specifico sono stati analizzati sia la porzione di parquet al di sotto dell'infisso situato sul lato est e precedentemente analizzato (Fig. 7.40) sia il condotto degli

impianti collocato nel pavimento di marmo nelle vicinanze dell'apertura, opportunamente sigillata, tra la Sala dei Primitivi e la Sala Vidoniana (Fig. 7.41). Mediante l'utilizzo della termocamera FLIR B400 è stato possibile anche inquadrare il condotto in esame (Fig. 7.42) e supporre che, essendo un punto caldo rispetto alla zona circostante, al di sotto di esso vi siano probabilmente i tubi dell'impianto di riscaldamento della sala in esame.



Figura 7.40: Infiltrazioni di aria rilevate nel pavimento in parquet della Sala dei Primitivi.



Figura 7.41: Infiltrazioni di aria rilevate nel condotto degli impianti nella porzione di pavimento in marmo della Sala dei Primitivi.



Figura 7.42: Termogramma del condotto degli impianti a pavimento nella Sala dei Primitivi.

Infine, seguendo le stesse modalità della prova in depressione, è stato invertito il ventilatore ed effettuato il test in pressione (h. 12.30); al raggiungimento di circa 20 Pa è stato richiesto di applicare il disco A. A causa di un errore tecnico il software non ha fornito il valore di ricambi d'aria.

7.4.1.2.3 Sala Vidoniana

In data 11 Aprile 2011 è stato effettuato il Blower Door Test anche nella Sala Vidoniana; tale zona appartiene alle Collezioni Comunali d'Arte ed è adiacente sia alla Sala Urbana sia alla Sala dei Primitivi, precedentemente analizzate. La Sala, o Galleria Vidoniana, fatta costruire nel 1665 per volere del cardinale Pietro Vidoni, è nota per la presenza, sotto la falsa volta affrescata, di diciotto importanti tele di soggetto mitologico ed allegorico eseguite fra il 1713 ed il 1723 circa da Donati Creti. (Zucchini G., 1938) (Fig. 7.43).

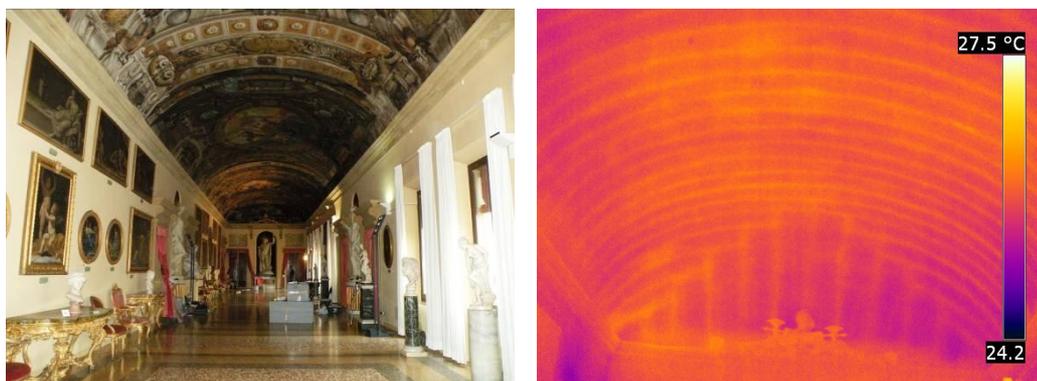


Figura 7.43: Sala Vidoniana e termogramma della falsa volta affrescata.

Realizzare l'isolamento di tale area rispetto alla zona circostante non è risultato complesso in quanto la Sala Vidoniana è collegata alle sale adiacenti mediante due sole aperture e quattro porte. Dai test svolti in precedenza è risultato che l'elemento più difficoltoso ed ostile da sigillare sono state sempre le aperture presenti sulle pareti in quanto è necessario installare su di esse un telo in nylon fissato mediante telaio in legno e nastro adesivo; in tale prova le due aperture, che collegano la Sala Vidoniana, rispettivamente, alla Sala Urbana ed alla Sala dei Primitivi, sono state utilizzate nelle prove precedenti e quindi risultavano già chiuse.

Le porte restanti, presenti sulle pareti sud ed ovest della Sala, sono state chiuse ed ulteriormente sigillate; in particolare la chiusura delle tre porte in legno è stata rafforzata ponendo dei teli di nylon tra le ante, mentre la porta che collega la Sala Vidoniana alla Sala n°20 è stata chiusa a chiave e sigillata, lungo il perimetro, con nastro adesivo. Durante lo svolgimento del test, per evitare che le tre porte in legno si aprissero, essendo stati accostati, sono stati tenuti manualmente da alcuni operatori.

Il ventilatore è stato lasciato nella stessa posizione in cui è stato installato per la prova precedente ossia nella prima apertura presente tra la Sala Vidoniana e la Sala dei Primitivi; per ovviare al fatto che il ventilatore non fosse in comunicazione diretta con l'esterno dell'edificio sono stati aperti alcuni infissi della Sala dei Primitivi.

Nella pianta della zona in esame (Fig. 7.44) sono riportate le indicazioni inerenti l'installazione della strumentazione necessaria per lo svolgimento del Blower Door Test e le chiusure realizzate al fine di isolare la Sala Vidoniana dal resto dell'edificio.

Sono stati infine inseriti nel software i dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} \approx 1172 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 24.5^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 22.5^\circ\text{C}$;
- Vento leggero;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

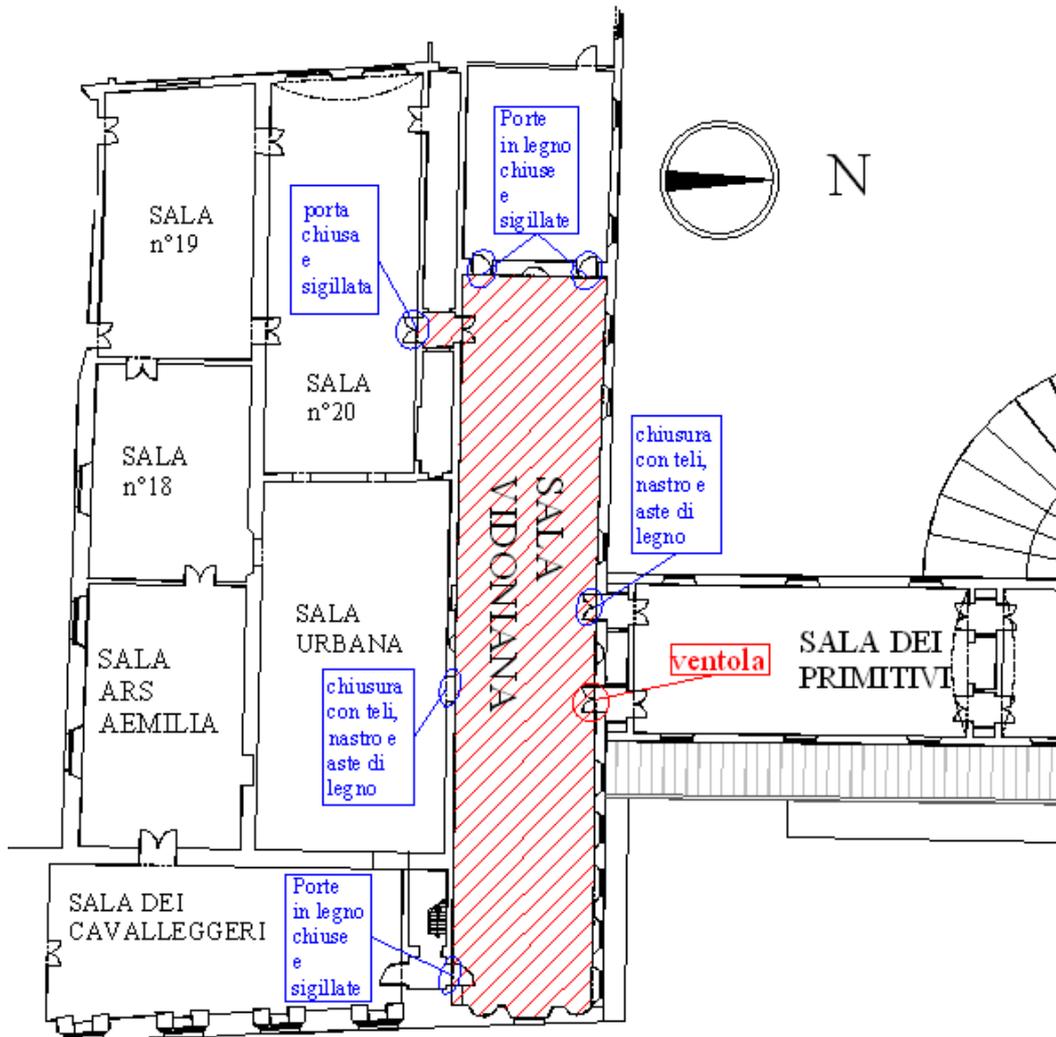


Figura 7.44: Pianta della Sala Vidoniana, e delle sale circostanti, con indicazioni relative al Blower Door Test.

Prima di effettuare il test è stata azionata la ventola (h. 13.55) ed, in tali condizioni, è stato raggiunto un valore di $\Delta p_{\max} = 50 \text{ Pa}$ che è stato impostato come il valore massimo da cui far iniziare la prova. A partire da tale valore è stato quindi effettuato il test, sia in depressione (h. 14.18) sia in pressione (h. 14.30), fino al raggiungimento, mediante intervalli variabili, di una differenza di pressione $\Delta p = 10 \text{ Pa}$.

In tale prova non è stata effettuata la ricerca dei punti non ermetici dell'area in esame; tuttavia è stata notata la presenza, lungo i lati nord, sud ed ovest del pavimento, dei condotti degli impianti.

7.4.1.2.4 Sala n°20, Sala n°19 e Sala n°18

Infine è stata effettuata, in data 11 Aprile 2011, la prova nelle sale n°20, n°19 e n°18 che rappresentano il proseguimento dell'anello concentrico di stanze che si sviluppano intorno alla Sala Urbana, prima area delle Collezioni Comunali analizzata. Le tre stanze si differenziano tra loro sia in termini di contenuti sia di struttura, infatti, il soffitto della sala n°20 e n°19 è una falsa volta mentre la Sala n°18 presenta un soffitto a cassettoni con doppia orditura di travi principali e travetti secondari (Fig. 7.45-7.47).

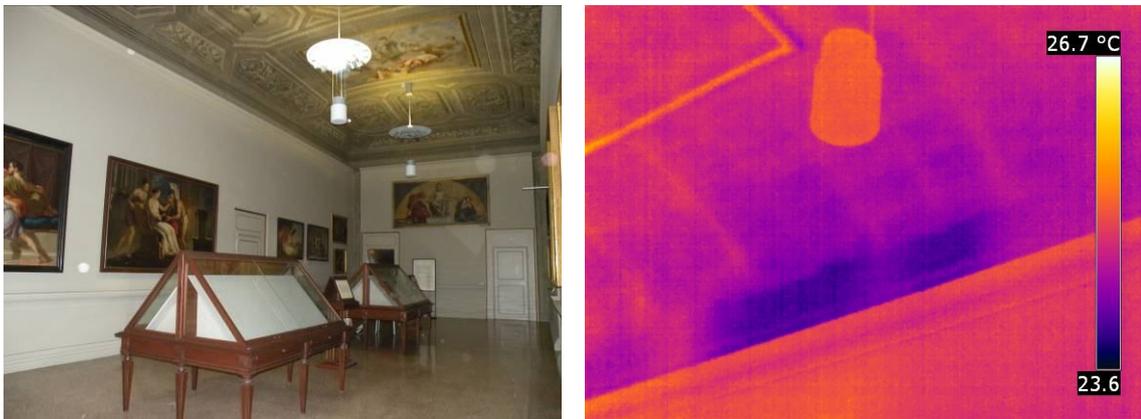


Figura 7.45: Vista generale e termogramma della falsa volta della Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20).

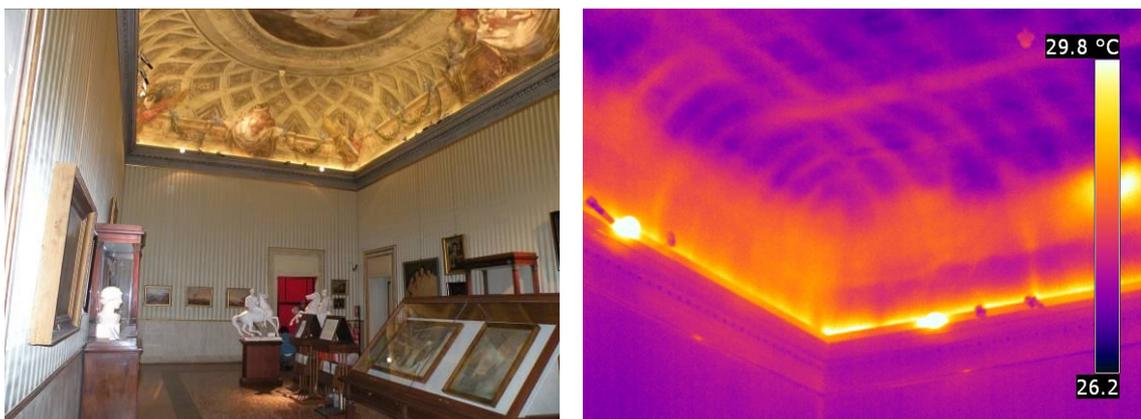


Figura 7.46: Vista generale e termogramma della falsa volta della Sala della Repubblica Cispadana (n°19).



Figura 7.47: Vista generale e soffitto a cassettoni della Sala n°18.

Svolgere il test in diverse zone appartenenti alla stessa area di Palazzo D'Accursio ed adiacenti tra loro semplifica notevolmente la procedura di preparazione e di svolgimento della prova. In particolare, per le tre sale in esame, è stato necessario effettuare solamente due nuove chiusure, rispettivamente nell'apertura presente nella parete est della Sala n°18 e nell'apertura tra la Sala Urbana e la Sala n°20 che, in precedenza, era stata utilizzata per posizionare la ventola durante il test nella Sala Urbana e quindi non era stata sigillata. Entrambe le chiusure, come nelle prove precedenti, vengono effettuate mediante l'apposizione di un telaio in legno preparato in sito, un telo di nylon e nastro adesivo.

L'apertura presente tra la Sala n°18 e la Sala Urbana era già sigillata per la prova svolta in precedenza. Nella sala n°20 e nella sala n°19 sono, inoltre, presenti due porte di servizio che essendo e due porte in legno chiuse con l'apposita chiave.

La ventola è stata posizionata nella porta in legno presente tra la Sala Vidoniana e la Sala n°20 e, durante la prova, sono stati lasciati aperti gli infissi presenti nella Sala Vidoniana.

Terminata la preparazione dell'area ed il posizionamento della strumentazione (Fig. 7.48) sono stati inseriti, all'interno del software, i seguenti dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} \approx 1616 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 25.5^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 27.5^\circ\text{C}$;
- Vento leggero;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

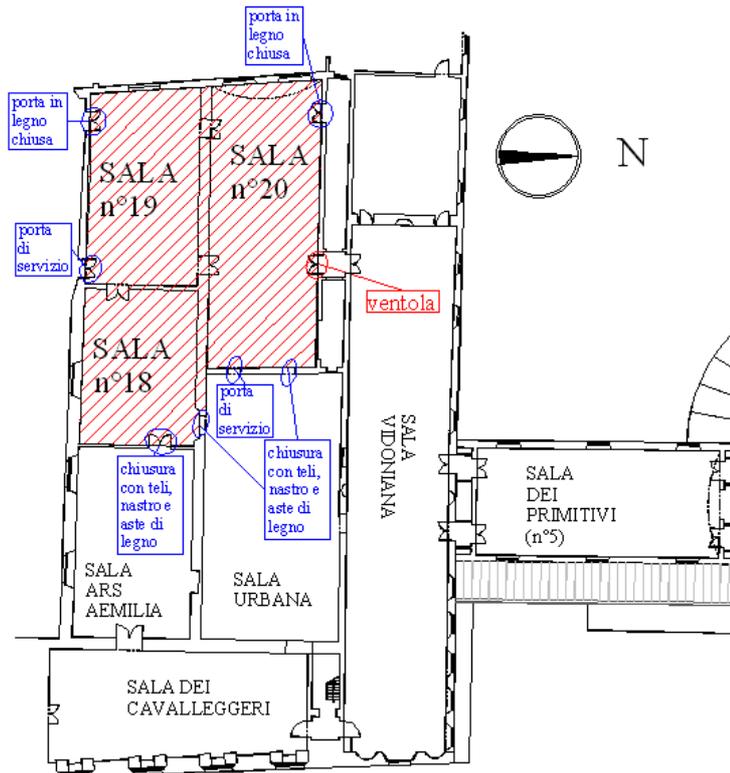


Figura 7.48: Pianta della Sala n°20, n°19 e n°18 con indicazioni relative al Blower Door Test.

In seguito, avendo azionato il ventilatore (h. 15.41) e raggiunto in tali condizioni un $\Delta p_{\max} = 30$ Pa, è stato deciso di eseguire la prova a partire dal valore di $\Delta p_{\max} = 30$ Pa fino al raggiungimento, mediante steps regolari di 2 Pa, del valore di $\Delta p = 12$ Pa.

Secondo tali modalità è stato effettuato il test in depressione (h. 15.55) ed in pressione (h. 16.07); durante la prova eseguita nelle tre sale non è stata eseguita la ricerca dei punti non ermetici mediante anemometro. Tuttavia, durante la fase di depressione, sono state rilevate delle grandi perdite, percepite con le mani, in corrispondenza della griglia metallica del condotto degli impianti presente nel lato ovest della Sala n°19.

7.4.2 SECONDA CAMPAGNA DI ACQUISIZIONE DATI

7.4.2.1 UFFICI COMUNALI (2° TRAPIANO)

In data 31 Maggio 2011 è stato effettuato il Blower Door Test nel corridoio del primo piano di Palazzo D'Accursio (Fig. 7.49) su cui si affacciano gli uffici dei

consiglieri municipali; l'area in esame è caratterizzata da controsoffitto e pavimento in granito ad eccezione di alcune stanze che hanno il parquet.

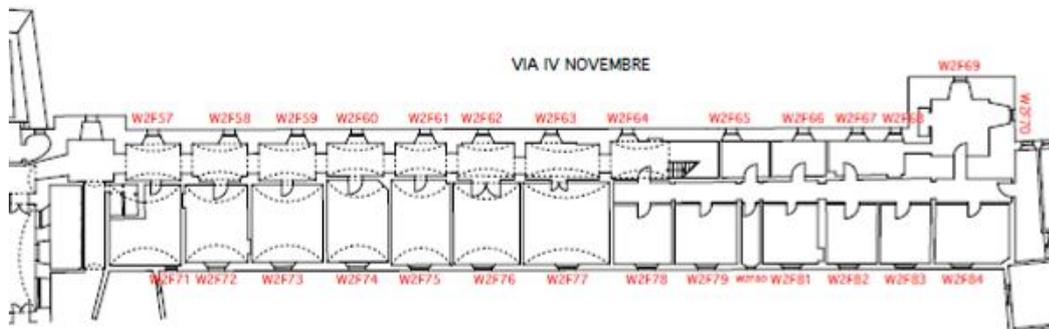


Figura 7.49: Pianta del corridoio del primo piano di Palazzo D'Accursio.

Il corridoio in esame è suddiviso in due tronchi differenti (Fig. 7.50) in quanto presenta una deviazione in corrispondenza dell'apertura del vano scala che collega tale piano al piano superiore; le due sotto-aree presentano una lunghezza pari a, rispettivamente, 25 m e 37 m. Per delimitare l'area del corridoio da sottoporre al test sono state sigillate, mediante l'utilizzo di nastro adesivo, la porta con telaio in legno e la porta scorrevole situate alle due estremità (Fig. 7.51). Sono stati inoltre sigillati, mediante nastro adesivo, sia la porta della bussola del vano scala che permette il collegamento del piano in esame con il piano superiore sia i fori, presenti sul vetro degli infissi delle stanze dotate di impianti di condizionamento, che sono necessari all'impianto per prelevare aria dall'esterno (Fig. 7.52).



Figura 7.50: Tronchi del corridoio del primo piano di Palazzo D'Accursio.



Figura 7.51: Porte alle estremità del corridoio sigillate con nastro adesivo.



Figura 7.52: Porta d'accesso al vano scala e fori per l'impianto di condizionamento sigillati con nastro adesivo.

A differenza del piano superiore, il corridoio in esame non presenta un cammino di ronda per cui gli infissi non sono raggiungibili dall'esterno. Da tale osservazione nasce l'esigenza di posizionare la strumentazione del test non su una finestra bensì su una porta interna altrimenti non sarebbe stato possibile effettuare la prova in pressione; durante la prova in pressione, infatti, il ventilatore è rivolto verso l'esterno ed è necessaria la presenza di un operatore che all'inizio ed al termine della prova ponga su di esso il telo di copertura. È stato scelto quindi di posizionare il ventilatore nel vano della porta della stanza n°44 (Fig. 7.53) lasciando aperta la finestra della stanza stessa e posizionando il tubo bianco, necessario per rilevare le condizioni esterne, al di fuori dell'infisso. La porta in esame presenta, nella sua parte superiore, una luce che è stata sigillata con nastro adesivo.



Figura 7.53: Posizionamento della strumentazione nella porta della stanza n°44.

La pianta del corridoio in esame (Fig. 7.54) mostra la posizione del ventilatore, l'effettiva volumetria considerata e le chiusure effettuate descritte in precedenza. Prima di iniziare lo svolgimento della prova è stato controllato che tutti gli infissi fossero chiusi e le porte, delle stanze adiacenti al corridoio, fossero aperte e sono stati inseriti nel software tali dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} = (530 + 843) \approx 1374 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 26^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 25^\circ\text{C}$;
- Vento assente;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

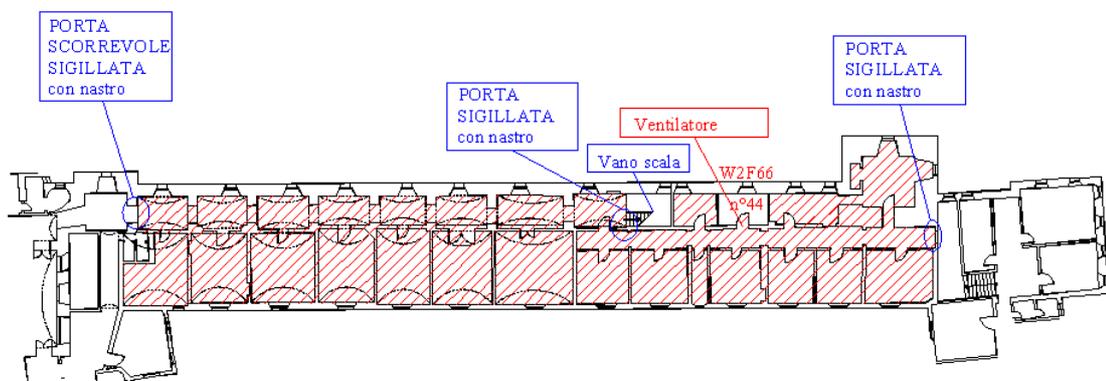


Figura 7.54: Pianta del corridoio del primo piano del corpo Uffici di Palazzo D'Accursio con le informazioni inerenti lo svolgimento del Blower Door Test.

Terminata la procedura preparatoria, alle ore 10.30, è stato azionato manualmente il ventilatore ed è stato raggiunto, per la zona in esame, un Δp_{\max} pari a 55 Pa; da tale valore è stato deciso di far partire il test fino al valore di $\Delta p = 10$ Pa mediante intervalli regolari di 5 Pa.

È stata quindi eseguita la prova sia in depressione (h. 11.20) sia in pressione (h. 12.00) e raggiunto il valore di $\Delta p = 20$ Pa è stato richiesto, durante entrambe le fasi, di applicare il disco A al ventilatore. Sottoponendo l'area ad una depressione costante con $\Delta p = 50$ Pa e è stata effettuata infine la ricerca dei punti non ermetici mediante l'utilizzo dell'anemometro; in particolare è stato esaminato un infisso tipo del lato via IV novembre (W2F69, stanza 40) (Fig. 7.55).

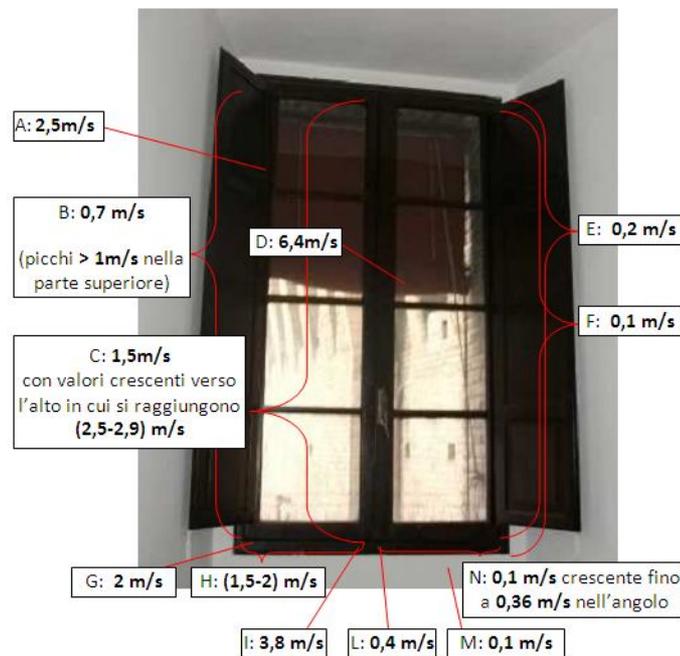


Figura 7.55: Infiltrazioni di aria rilevate, mediante anemometro, nell'infisso W2F69 presente nella stanza 40.

Durante tale fase, a supporto dell'anemometro con cui sono state rilevate le velocità delle infiltrazioni d'aria, è stata utilizzata la termocamera FLIR P620 per cercare di individuare i punti non ermetici e la dispersione termica presenti nel perimetro dell'infisso W2F69 (Fig. 7.56). Infine, mantenuto sempre in funzione il ventilatore con un Δp costante pari a 50 Pa, è stato acceso un fumogeno per effettuare una verifica visiva sull'aria che filtra attraverso i punti non ermetici dell'involucro edilizio. In particolare è stato posizionato un fumogeno Softair giallo della durata di 60 secondi sul davanzale esterno dell'infisso W2F69, è stato azionato manualmente

mediante sfregamento ed è stato chiuso l'infisso; la quantità di fumo che riesce ad entrare dall'esterno all'interno della stanza non è trascurabile (Fig. 7.57).

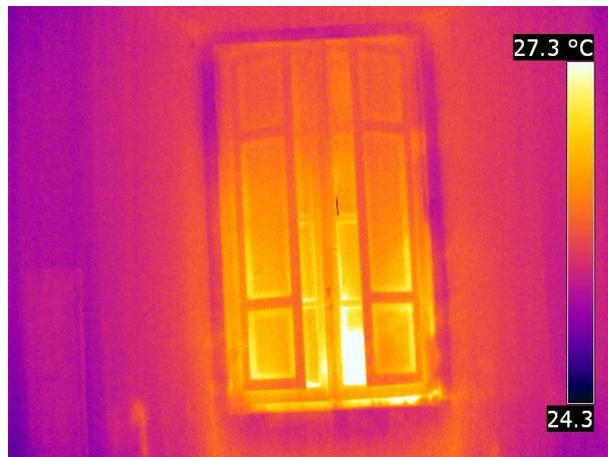


Figura 7.56: Visualizzazione delle infiltrazioni di aria nell'infisso W2F69.



Figura 7.57: Visualizzazione delle infiltrazioni di aria nell'infisso W2F69 mediante l'utilizzo di un fumogeno.

7.4.2.2 COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE

7.4.2.2.1 Sala Urbana

Essendo andata persa parte dei dati acquisiti nella prima campagna d'indagine, causa guasto tecnico, il 31 Maggio 2011 è stato necessario effettuare di nuovo il Blower Door Test nella Sala Urbana. Il ventilatore e le chiusure sono state realizzate nella stessa posizione della prova effettuata il giorno 8 Aprile 2011, descritto in precedenza.

In tal caso, per velocizzare la procedura preparatoria del test, è stato pensato di chiudere le tre aperture presenti con teli in nylon tenuti perfettamente aderenti al

cornicione mediante dei telai in legno; i telai in legno sono stati preparati conoscendo le esatte dimensioni di ogni apertura e posizionati, in sito, mediante l'utilizzo di un martello (Fig. 7.58). Per fare in modo che i telai fossero perfettamente aderenti all'apertura e non passasse aria tra telaio e muro è stato interposto, ove necessario, nastro adesivo di gomma sintetica. I teli di nylon sono stati fissati ulteriormente mediante nastro adesivo applicato sull'architrave in pietra delle aperture ed in basso mediante nastro adesivo applicato al pavimento della sala (Fig. 7.59). Per rendere le chiusure realizzate maggiormente stabili e resistenti sono stati infine posizionati, in ciascuna apertura, delle aste in legno ortogonali al telaio; alle estremità di ogni travetto è stato posto del cartone per essere certi che la presa tra telaio e travetti fosse perfetta (Fig. 7.60).



Figura 7.58: Montaggio dei telai in legno all'interno delle aperture.



Figura 7.59: Fissaggio dei teli di nylon al pavimento mediante nastro adesivo.



Figura 7.60: Chiusure delle aperture situate, rispettivamente, sulla parete nord, est e sud della Sala Urbana realizzate mediante telai e travetti in legno, teli di nylon e nastro adesivo.

Nel software sono stati, infine, inseriti tali dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} = 16.83 \times 11.62 \times 8.55 \approx 1672 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 28,5^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 30^\circ\text{C}$ ($T_{SALA} \approx 20$);
- Vento assente;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

Il volume inserito è differente, seppur di poco, dalla prova svolta in precedenza in quanto è stato calcolato mediante l'utilizzo di un disto maggiormente affidabile.

Prima di effettuare il test è stata sottoposta l'area ad una prova di depressione (h. 15.35) ed è stato raggiunto un $\Delta p_{max} = 50 \text{ Pa}$ per cui è stato deciso di eseguire la prova dal valore di $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ fino al valore di $\Delta p = 10 \text{ Pa}$ mediante intervalli variabili. Durante tale fase è stato però notato che alcune aste in legno, applicate sulla chiusura realizzata nell'apertura situata nella parete a sud della Sala, non hanno retto al flusso di aria instaurato mediante il ventilatore e sono cadute a terra; prima di iniziare il test tali elementi lignei sono stati riposizionati sulla chiusura in esame a cui è stata ulteriormente aggiunta, nella parte superiore, una nuova asta in legno (Fig. 7.61). Per essere ulteriormente certi della resistenza delle chiusure durante il test, sono stati appoggiati dei pannelli in plexiglas nella parte inferiore delle aperture presenti nelle pareti situate a nord ed a sud della Sala; applicando tali pannelli una quotaparte della forza viene scaricata su di essi e sia il telaio in legno sia il telo in nylon risultano meno sollecitati.



Figura 7.61: Rafforzamento della chiusura realizzata nell'apertura presente nella parete situata a sud.

Terminata la procedura preparatoria, la prova del test ed il rafforzamento delle chiusure realizzate è stato svolto il test sottoponendo l'area in esame ad una depressione (h. 15.40) decrescente; raggiunto il valore di 30 Pa è stato richiesto l'applicazione del disco A. Durante lo svolgimento della prova tre operatori si sono posizionati davanti i teli in nylon per cercare, con il proprio corpo, di contrastare la forza scaricata sui teli stessi.

Durante la fase di depressione è stata inoltre effettuata la ricerca dei punti non ermetici rilevando con l'anemometro le eventuali infiltrazioni d'aria presenti; sono stati esaminati, in particolare, i condotti degli impianti collocati a pavimento lungo le pareti della sala in esame non presi in considerazione durante il test svolto in precedenza (Fig. 7.62-7.63).

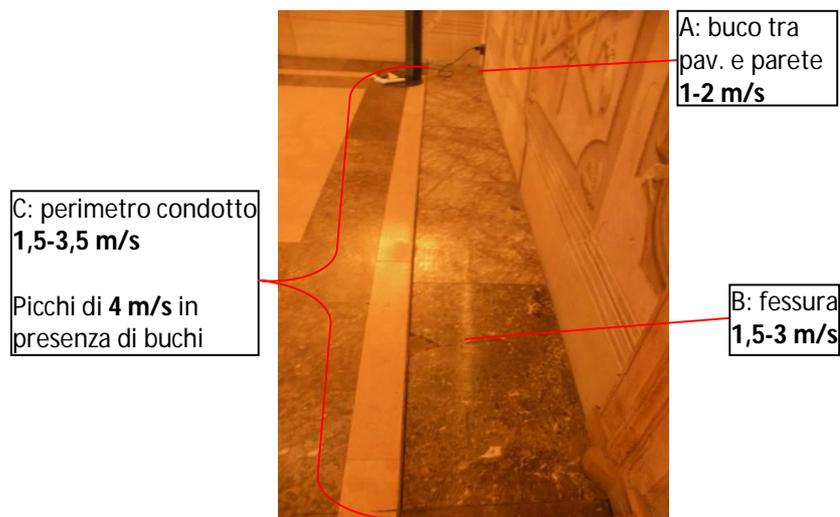


Figura 7.62: Rilievo delle infiltrazioni di aria nel condotto a pavimento adiacente la parete ovest della Sala.

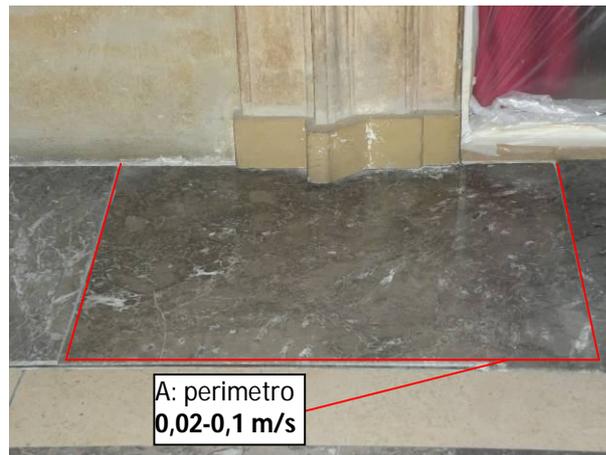


Figura 7.63: Rilievo delle infiltrazioni di aria nel condotto a pavimento adiacente l'apertura presente nella parete est della Sala.

Prima di effettuare il test in pressione è stato applicato ulteriore nastro adesivo nei teli in nylon per cercare di allentare la pressione sui teli stessi durante la prova; inoltre tre operatori, al contrario della prova in depressione, si sono posizionati, dall'esterno della sala, dietro le tre aperture presenti per assorbire, mediante il proprio corpo, una parte di pressione gravante sulle chiusure (Fig. 7.64). Con il ventilatore invertito è stato quindi effettuato il test in pressione (h. 16.10) ed il software, già dal primo step, ha richiesto di inserire il disco A.



Figura 7.64: Operatori presenti, durante la fase di pressione, dietro le chiusure per assorbire una parte di pressione agente sui teli delle chiusure.

7.4.2.2.2 Sala dei Primitivi, Sala del '500 e Sala Vidoniana

Successivamente, il 6 Giugno 2011 ossia a distanza di circa due mesi dalle prove precedenti effettuate nella Sala dei Primitivi, nella Sala del '500 e nella Sala Vidoniana, è stata effettuata a Palazzo D'Accursio una seconda campagna di acquisizione dati ed, in tale occasione, è stato pensato di inglobare in un'unica soluzione le tre sale precedentemente testate in due prove distinte. Per realizzare l'isolamento della zona in esame è stato necessario chiudere tutti i collegamenti delle tre sale con le aree circostanti, tranne l'apertura in cui è stata installata la strumentazione necessaria per effettuare il test ossia la porta presente tra la Sala Vidoniana e la Sala n°20 (Fig. 7.65); durante lo svolgimento del test, non essendo stata posizionata la ventola su un infisso esterno, sono state lasciate aperte le due finestre presenti nella Sala n°20.



Figura 7.65: Posizionamento del ventilatore nella porta presente tra la Sala Vidoniana e la Sala n°20.

Le tre porte in legno presenti nella Sala Vidoniana sono state chiuse e sigillate mediante l'utilizzo di nastro adesivo e l'interposizione, sotto le ante, di cartone (Fig. 7.66-7.67). Nelle prove svolte in precedenza su tali sale era stato infatti notato che non era stato sufficiente sigillare le porte con teli e nastro per cui, in tale prova, è stato deciso di utilizzare del cartone, ritagliato in sito in base alle dimensioni di ciascuna porta, al fine di riempire tutti gli spazi vuoti presenti tra l'infisso ed il pavimento. In seguito è stato utilizzato il nastro adesivo per fissare il cartone al pavimento e per sigillare ulteriormente il perimetro delle porte.

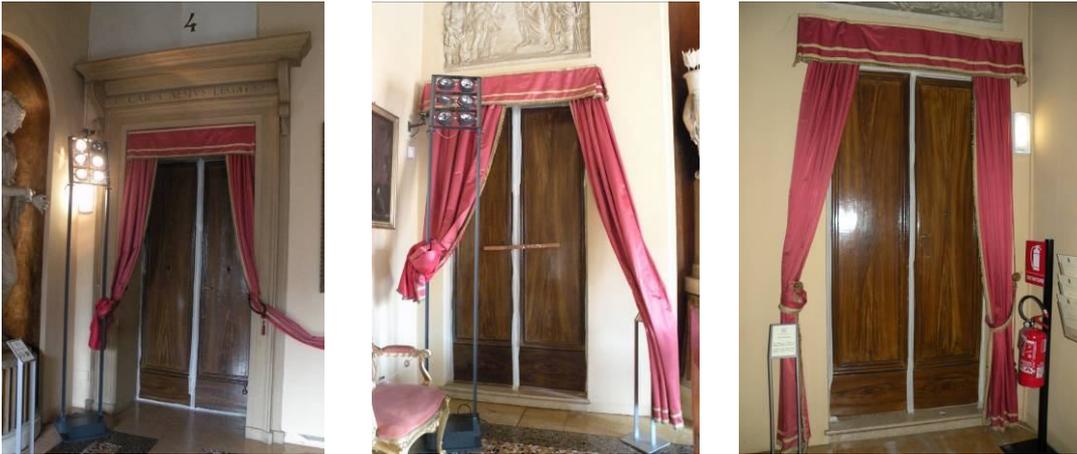


Figura 7.66: Porte in legno presenti nella parete sud ed ovest della Sala Vidoniana, chiuse e sigillate con nastro e cartone.



Figura 7.67: Particolari delle due porte in legno presenti nella parete ovest della Sala Vidoniana.

Nella Sala Vidoniana è inoltre presente un'apertura che la pone in collegamento con la Sala Urbana; tale apertura, essendo stato svolto in precedenza il Blower Door Test all'interno della Sala Urbana, era già sigillata con telaio in legno, telo in nylon e nastro adesivo (Fig. 7.68). Al contrario, è stata chiusa l'apertura presente all'estremità della Sala del '500 (Fig. 7.69) mediante un telo in nylon tenuto fermo da un telaio in legno realizzato in sito ed avente le stesse dimensioni dell'apertura; trasversalmente al telaio principale stati inoltre disposti ulteriori traversi di legno.

Per completare l'isolamento dell'area da sottoporre al test, sono stati chiusi e sigillati sia la porta sia il corridoio adiacenti alla ventola. In particolare, la porta del ripostiglio è stata chiusa a chiave ed ulteriormente sigillata mediante l'applicazione del nastro adesivo lungo tutto il perimetro, mentre il corridoio, con funzione di uscita di emergenza e non praticabile in quanto controllato da allarme centralizzato, è stato

escluso dall'area in esame mediante l'apposizione di un telo di nylon fissato all'arco iniziale con nastro adesivo e aste di legno (Fig. 7.70). Nell'area in esame, infine, è presente anche un vano, in cui è installato il quadro generale degli impianti, che è posizionato tra le due aperture di collegamento tra la Sala Vidoniana e la Sala dei Primitivi (Fig. 7.71); non avendo a disposizione la chiave per chiudere la porta di tale vano essa è stata sigillata con nastro adesivo ed un pezzo di legno fissato nella maniglia.



Figura 7.68: Apertura sigillata tra la Sala Vidoniana e la Sala Urbana.



Figura 7.69: Apertura sigillata all'estremità della Sala del '500.



Figura 7.70: Realizzazione della chiusura del corridoio di emergenza adiacente alla ventola.



Figura 7.71: Realizzazione della chiusura del vano tra la Sala Vidoniana e la Sala dei Primitivi.

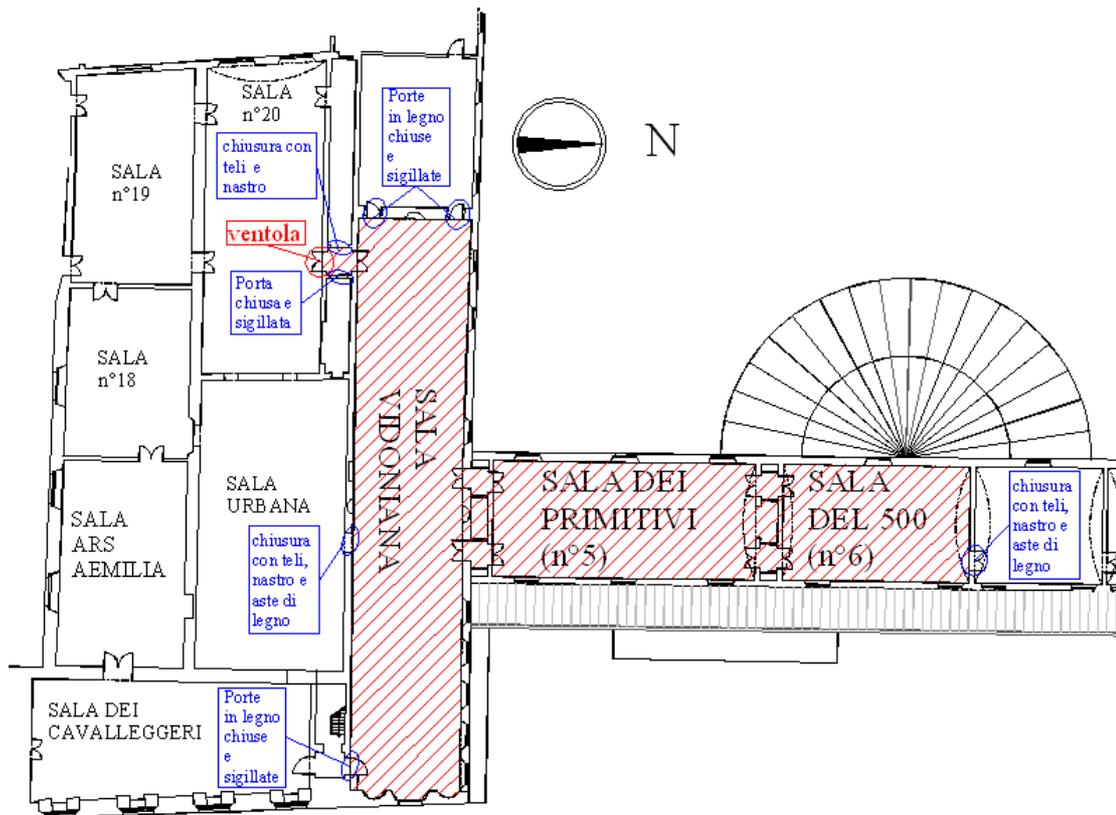


Figura 7.72: Pianta della Sala Vidoniana, della Sala dei Primitivi e della Sala del '500 con indicazioni relative al Blower Door Test.

Terminata la procedura di isolamento dell'area in esame, come riportato nella relativa pianta (Fig. 7.72), e controllato che tutti gli infissi presenti fossero chiusi sono stati inseriti, nel software, tali dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} = V_{PRIMITIVI} + V_{500} + V_{VIDONIANA} = (668 + 444 + 1175) \approx 2284 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 25.7^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 22.8^\circ\text{C}$;
- Vento leggero;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

Prima di procedere con lo svolgimento del test è stato azionato il ventilatore (h. 10.50) ed è stato raggiunto un $\Delta p_{max} \approx 32 \text{ Pa}$; il Δp_{max} raggiunto è sensibilmente inferiore ai valori raggiunti nelle singole prove svolte in precedenza in tale area poiché il volume, in tal caso, è molto maggiore. È stato deciso di eseguire la prova a partire dal valore di $\Delta p = 31 \text{ Pa}$ fino al raggiungimento, mediante intervalli variabili, del valore di $\Delta p = 10 \text{ Pa}$.

In primis è stato effettuato il test in depressione (h. 11.50) e durante tale fase è stata effettuata la ricerca dei punti non ermetici della zona analizzata mediante l'utilizzo di un anemometro e della termocamera FLIR P620. In particolare, con l'anemometro sono stati rilevati i valori di infiltrazione dell'aria nei condotti degli impianti (Fig. 7.73) che sono presenti nei lati nord, sud ed ovest del pavimento di marmo della Sala Vidoniana, mentre con la termografia è stato inquadrato il lato nord della Sala stessa e sono state confermate le dispersioni termiche presenti sia nel condotto degli impianti situato sul pavimento sia nel perimetro del telaio in legno degli infissi (Fig. 7.74).

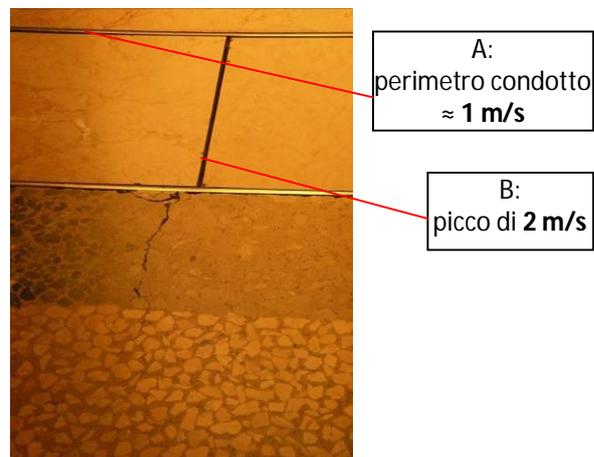


Figura 7.73: Rilievo delle infiltrazioni di aria nel condotto degli impianti a pavimento della Sala Vidoniana.

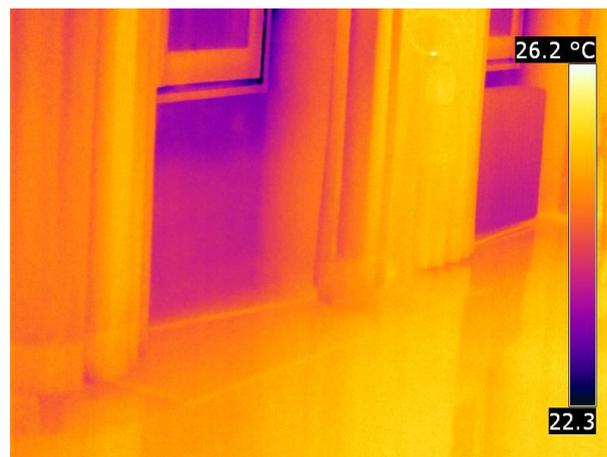


Figura 7.74: Termogramma relativo al lato nord della Sala Vidoniana con condotto degli impianti visibile nel pavimento.

Nella Sala dei Primitivi non sono state effettuate, in tale prova, delle misure mediante anemometro, tuttavia, sono stati acquisiti dei termogrammi nei punti

maggiormente significativi per la permeabilità all'aria dell'edificio. Nello specifico è stato analizzato il condotto degli impianti situato lungo tutto il perimetro del pavimento a parquet della Sala dei Primitivi (Fig. 7.75); lungo tale condotto le infiltrazioni di aria sono meno significative rispetto al condotto presente nella Sala Vidoniana. Inoltre sono stati presi in considerazione due infissi tipo presenti, rispettivamente, sul lato est e sul lato ovest della Sala dei Primitivi (Fig. 7.76); in entrambi è visibile la presenza di zone fredde nel perimetro del telaio in legno ed, in particolare, l'infisso situato nel lato ovest della Sala presenta tutta l'area sinistra più fredda rispetto alla zona circostante. Tale dato offre uno spunto interessante per un'eventuale analisi delle infiltrazioni e dell'umidità della parete in esame. In seguito, al termine di tali rilievi, è stato invertito il ventilatore ed è stato effettuato il test in pressione (h. 11.20).

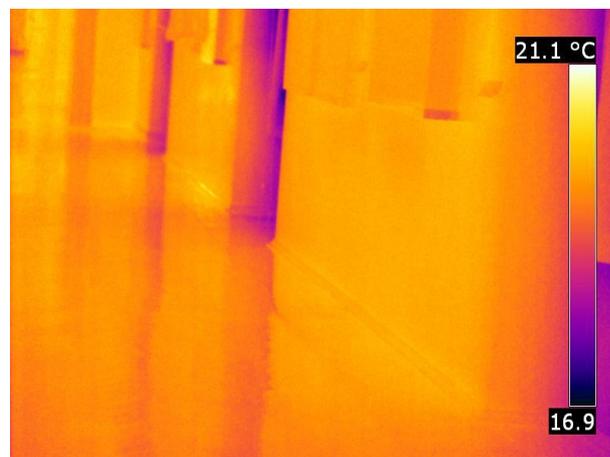


Figura 7.75: Termogramma relativo al lato della Sala dei Primitivi con condotto degli impianti visibile nel parquet.

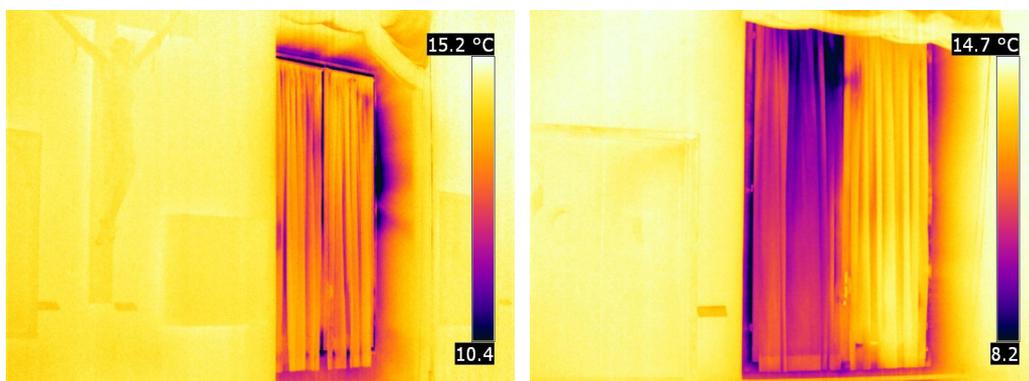


Figura 7.76: Termogramma relativo ad un infisso tipo del lato est e del lato ovest della Sala dei Primitivi.

7.4.2.2.3 Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20) e Sala della Repubblica Cispadana (n°19)

In precedenza, in data 11 Aprile 2011, sono state testate, in un'unica soluzione, le sale n°20, n°19 e n°18 ma successivamente, il 6 Giugno 2011, è stato pensato fosse più opportuno effettuare un test unico per le sale n°20 e n°19, in quanto sono strutturalmente simili tra loro e, successivamente, un test per la sala n°18.

Per effettuare il test nelle Sale n°20 e n°19 è stato necessario sigillare, mediante telaio in legno, telo di nylon e nastro adesivo, l'apertura presente tra la Sala n°20 e la Sala Urbana (Fig. 7.77). In particolare sono state applicate, sul telo, due strisce verticali di nastro adesivo e sono stati creati due manici in modo tale che un operatore, durante il test in pressione, riuscisse a tirare il telo verso l'interno della Sala contrastando la pressione che lo spinge verso l'esterno. Al contrario, durante il test in depressione, l'operatore sarà posizionato davanti al telo per assorbire, con il proprio corpo, la forza agente su di esso. Nelle sale in esame sono presenti, inoltre, tre porte di legno (Fig. 7.78), che sono state chiuse e sigillate con nastro adesivo, e due porte di servizio, che non creano problemi inerenti il flusso di aria. In particolare le porte in legno sono verniciate e quindi sono state sigillate mediante un nastro adesivo meno forte ed invasivo di quelli usati in precedenza sugli architravi in pietra e pavimenti in marmo per non rischiare, in fase di rimozione del nastro, di asportare del materiale.



Figura 7.77: Apertura sigillata tra Sala n°20 e Sala Urbana.



Figura 7.78: Porta in legno chiusa e sigillata.

La ventola, infine, è stato posizionato nella porta presente tra la Sala n°19 e la Sala n°18 (Fig. 7.79); non essendo la strumentazione a contatto con l'esterno dell'edificio la finestra della Sala n°18 è stata lasciata aperta durante la prova. Installare il ventilatore su tale porta ha creato numerosi problemi poiché il telaio in legno dell'apertura non era sufficientemente largo da permettere di far aderire, al suo interno, il telaio del ventilatore; per evitare che la strumentazione si distaccasse dalla porta un operatore, durante la prova, ha dovuto ulteriormente sostenere il telaio ed il ventilatore, in modo che fosse perfettamente aderente all'apertura.

Terminata la preparazione dell'area (Fig. 7.80), chiusi tutti gli infissi delle due sale in esame e posizionata la strumentazione, sono stati inseriti all'interno del software i dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} \approx 1290 \text{ m}^3$;
- $T_{interna} = 26.3^\circ\text{C}$;
- $T_{esterna} = 22.7^\circ\text{C}$;
- Vento leggero;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).



Figura 7.79: Ventilatore installato nella porta tra la Sala n°19 e la Sala n°20.

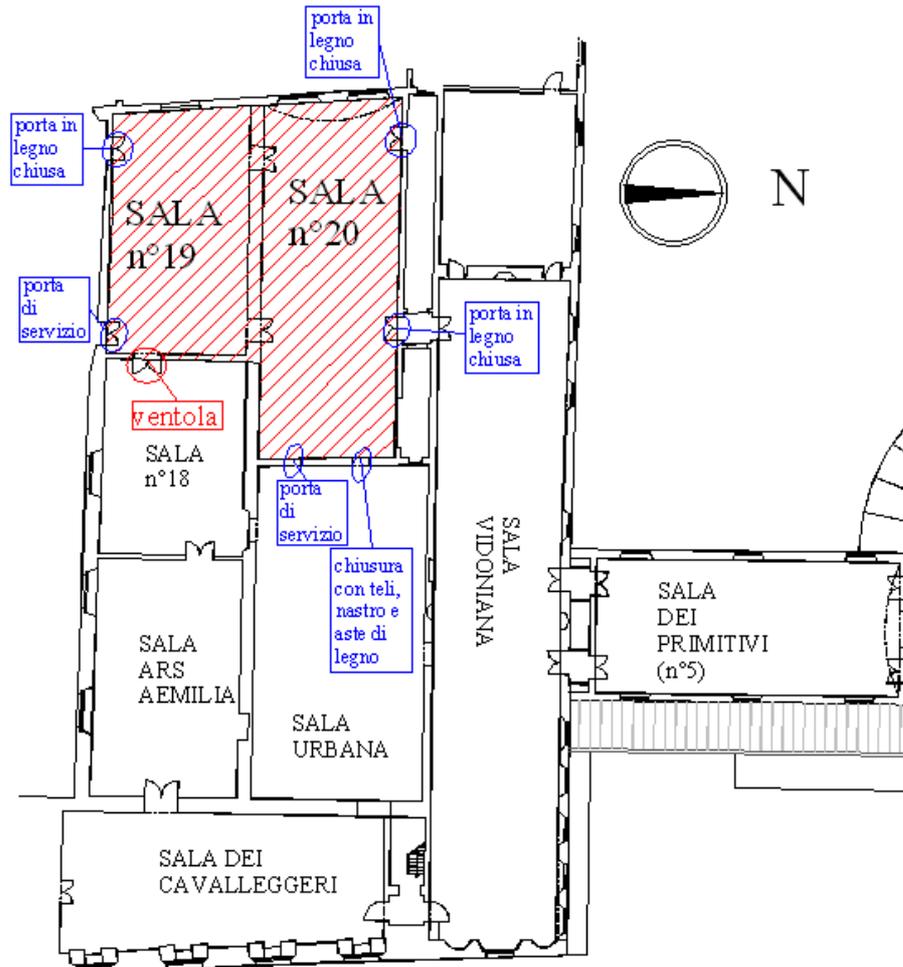


Figura 7.80: Pianta della Sala n°20 e n°19 con indicazioni relative al Blower Door Test.

Prima di procedere con lo svolgimento del test è stata azionata la ventola (h. 12.56) ed è stato raggiunto un $\Delta p_{\max} = 70$ Pa; poiché durante tale test le sigillature effettuate si sono avvicinate molto alla crisi e, tenendo conto del fatto che il telaio del ventilatore non fosse perfettamente aderente alla porta, è stato scelto di far iniziare la prova dal valore di Δp massimo prescritto dalla normativa. È stato dunque optato per lo svolgimento del test a partire dal valore $\Delta p = 50$ Pa fino al raggiungimento, mediante intervalli variabili, del valore di $\Delta p = 10$ Pa.

In principio è stato effettuato il test in depressione (h. 13.02); per eseguire il primo step con $\Delta p = 50$ Pa il software ha da subito richiesto l'applicazione del disco A al ventilatore, per effettuare l'ultimo step ha in seguito richiesto l'applicazione del disco B. Durante la fase di depressione è stata effettuata anche la ricerca dei punti non ermetici dell'area in esame; in particolare sono state rilevate, mediante anemometro, le infiltrazioni di aria nella griglia metallica del condotto degli impianti situata nel lato nord-ovest del pavimento in marmo della Sala n°19 (Fig. 7.81). La griglia metallica del

condotto degli impianti, collocato a pavimento, è visibile anche nell'inquadratura, realizzata con la termocamera FLIR P620, del lato nord-ovest del pavimento della Sala n°19 (Fig. 7.82). Con la termocamera è stata infine inquadrata ed analizzata la finestra situata vicino all'angolo sud-ovest della Sala n°20 ed è risultato ben visibile il flusso di aria fredda localizzato, in particolare, nella muratura al di sotto di esso (Fig. 7.83).

Infine, con le stesse modalità di prova ma con ventilatore invertito, è stato effettuato il test in pressione (h. 13.19); il software ha richiesto l'applicazione del disco A e del disco B per effettuare, rispettivamente, il primo e l'ultimo step della prova.

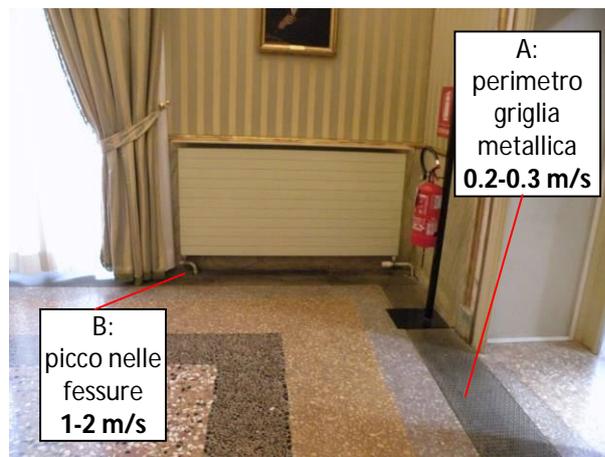


Figura 7.81: Rilievo delle infiltrazioni di aria nella griglia metallica presente nel pavimento della Sala n°19.

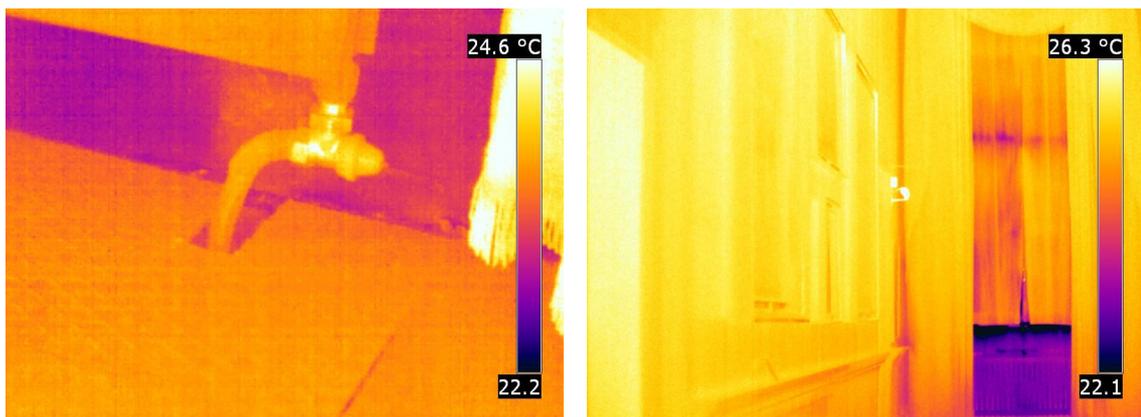


Figura 7.82: Termogramma della griglia metallica presente sul pavimento della Sala n°19.

Figura 7.83: Termogramma relativo alla finestra situata vicino l'angolo sud-ovest della Sala n°20.

7.4.2.2.4 Sala n°18, Sala Aemilia Ars, Sala dei Cavalleggeri e Sala degli Svizzeri

Per concludere l'analisi dell'anello di sale che si sviluppano intorno alla Sala Urbana ed avere a disposizione un quadro esaustivo sullo stato di fatto dell'area di Palazzo D'Accursio adibita alle Collezioni Comunali d'Arte, il 6 Giugno 2011 è stato pensato di effettuare il Blower Door Test anche nella Sala n°18, nella Sala Aemilia Ars, nella Sala dei Cavalleggeri e nella Sala degli Svizzeri. Tutte e quattro le Sale, unificate in un unico test, sono caratterizzate da un soffitto a cassettoni e pavimento in marmo (Fig. 7.84-7.86).



Figura 7.84: Sala n°18 e Sala Aemilia Ars.



Figura 7.85: Sala dei Cavalleggeri e Sala degli Svizzeri.



Figura 7.86: Soffitto a cassettoni presente nella Sala degli Svizzeri.

Per isolare le quattro Sale dall'ambiente circostante è stato semplicemente necessario sigillare la porta vetrata presente all'ingresso della Sala degli Svizzeri; tale porta è stata chiusa ed appositamente sigillata mediante nastro adesivo. Le altre aperture presenti erano tutte già chiuse poiché utilizzate nelle prove svolte in precedenza; in particolare, nella Sala dei Cavalleggeri sono presenti una porta in legno, sigillata per svolgere la prova nella Sala Vidoniana, ed un'apertura, sigillata per svolgere il test all'interno della Sala Urbana mentre, nella Sala n°18, è presente un'apertura, sigillata anch'essa per svolgere il test all'interno della Sala Urbana (Fig. 7.87-7.88).



Figura 7.87: Sigillatura della porta vetrata presente nella Sala degli Svizzeri.



Figura 7.88: Porta in legno ed apertura presenti nella Sala dei Cavalleggeri ed apertura presente nella Sala n°18.

La ventola è stata installata nella porta presente tra la Sala n°18 e la Sala n°19 (Fig. 7.89); durante la prova sono state lasciate aperte le due finestre presenti nella Sala n°20 in quanto nella Sala n°19 non sono presenti infissi bensì una porta di emergenza che non è stato possibile aprire in quanto collegata al sistema di allarme centralizzato; tutti gli altri infissi presenti nelle quattro Sale in esame sono stati chiusi.



Figura 7.89: Strumentazione posizionata nella porta tra la Sala n°18 e la Sala n°19 vista dall'interno della Sala n°18.

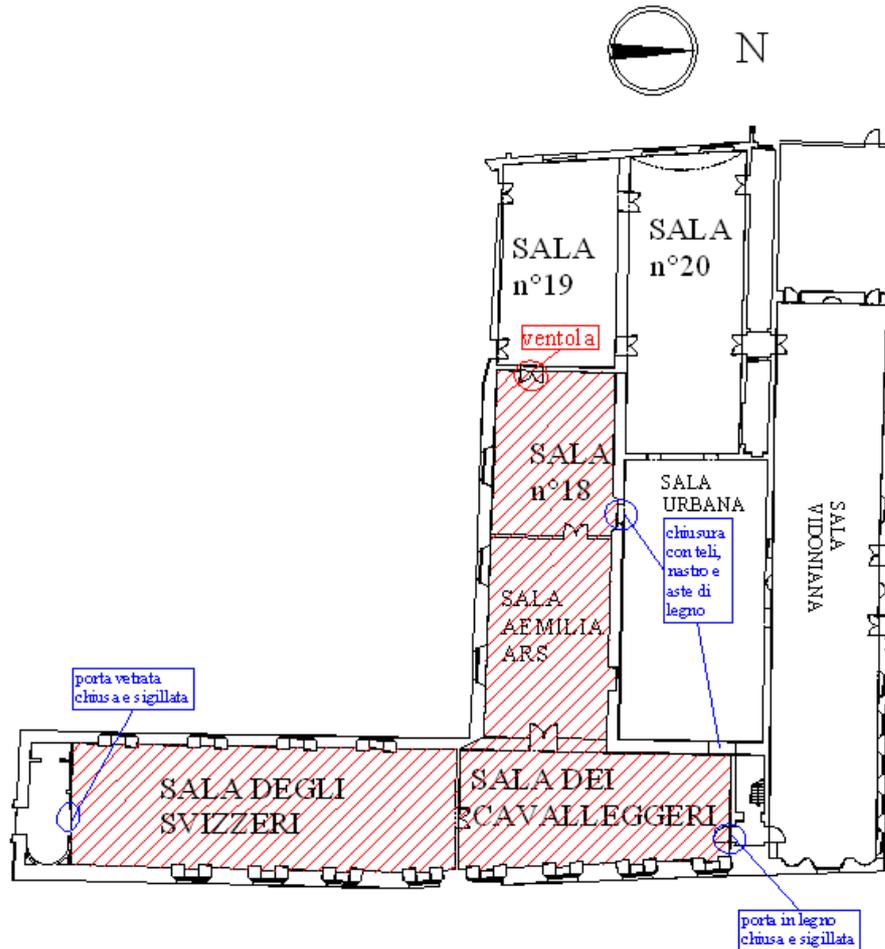


Figura 7.90: Pianta della Sala n°18, Sala n°19, Sala dei Cavalleggeri e Sala degli Svizzeri con indicazioni relative al Blower Door Test.

Terminata la procedura preparatoria, secondo le informazioni riportate sulla pianta della zona in esame (Fig. 7.90) sono stati inseriti all'interno del software i seguenti dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} = V_{n°18} + V_{AEMILIA\ ARS} + V_{CAVALLEGGERI} + V_{SVIZZERI} = (326 + 414 + 835 + 1339) \approx 2914m^3$;
- $T_{interna} = 27^{\circ}C$;
- $T_{esterna} = 24.5^{\circ}C$;
- Vento leggero;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

Prima di procedere con l'esecuzione del test è stata effettuata una prova (h. 12.38) sul valore di Δp raggiungibile in tali condizioni, instaurando manualmente una condizione di depressione; avendo raggiunto un valore di Δp_{max} troppo basso, in quanto

pari a 9 Pa, è stato deciso di non svolgere il test in tali condizioni e di ridefinire l'area da analizzare escludendo dalla prova la Sala degli Svizzeri (Fig. 7.91); in tal modo, avendo un volume minore si spera di raggiungere un Δp maggiore.

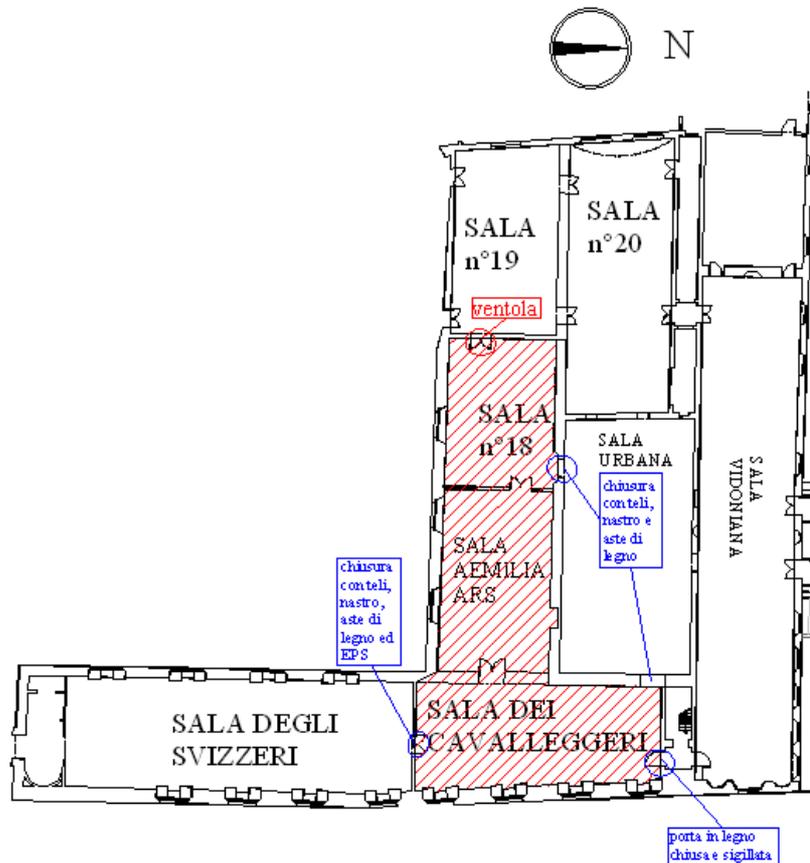


Figura 7.91: Pianta della Sala n°18, Sala n°19 e Sala dei Cavalleggeri con indicazioni relative al Blower Door Test.

Per escludere la Sala degli Svizzeri dalla prova è stato necessario realizzare la chiusura del passaggio presente tra la Sala degli Svizzeri e la Sala dei Cavalleggeri; la chiusura è risultata molto difficoltosa in quanto le aste di legno disponibili in sito non avevano le dimensioni necessarie per coprire l'intera altezza e larghezza di tale passaggio, è stato quindi posto alla base e di lato dei blocchi di EPS e sopra di essi è stato poi realizzato il telaio in legno che tiene fisso il telo in nylon. Ulteriore nastro adesivo è stato applicato per bloccare il telo al telaio ed all'architrave in pietra e sigillare, ulteriormente, l'apertura.



Figura 7.92: Passaggio presente tra la Sala dei Cavalleggeri e Sala degli Svizzeri.

Sono stati quindi inseriti, all'interno del software, i nuovi dati necessari per l'analisi:

- $V_{TOT} = V_{n^{\circ}18} + V_{AEMILIA\ ARS} + V_{CAVALLEGGERI} = (326 + 414 + 835) \approx 1575m^3$;
- $T_{interna} = 27^{\circ}C$;
- $T_{esterna} = 24.5^{\circ}C$;
- Vento leggero;
- Edificio ben protetto;
- Metodo A (edificio in uso).

È stata quindi azionata la ventola (h. 13.50) instaurando, nelle tre sale, un regime di depressione; il valore di Δp_{max} ottenuto nella nuova configurazione è pari a 10 Pa. Il risultato non è molto superiore a quello raggiunto nel test precedente; è stato dedotto che il basso Δp non è correlato alla volumetria bensì alla struttura delle Sale. Con la termocamera FLIR P620 è stato infatti analizzato il soffitto a cassettoni caratterizzante tutta l'area in esame e sono state individuate, in esso, numerose infiltrazioni di aria esterna (Fig. 7.93). È stato infine effettuato un ulteriore test tenendo serrati manualmente gli infissi della Sala dei Cavalleggeri, in quanto essi non sono perfettamente ermetici, ma il valore di Δp_{max} è risultato sempre pari a 10-11 Pa. Tenendo conto di tali fattori è stato impostato lo svolgimento della prova da un valore massimo di $\Delta p = 10$ Pa fino al raggiungimento, mediante steps di 1 Pa, del valore di 5 Pa.

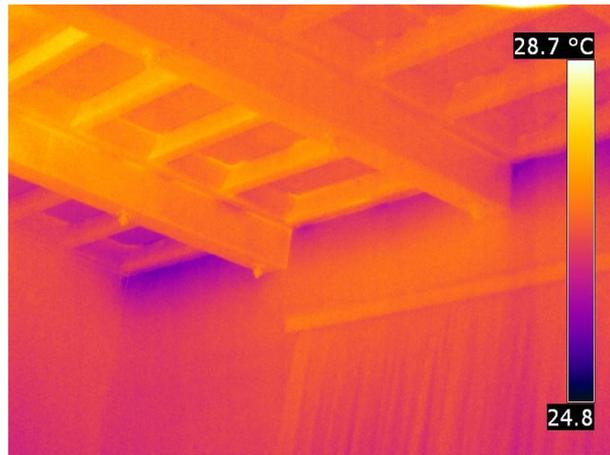


Figura 7.93: Rilievi termografici su soffitto a cassettoni nell'angolo sud-est della Sala Aemilia Ars.

In tali condizioni è stato effettuato il test in depressione (h. 14.06) e, durante esso, la ricerca dei punti non ermetici mediante l'utilizzo dell'anemometro e della termocamera FLIR P620. Nella Sala n°18, in cui è installata la ventola, sono state rilevate, mediante anemometro, le infiltrazioni di aria presenti nel condotto degli impianti collocato a pavimento e nel telaio in legno dell'infisso (Fig. 7.94); le zone fredde nell'intorno del telaio, in particolare nella parte inferiore, e nel condotto degli impianti collocato a pavimento sono confermate anche dall'analisi termografica (Fig. 7.95).

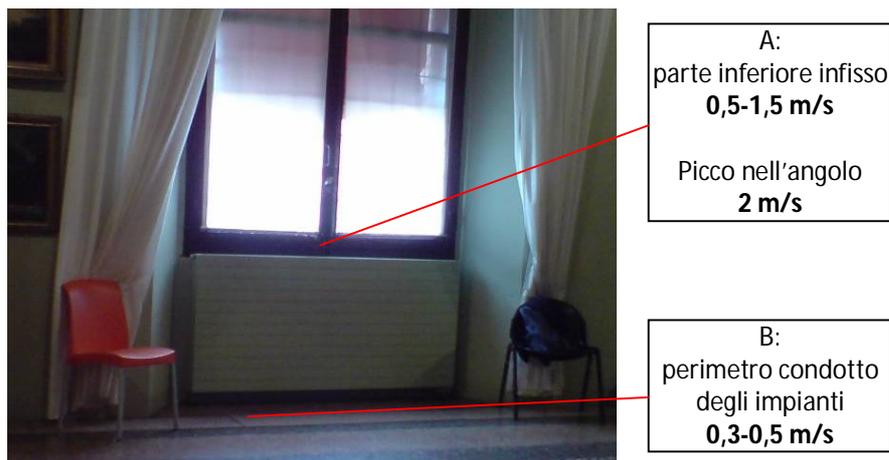


Figura 7.94: Rilievi con anemometro nella Sala n°18.



Figura 7.95: Rilievi con termocamera su infisso e condotto degli impianti nella Sala n°18.

Sono stati effettuati rilievi anche sul perimetro del condotto degli impianti collocato a pavimento nella Sala Aemilia Ars (Fig. 7.96); a differenza della Sala n°18 in tale Sala la canalina degli impianti presenta superiormente una griglia metallica ben sigillata al resto del pavimento in marmo ed infatti le perdite di aria rilevate nel perimetro della lastra metallica sono, in media, pari a 0.01-0.02 m/s. È stato infine analizzato, mediante l'utilizzo dell'anemometro, un infisso tipo presente nella parete della Sala dei Cavalleggeri che si affaccia su Piazza Maggiore (Fig. 7.97). In seguito a tale analisi è stato svolto il test in pressione (h. 14.18).

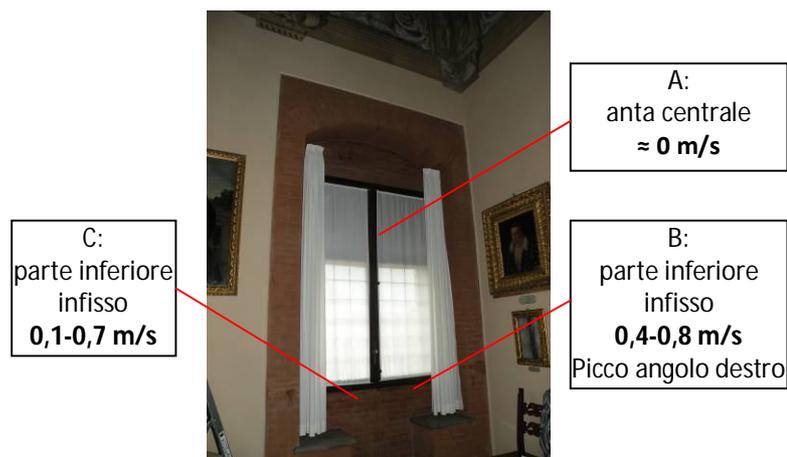


Figura 7.96: Rilievi con anemometro su infisso tipo della Sala dei Cavalleggeri.



Figura 7.97: Rilievi con termocamera su infisso tipo della Sala dei Cavalleggeri.

7.5 VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI ED OSSERVAZIONI

Una volta eseguita la prova, come descritto nel dettaglio nel paragrafo precedente, il software fornisce in output sia il valore n_{50} di ricambi orari riferito ad un $\Delta p = 50\text{Pa}$ sia la Building Leakage Curve, ossia la curva di permeabilità all'aria della zona analizzata (Fig. 7.98). In particolare, la curva riporta sull'asse delle ascisse il Δp tra l'ambiente interno ed esterno e, sull'asse delle ordinate, i valori di portata (m^3/h) che, per ogni Δp , fluiscono attraverso gli ambienti. Il Δp di riferimento, come prescritto dalla normativa UNI EN 13829, è pari a 50 Pa per cui il software fornisce il tasso di ricambi orari per tale differenza di pressione. Quando il test è effettuato a partire da un $\Delta p_{\text{max}} < 50\text{ Pa}$ il software ricava il valore di n_{50} mediante un'interpolazione lineare dei dati ottenuti.

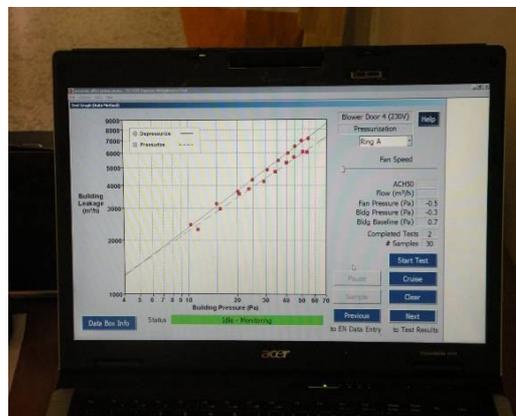


Figura 7.98: Building Leakage Curve ricavata dal software durante una prova del Blower Door Test.

Nello specifico, prima di effettuare il test, l'operatore imposta, in base al valore di Δp_{\max} raggiungibile per l'area in esame, il range dei valori di Δp a cui eseguire la prova ed i rispettivi intervalli intermedi. Il software, in automatico, per ogni Δp inserito effettua 100 misurazioni e ne riporta, mediante un punto rosso, la media (Fig. 7.99). Durante le 100 misurazioni effettuate dal programma di elaborazione dei dati è possibile notare sul monitor una serie di punti neri rappresentanti le singole misure; il punto rosso finale è la media effettuata su tale nuvola di punti neri. Più è elevata la dispersione dei valori più la nuvola di punti neri è estesa.

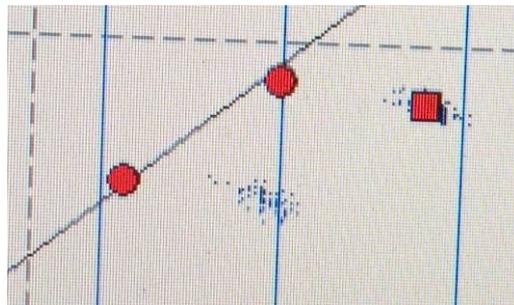


Figura 7.99: Particolare della costruzione della Building Leakage Curve ricavata dal software durante una prova del Blower Door Test.

Talvolta il software può richiedere diverso tempo per assestarsi sul valore di Δp prestabilito ed effettuare le misurazioni richieste; tale situazione è comune nei casi in cui il valore di Δp tra l'interno e l'esterno dell'ambiente non è stabile. Una delle cause più frequenti che genera la fluttuazione del valore di Δp è la differente condizione del vento esterno che può variare, in modo consistente, durante l'esecuzione del test.

Il Blower Door Test è caratterizzato da una fase in depressione ed una fase in pressione; per la medesima zona in esame il software elabora le curve di permeabilità, nelle due diverse fasi, nello stesso file. Il valore dei ricambi orari n_{50} fornito dal software per ogni ambiente analizzato, in genere, è la media tra il valore rilevato in depressione ed il valore rilevato in pressione, tuttavia, è possibile avere a disposizione anche i singoli valori di ricambi orari.

In seguito sono visualizzati i risultati ottenuti per ogni sotto-area di Palazzo D'Accursio in cui è stato effettuato il Blower Door Test; i risultati sono confrontati tra loro al fine di cogliere differenze ed analogie tra le diverse aree analizzate.

7.5.1 RISULTATI DELLA PRIMA CAMPAGNA D'INDAGINE

7.5.1.1 UFFICI (2° TRAPIANO)

Per il test effettuato nel corridoio del 2° Trapiano di Palazzo D'Accursio, causa guasto tecnico dell'elaboratore, non è disponibile la curva di permeabilità. Tuttavia, durante l'analisi svolta in sito, sono stati annotati i valori di ricambi orari riferiti a $\Delta p = 50$ Pa sia per la prova in depressione sia in pressione: i valori ottenuti sono pari, rispettivamente, a 6.5 h^{-1} e 6.08 h^{-1} .

Il valore di n_{50} risulta essere molto elevato rispetto agli standard previsti dalla UNI EN 13829:2002 e, tale aspetto, è legato principalmente alle elevate infiltrazioni di aria negli infissi rilevate, durante lo svolgimento del test, mediante anemometro e riportate nel paragrafo 7.4.1.1. In particolare sono stati esaminati un infisso “tipo” per il lato via IV Novembre ed un infisso “tipo” per il lato del cortile (Fig. 7.100); tali infissi presentano notevoli infiltrazioni di aria distribuite su tutto il perimetro del telaio in legno. Nello specifico è stato notato che gli infissi presenti sul lato via IV Novembre, probabilmente meno nuovi rispetto agli infissi del lato del cortile, presentano elevate infiltrazioni anche in corrispondenza dell'anta centrale e di numerose fessure presenti nei vetri. Tali infiltrazioni di aria non sono trascurabili in quanto esse sono presenti in ogni stanza del corridoio in esame e, globalmente, influiscono in modo determinante sulle condizioni climatiche dell'area complessiva. È stato, infatti, accertato che i funzionari operanti in tali uffici utilizzano per il riscaldamento, nel periodo invernale, delle stufe elettriche nonostante la regolare accensione degli impianti di riscaldamento presenti nel piano (Fig. 7.101). Da tale analisi deriva, dunque, che un corretto risanamento della struttura in esame, e degli elementi in essa presente, comporterebbe numerosi vantaggi sia in termini economici che di salvaguardia dell'ambiente ed, inoltre, permetterebbe lo svolgimento delle attività presenti in uno stato di comfort migliore.



Figura 7.100: Infisso “tipo” lato IV Novembre ed infisso “tipo” lato cortile.



Figura 7.101: Stufa elettrica utilizzata per il riscaldamento.

7.5.1.2 COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE

7.5.1.2.1 Sala Urbana

Per il primo test svolto nella Sala Urbana (8 Aprile 2011), causa guasto tecnico, non è possibile mostrare la curva di permeabilità, tuttavia sono stati annotati i ricambi orari. Il valore di ricambi d'aria riferito al $\Delta p = 50$ Pa ottenuto dal software è pari a 2.88 h^{-1} per la prova in depressione e 2.15 h^{-1} per la prova in pressione.

7.5.1.2.2 Sala dei Primitivi e Sala del '500

Per il Blower Door Test svolto, in data 11 Aprile 2011, all'interno della Sala dei Primitivi e della Sala del '500, causa guasto tecnico, non si ha a disposizione la Building Leakage Curve ma solo il numero di ricambi d'aria riferito a $\Delta p = 50$ Pa per la prova in depressione che è pari a 4.52 h^{-1} . Pur avendo a disposizione solamente il valore di n_{50} riferito alla fase di depressione, si può notare come esso sia al di sopra dei limiti imposti dalla normativa vigente; tale situazione può essere spiegata con il fatto che attraverso gli infissi ed i pavimenti presenti nelle due sale vi sono consistenti infiltrazioni di aria. Tali flussi sono stati rilevati, come descritto nel capitolo 7.4.1.2.2, durante lo svolgimento del test ed, in particolare, sono state localizzate perdite distribuite su tutto in contorno dell'infisso "tipo" e i tasselli del parquet. Tali perdite, anche se non sono elevate, non possono essere trascurate poiché sia il parquet sia gli infissi sono presenti in tutta l'area in esame. Il valore di n_{50} è paragonabile ai ricambi orari ottenuti negli Uffici poiché, a differenza della Sala Urbana, l'influenza degli

infissi, in questa area, è notevole in quanto essi, tutti uguali tra loro, sono disposti in modo continuo su entrambi i lati delle due Sale (Fig. 7.102).



Figura 7.102: Infisso “tipo” e parquet della Sala dei Primitivi.

7.5.1.2.3 Sala Vidoniana

Causa guasto tecnico non è disponibile la curva di permeabilità per il test svolto nella Sala Vidoniana l'11 Aprile 2011, tuttavia sono stati annotati i valori dei ricambi d'aria ottenuti per la prova in depressione (6.79 h^{-1}) e per la prova in pressione (6.92 h^{-1}). Inoltre in tale area, durante il test, non sono stati effettuati rilievi sui punti non ermetici mediante anemometro o termocamera e non si hanno quindi a disposizione specifiche informazioni sulle infiltrazioni di aria.

Tuttavia, l'elevato valore di n_{50} ottenuto può essere correlato alla presenza di un condotto per gli impianti situato lungo la quasi totalità del perimetro del pavimento; a differenza delle sale della prova precedente è possibile notare, a vista, come il condotto sul pavimento in marmo presenta maggiori fessure e distaccamenti rispetto al condotto sul pavimento in parquet (Fig. 7.103).

Infine, si può ipotizzare che l'elevato numero di ricambi orari è, in parte, causato anche dalla non perfetta sigillatura delle due porte in legno in quanto, durante lo svolgimento del test, sono state percepite, mediante il solo utilizzo delle mani, forti correnti di aria fluire attraverso di esse.



Figura 7.103: Condotto degli impianti a pavimento nella Sala Vidoniana.

7.5.1.2.4 Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20), Sala della Repubblica Cispadana (n°19) e Sala n°18

Il test svolto l'11 Aprile 2011 nelle Sale n°20, n°19 e n°18 non ha fornito, causa guasto tecnico, la curva di permeabilità dell'area, tuttavia, sono stati annotati, in sito, i risultati ottenuti in termini di n_{50} per le distinte fasi di depressione e pressione; il valore è pari, rispettivamente, a 5.97 h^{-1} e 6.58 h^{-1} .

I valori elevati dei risultati sono, probabilmente, imputabili alla presenza, in particolare nel pavimento della Sala n°19, della griglia metallica del condotto degli impianti e di grandi fessure in corrispondenza dei punti in cui i tubi dei radiatori penetrano all'interno della pavimentazione (Fig. 7.104).



Figura 7.104: Condotto degli impianti nel pavimento in marmo della Sala n°19.

Tuttavia, nonostante la presenza del condotto a pavimento, il valore ottenuto in tale area sembra piuttosto elevato per essere correlato alla sola presenza della griglia

metallica in quanto essa non è presente in tutte e tre le Sale ed, inoltre, non vi è un'elevata influenza degli infissi poiché essi non sono numerosi. A tal fine, in seguito, sono state svolte ulteriori prove negli ambienti in esame al fine di caratterizzare meglio, dal punto di vista dell'ermeticità, le tra Sale analizzate.

Sono riportati in seguito (Tab. 7.1) i risultati ottenuti, in termini di ricambi d'aria orari, in tutte le aree testate nella prima campagna di indagine appartenenti sia agli Uffici sia alle Collezioni Comunali D'Arte.

Tabella 7.1: Numero di ricambi d'aria orari ottenuti nelle aree appartenenti agli Uffici ed alle Collezioni Comunali D'Arte e sottoposte al Blower Door Test durante la prima campagna di indagine.

<u>RISULTATI PRIMA CAMPAGNA DI INDAGINE</u>	
UFFICI	n_{50, MEDIO} [h⁻¹]
2° Trapiano	6.3
COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE	n_{50, MEDIO} [h⁻¹]
Sala Urbana	2.5
Sala dei Primitivi e Sala del '500	4.5
Sala Vidoniana	6.8
Sala n°20, n°19 e n°18	6.3

7.5.2 RISULTATI DELLA SECONDA CAMPAGNA D'INDAGINE

7.5.2.1 UFFICI (1° PIANO)

Per il test effettuato al 1° piano, a distanza di due mesi rispetto alla prova precedente ossia il 31 Maggio 2011, si ha a disposizione sia la Building Leakage Curve (Grafico 7.1) sia i valori di ricambi d'aria pari a 5.02 h⁻¹ per la prova in depressione e pari a 4.34 h⁻¹ per la prova in pressione.

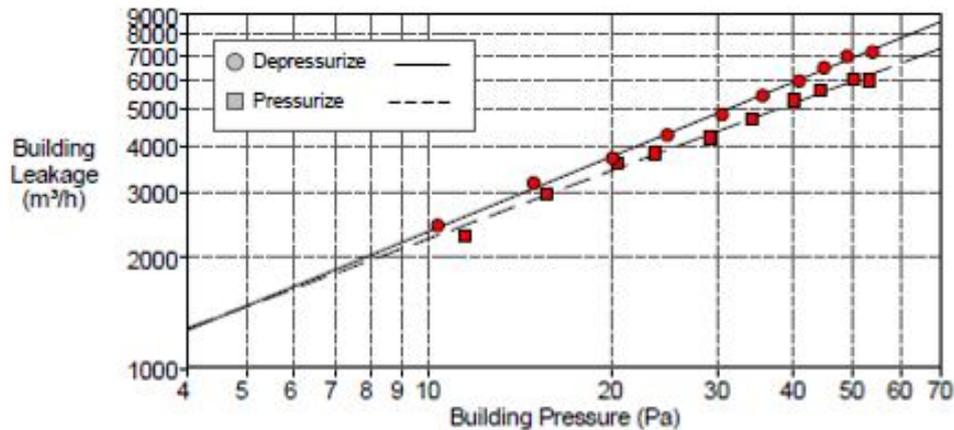


Grafico 7.1: Curva di permeabilità per il test effettuato al 1°Piano (Uffici).

Nella retta inerente la fase in pressione i due punti rossi presenti sulla destra sono molto ravvicinati tra loro e ciò è dovuto al fatto che il ventilatore, durante il test, non è riuscito a raggiungere il Δp_{max} inserito pari a 55 Pa e quindi ha effettuato la prima misurazione al Δp che è riuscito a raggiungere e che è molto vicino al secondo step con Δp impostato a 50 Pa.

Durante lo svolgimento del test sono state rilevate le infiltrazioni di aria nell'infisso "tipo" lato via IV Novembre, come riportato nel capitolo 7.4.2.1, ed, in analogia al piano superiore, sono stati notati flussi di aria consistenti nel contorno dell'infisso e dell'anta centrale. Non sono stati effettuati rilievi sugli infissi presenti nel lato del cortile in quanto risultano essere, a vista, uguali a quelli presenti nel piano superiore e già analizzati (Fig. 7.105).



Figura 7.105: Infisso "tipo" lato via IV Novembre ed infisso "tipo" lato cortile.

Il valore di n_{50} , seppur ancora elevato rispetto ai limiti normativi, è minore rispetto al valore ottenuto al piano superiore; tale aspetto può essere correlato al fatto

che gli infissi presenti sul lato via IV novembre in tale piano presentano una superficie di estensione minore rispetto a quelli del piano superiore (Fig. 7.106). Fatta eccezione per tali infissi, infatti, i due piani sono uguali per struttura del soffitto, della pavimentazione e degli infissi lato cortile. Analizzando inoltre, nel dettaglio, gli infissi presenti nell'area in esame si è notato come essi abbiano subito, nel tempo, un forte degrado (Fig. 7.107) ed, allo stato attuale, rappresentano una grande fonte di pericolo per l'ermeticità dell'edificio.



Figura 7.106: Infisso “tipo” lato via IV Novembre rispettivamente del 2° Trapiano e del 1° Piano degli Uffici di Palazzo D’Accursio.



Figura 7.107: Particolari di un infisso “tipo” lato via IV Novembre del 1° Piano degli Uffici di Palazzo D’Accursio.

7.5.2.2 COLLEZIONI COMUNALI D’ARTE

7.5.2.2.1 Sala Urbana

Successivamente, a distanza di circa due mesi dalla prima campagna di indagine, è stato effettuato nuovamente il test nella Sala Urbana in data 31 Maggio 2011 e, per tale prova, si hanno a disposizione sia la curva di permeabilità (Grafico 7.2) sia i valori di ricambi d’aria relativi.

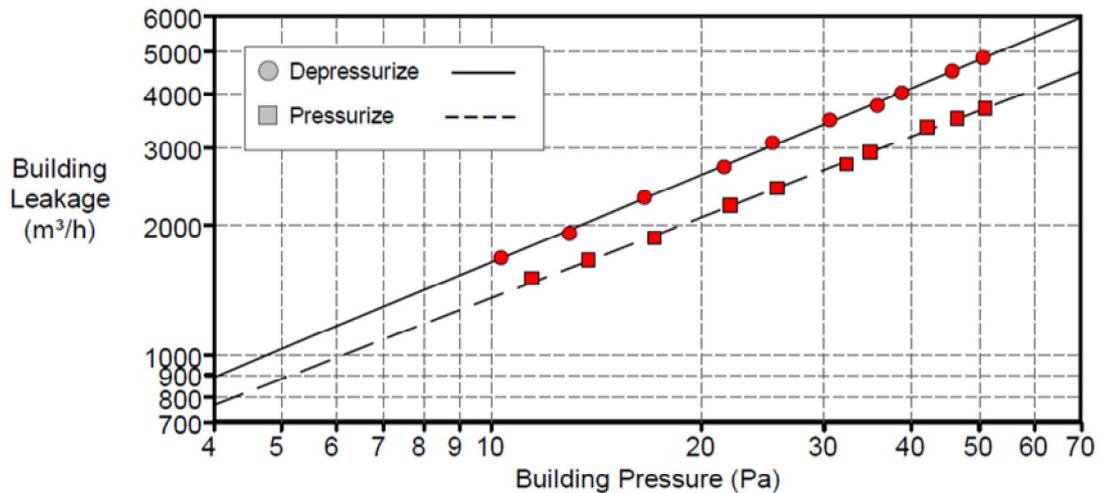


Grafico 7.2: Curva di permeabilità per il test effettuato nella Sala Urbana.

In tal caso, il valore medio di ricambi d'aria riferito a $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ è pari a 2.86 h^{-1} per il test in depressione e 2.19 h^{-1} per il test in pressione; i risultati, in termini di n_{50} , ottenuti dalle due prove eseguite a distanza di tempo l'una dall'altra differiscono di poco gli uni dagli altri e ciò è dimostrazione del fatto che essi possano essere ritenuti piuttosto attendibili. I ricambi orari, anche in tale area, sono maggiori rispetto ai limiti normativi e, nello specifico, è stato ipotizzato che essi siano fortemente influenzati dai condotti degli impianti collocati nel pavimento in marmo. Lungo il perimetro di tali condotti, come riportato nel capitolo 7.4.2.2.1, sono state rilevate infiltrazioni di aria; le infiltrazioni, seppur non elevate, influenzano l'ermeticità del volume analizzato poiché i condotti sono presenti in gran parte del perimetro della Sala Urbana (Fig. 7.108). Inoltre, in punti particolari, essi presentano buchi e fessure attraverso i quali il flusso di aria è talmente elevato da essere percepibile anche con il solo utilizzo delle mani. Confrontando, infine, i risultati ottenuti nella Sala Urbana con i risultati dell'ala degli Uffici è stato notato come, nel primo caso, il numero di ricambi orari n_{50} è molto meno elevato e ciò potrebbe essere legato al fatto che l'influenza degli infissi presenti, e delle relative infiltrazioni, è minore (Fig. 7.109). dad

Dsadsad

Adsadsad



Figura 7.108: Condotto degli impianti nel pavimento della Sala Urbana.



Figura 7.109: Infissi della Sala Urbana visti, rispettivamente, dall'interno e dall'esterno della stessa.

7.5.2.2.2 Sala Vidoniana, Sala dei Primitivi e Sala del '500

In data 6 Giugno 2011 è stato deciso di testare, in un'unica soluzione, le Sale dei Primitivi, del '500 e Vidoniana. Per tale test è possibile mostrare, la curva di permeabilità all'aria (Grafico 7.3) ed i relativi valori dei ricambi orari.

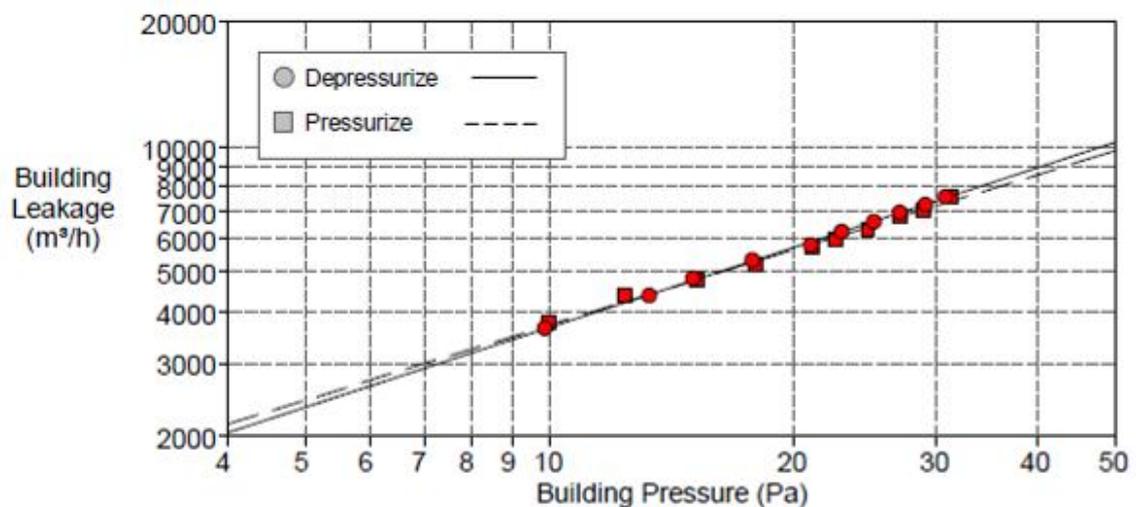


Grafico 7.3: Curva di permeabilità per il test effettuato nella Sala dei Primitivi, Sala del '500 e Sala Vidoniana.

Il valore di ricambi d'aria riferito a $\Delta p = 50$ Pa ottenuto dal software è pari a 4.51 h^{-1} per la fase in depressione e pari a 4.29 h^{-1} per la fase in pressione; la differenza dei risultati ottenuti tra le due fasi è minima e ciò è visibile anche dalla curva di permeabilità in cui le due rette sono quasi sovrapposte tra loro. Il valore di n_{50} ottenuto è simile ai ricambi d'aria raggiunti nel test della Sala dei Primitivi + la Sala del '500 piuttosto che a quelli raggiunti nel test della sola Sala Vidoniana; tale aspetto conferma l'ipotesi che durante lo svolgimento della prova nella Sala Vidoniana le porte presenti non erano state opportunamente sigillate e tramite queste fluiva una grande quantità di aria che ha influenzato in modo consistente i risultati. Nello svolgere, infatti, la prova unificata delle tre Sale è stata posta particolare attenzione nel sigillare le porte in legno ponendo del cartone al di sotto gli infissi; tale accortezza ha permesso di raggiungere valori di ricambi d'aria nettamente inferiori a quelli ottenuti per la sola Sala Vidoniana (Fig. 7.110).



Figura 7.110: Particolare della sigillatura della porta in legno della Sala Vidoniana.

Inoltre, in tale test, sono state rilevate, mediante anemometro, le infiltrazioni sul contorno del condotto degli impianti presente nel pavimento in marmo della Sala Vidoniana, come riportato nel capitolo 7.4.2.2.2; tali infiltrazioni sono molto maggiori rispetto a quelle rilevate tra i tasselli di parquet della Sala dei Primitivi e del '500, riportate nel capitolo 7.4.1.2.2.

Le perdite di aria elevate nel condotto della Sala Vidoniana hanno avuto una grande influenza sui risultati finali nel test svolto sulla singola area mentre, nel test unificato delle tre Sale, l'influenza è diminuita in quanto la situazione è stata mitigata dalla presenza delle altre due Sale (Fig. 7.111).



Figura 7.111: Condotto degli impianti nel pavimento in marmo della Sala Vidoniana e nel parquet della Sala dei Primitivi.

7.5.2.2.2 Sala Mito, Allegoria e Storia (n°20) e Sala della Repubblica Cispadana (n°19)

Per effettuare un'analisi più chiara di tale parte delle Collezioni Nazionali è stata svolta il 6 Giugno 2011 una prova nelle sale n°20 e n°19 separatamente dalla n°18 e dalle successive. Per il test effettuato in queste due Sale si ha a disposizione la curva di permeabilità (Grafico 7.4) ed i relativi ricambi orari.

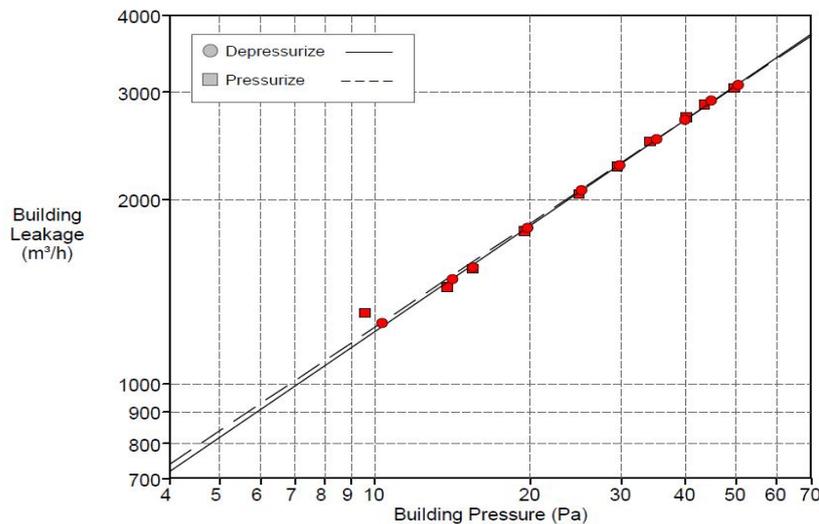


Grafico 7.4: Curva di permeabilità per il test effettuato nella Sala n°20 e n°19.

Il valore di ricambi d'aria riferito a $\Delta p = 50$ Pa è pari a 2.39 h^{-1} per la fase di depressione e 2.38 h^{-1} per la fase di pressione; i due risultati sono praticamente uguali e ciò è visibile dal diagramma in cui le rette sono sovrapposte. Il valore di n_{50} ottenuto è sensibilmente inferiore al test svolto nelle due Sale insieme alla Sala n°18; da tale

aspetto è stato dedotto che la Sala esclusa (n°18) è l'elemento fortemente disperdente, probabilmente a causa del soffitto a cassettoni.

7.5.2.2.3 Sala n°18, Sala Aemilia Ars e Sala dei Cavalleggeri

Per completare l'analisi sulle stanze disposte ad anello intorno alla Sala urbana è stato effettuato, sempre in data 6 Giugno 2011, un ultimo test nella Sala n°18, Sala Aemilia Ars e Sala dei Cavalleggeri di cui si hanno a disposizione sia la curva di permeabilità (Grafico 7.5) sia i relativi ricambi orari.

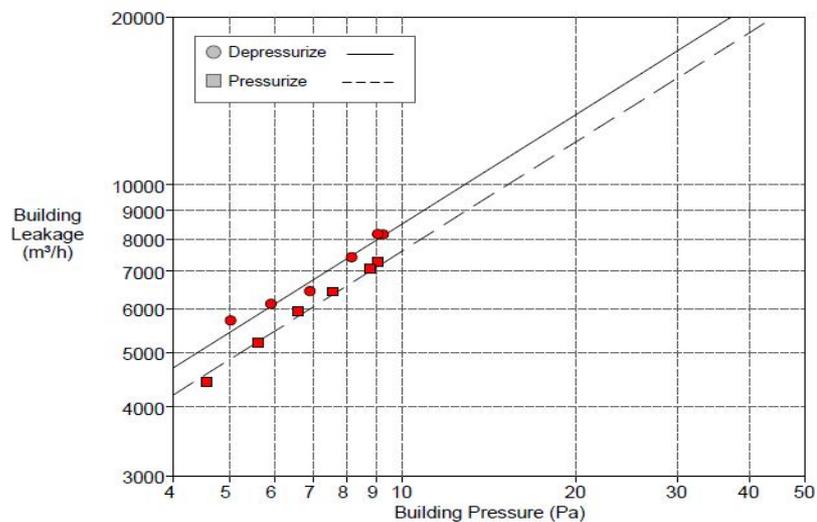


Grafico 7.5: Curva di permeabilità per il test effettuato nella Sala n°18, Sala Aemilia Ars e Sala dei Cavalleggeri.

Il valore di ricambi d'aria riferito a $\Delta p = 50$ Pa è pari a 15.52 h^{-1} per la fase in depressione e 13.86 h^{-1} per la fase in pressione; tale risultato è molto superiore ai valori imposti dalla normativa ed ai valori ottenuti nelle altre Sale analizzate sia nelle Collezioni Nazionali sia nell'ala degli Uffici. Tale aspetto è legato alla presenza del soffitto a cassettoni, del condotto degli impianti nel pavimento di tutte e tre le Sale ed alle consistenti infiltrazioni di aria negli infissi, in particolar modo quelli della Sala dei Cavalleggeri come riportato nel capitolo 7.4.2.2.4. Confrontando i risultati ora ottenuti con i test svolti in precedenza si può affermare che il valore elevato di n_{50} raggiunto nel test delle Sale n°20, n°19 e n°18 era causato dalla presenza del soffitto a cassettoni in quest'ultima. È stato possibile confermare la forte dispersione termica attraverso il soffitto a cassettoni mediante l'utilizzo della termocamera che ha messo in luce i

numerosi punti freddi visibili (Fig. 7.112); in alcuni punti isolati è addirittura possibile vedere, vicino alle travi principali, la luce che filtra dall'esterno.

Sono infine raccolti e riportati tutti i risultati (Tab. 7.2) ottenuti nelle diverse aree sottoposte al Blower Door Test, sia nell'ala degli Uffici sia alle Collezioni Comunali D'Arte, durante la seconda campagna di indagine.

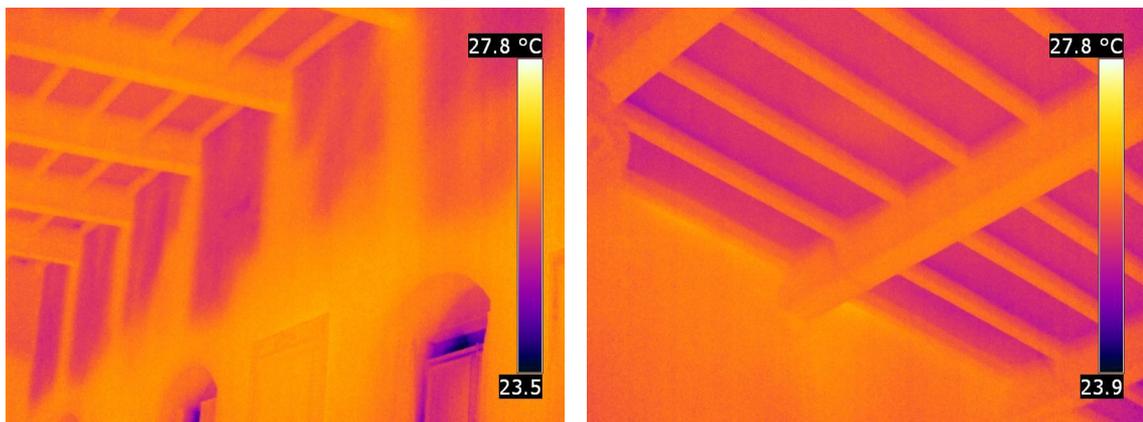


Figura 7.112: Infiltrazioni di aria nel soffitto a cassettoni.

Tabella 7.2: Numero di ricambi d'aria orari ottenuti nelle aree appartenenti agli Uffici ed alle Collezioni Comunali D'Arte e sottoposte al Blower Door Test durante la seconda campagna di indagine.

<u>RISULTATI SECONDA CAMPAGNA DI INDAGINE</u>	
UFFICI	n_{50, MEDIO} [h⁻¹]
1° Piano	4.7
COLLEZIONI COMUNALI D'ARTE	n_{50, MEDIO} [h⁻¹]
Sala Urbana	2.5
Sala dei Primitivi, Sala del '500 e Sala Vidoniana	4.4
Sala n°20 e n°19	2.4
Sala n°18, Aemilia Ars e Sala dei Cavalleggeri	14.7

7.6 PROBLEMATICHE DELL'APPLICAZIONE DEL BLOWER DOOR TEST IN EDIFICI STORICI ESISTENTI

Nello svolgere il Blower Door Test in diverse aree di Palazzo D'Accursio è stato possibile mettere in luce le diverse problematiche e difficoltà di applicazione di tale tecnica ad edifici storici esistenti. Le criticità incontrate nella prova riguardano sia la procedura preparatoria sia i risultati ottenuti.

È stato constatato un notevole aumento dei *tempi* di svolgimento del test causato da numerose criticità incontrate nella fase di installazione della strumentazione, nella sigillatura dell'area in esame e durante l'esecuzione stessa della prova. In particolare la prima difficoltà che è stata incontrata riguarda la scelta del *posizionamento della ventola*.

A differenza degli edifici dell'edilizia comune, la maggior parte degli infissi presenti in un edificio storico non è dotata di balcone o di camminamento esterno per cui sono automaticamente esclusi; installando, infatti, la strumentazione su un infisso non raggiungibile dall'esterno non sarebbe possibile svolgere il test in pressione. Inoltre talvolta le finestre sono caratterizzate da dimensioni troppo piccole, o permettono l'apertura di una sola imposta, e ciò non consente di poter posizionare il telaio su di esse. Di conseguenza occorre posizionare il ventilatore su una porta interna ma anche tale scelta non risulta essere banale in quanto i vani presenti negli edifici storici hanno dimensioni maggiori rispetto ai vani dei tipici edifici attuali e risultano essere incompatibili con le dimensioni massime del telaio del ventilatore.

La strumentazione del Blower Door Test è infatti composta da un telaio con aste telescopiche che può essere esteso al massimo per 2.27 m in altezza e 1.05 m in larghezza (Fig. 7.113). Per risolvere tale problematica occorre, di volta in volta, trovare in sito una soluzione; nell'analisi svolta a Palazzo D'Accursio quando l'apertura era di dimensioni maggiori rispetto al telaio della strumentazione sono stati utilizzati blocchi di EPS appositamente tagliati ed adattati al vano (Fig. 7.114).

Posizionando, inoltre, il ventilatore su una porta esso non è a contatto diretto con l'esterno e per svolgere correttamente il test occorre lasciare aperti gli infissi della stanza esterna confinante.

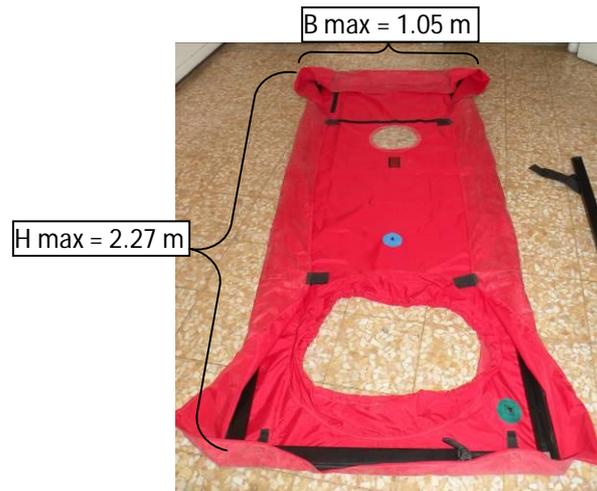


Figura 7.113: Dimensioni massime telaio del Blower Door Test.



Figura 7.114: Preparazione dei blocchi in EPS, montaggio del telaio ed installazione della strumentazione completa per effettuare il Blower Door Test.

Ulteriore problematica, che rende particolarmente complessa la procedura preparatoria, è la difficoltà nella *realizzazione delle sigillature* in quanto, per svolgere il test in modo idoneo, occorre che l'area in esame sia isolata dall'ambiente circostante ma non tutte le aperture degli edifici storici sono dotate di porte. In tal caso, nell'analisi svolta, sono stati utilizzati telai in legno, appositamente tagliati per ogni vano, teli in nylon e nastro adesivo; il telaio in legno è stato ulteriormente puntellato con aste di legno trasversali (Fig. 7.115). Durante l'esecuzione del test tali sigillature spesso non hanno retto alla differenza di pressione instaurata, mediante la ventola, tra l'interno e l'esterno della zona in esame; in particolare si è assistito più volte al distacco del nastro adesivo, disposto sul telo di nylon, dall'architrave in pietra ed alla caduta a terra delle aste trasversali al telaio in legno. L'avvenimento di tali fenomeni ha reso necessario, di

volta in volta, l'interruzione dell'esecuzione del test per permettere agli operatori di riparare, ed eventualmente rafforzare, le sigillature andate in crisi.



Figura 7.115: Preparazione dei telai in legno ed esempio di una chiusura realizzata mediante aste di legno, telo in nylon e nastro adesivo.

Il nastro adesivo è un componente fondamentale per sigillare al meglio l'apertura e per fissare, tra loro, i diversi materiali utilizzati ma, essendo l'oggetto della prova un edificio storico, sono stati utilizzati, in base alle varie esigenze, differenti tipi di nastri. In particolare, occorre scegliere un nastro adesivo che da un lato sia abbastanza resistente per mantenere integra la chiusura durante il test e, dall'altro, non arrechi danno ai materiali ed alle finiture presenti specie in fase di rimozione.

Nella zona delle Collezioni Nazionali le porte sono verniciate e decorate ed gli architravi delle aperture sono in pietra rifinita mediante la tecnica della "sagramatura"; applicare un nastro adesivo fortemente aderente avrebbe arrecato, in fase di asportazione, danni irreparabili ad entrambi i materiali (Fig. 7.116). Al contrario, per sigillare le chiusure al pavimento in marmo ed all'intonaco dell'ala degli Uffici è stato possibile utilizzare un nastro adesivo maggiormente tenace.

Negli edifici storici, inoltre, è necessario sigillare, mediante nastro adesivo e cartone posto al di sotto delle imposte, anche le porte ed i portoni presenti poiché non sempre è possibile chiuderli mediante l'utilizzo di una chiave ed, anche se chiusi, non è assicurata l'ermeticità all'aria (Fig. 7.117).



Figura 7.116: Nastro non fortemente adesivo utilizzato per effettuare le sigillature delle Collezioni Comunali.



Figura 7.117: Porta sigillata con nastro adesivo e cartone al di sotto delle imposte.

Per svolgere tale procedura preparatoria in tempi accettabili è richiesta la presenza e la manodopera di diversi operatori; a differenza di un edificio di recente costruzione non è possibile eseguire il Blower Door Test in edifici storici con l'utilizzo di pochi operatori, ciò comporta la necessità di una *maggiore disponibilità di personale* e *maggiori costi* di esecuzione.

Ulteriori criticità sono presenti anche durante lo svolgimento vero e proprio del test ed, in particolare, vi è una grande *incertezza sul Δp , max raggiungibile e sul valore di n_{50}* fornito in output. La normativa UNI EN 13829 impone il valore di riferimento di Δp tra l'ambiente interno ed esterno pari a 50 Pa sia per il valore massimo da cui far partire il test sia per i ricambi d'aria orari ottenuti come risultato.

Nell'analisi svolta a Palazzo D'Accursio, in diverse aree, il Δp , max raggiungibile è inferiore al Δp imposto dalla normativa poiché ci sono consistenti infiltrazioni di aria dovute alla presenza di infissi in legno non perfettamente ermetici, condotti degli impianti a pavimento, numerose fessure e soffitto, in alcune Sale, a cassettoni. Poiché non è possibile eliminare tali punti critici in quanto sono parte

integrante della struttura in esame è possibile svolgere ugualmente il test a tali valori di Δp ed in output il software fornisce, in modo automatico, il valore di ricambi orari n_{50} ottenuto mediante un'interpolazione lineare dei dati disponibili.

In edifici dell'edilizia comune, inoltre, i valori dei ricambi orari sono all'incirca standardizzati e compatibili, a meno che non vi siano particolari condizioni, con i limiti normativi mentre, negli edifici storici si ottengono risultati sempre differenti tra loro e spesso molto superiori ai valori imposti dalla normativa.

Ogni volta che si effettua il test in una determinata area occorre interpretare il valore di n_{50} ottenuto e valutare, nel caso esso sia molto elevato, la fonte principale delle infiltrazioni dell'aria. Tale procedura, a sua volta, non è banale poiché negli edifici storici l'altezza delle stanze è maggiore e spesso non è possibile raggiungere fisicamente tutti i punti dell'area analizzata e non è facile rilevare puntualmente l'entità delle infiltrazioni; per risolvere tale problematica un ausilio importante è fornito dalla termografia.

Nell'analisi svolta a Palazzo D'Accursio mediante un'accurata analisi termografica, parallela all'esecuzione del test di permeabilità all'aria, è stato possibile individuare i principali punti non ermetici (Fig. 7.118); tali aspetti, seppur relativi ad una specifica indagine, possono assumere una valenza universale e forniscono ottimi spunti per la ricerca delle criticità degli edifici storici in genere.

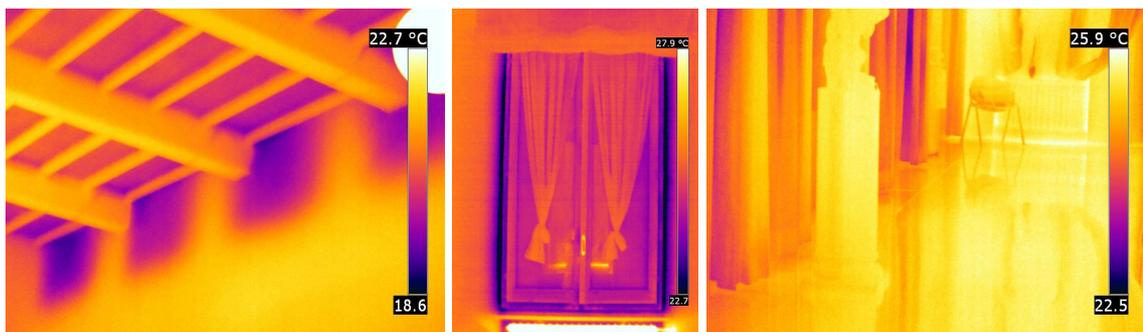


Figura 7.118: Punti critici di Palazzo D'Accursio: soffitto a cassettoni, infissi in legno, condotto degli impianti a pavimento.

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha riguardato l'applicazione di varie tecniche diagnostiche non distruttive su edifici storici in muratura in accordo con gli obiettivi e gli scopi proposti da differenti progetti europei. Preso atto della massiccia presenza di tali edifici su tutto il territorio europeo e constatata la loro elevata inefficienza sia energetica sia strutturale, sono stati infatti finanziati specifici casi studio per cercare di proporre e testare efficienti metodologie di indagine utili per la salvaguardia del patrimonio culturale esistente.

Circa la sfida di colmare il divario tra gli edifici storici e quelli di recente costruzione in materia di tutela dell'ambiente ed efficienza energetica è stato effettuato a Palazzo D'Accursio (Bo), caso studio contemplato nel progetto europeo 3ENCULT, il Blower Door Test al fine di effettuare un'analisi sulla permeabilità all'aria di tale edificio. I risultati della prova hanno messo in luce i principali punti non ermetici dell'involucro edilizio quali, ad esempio, la presenza di infissi in legno non propriamente ermetici, il condotto degli impianti situato sul pavimento e diverse zone caratterizzate da parquet e soffitti a cassettoni fortemente disperdenti. L'individuazione di tali criticità permette sia la pianificazione di interventi mirati, al fine di aumentare il comfort interno, diminuire gli sprechi energetici e salvaguardare i numerosi beni contenuti all'interno, sia di offrire importanti spunti per l'applicazione di tale metodologia di indagine, ancora in via di sviluppo, su edifici storici in muratura.

L'aver utilizzato infatti il Blower Door Test in tale analisi ha permesso di sottolineare le diverse problematiche e difficoltà incontrate nell'applicazione di tale metodologia innovativa su edifici non appartenenti all'edilizia comune. In particolare è stato riscontrato un sostanziale aumento dei tempi di svolgimento del test, della richiesta di manodopera specializzata e dei costi di esecuzione, dovuto alle criticità incontrate sia durante la procedura preparatoria sia durante lo svolgimento della prova. La stessa installazione della strumentazione può risultare difficoltosa a causa dell'incompatibilità tra la dimensione delle aperture presenti negli edifici storici e le dimensioni massime del telaio del ventilatore; nell'analisi svolta per ovviare a tale problematica sono stati utilizzati dei blocchi di EPS appositamente ritagliati in sito. Ulteriore criticità è stata riscontrata nell'isolare l'area in esame mediante la chiusura delle aperture presenti; la soluzione migliore riscontrata in corso d'opera è stata quella di sigillarle mediante l'utilizzo di telaio in legno, telo in nylon, ulteriori travetti in legno trasversali e nastro

adesivo non invasivo sul contorno. Anche i risultati ottenuti infine, in termini di ricambi orari, sono di difficile interpretazione poiché sono spesso superiori ai limiti imposti dalla normativa ed occorre, in base allo specifico caso in esame, valutare e ricercare la principale fonte di dispersione termica.

Un ulteriore caso studio presente nel progetto europeo 3ENCULT riguarda la Palazzina della Viola, di proprietà dell'Università di Bologna, per cui è previsto un intervento di riqualificazione e restauro; a tal fine sono state eseguite prove diagnostiche non distruttive per rilevare lo stato di fatto della struttura e le condizioni climatiche presenti al suo interno.

In particolare, per monitorare i moti convettivi dell'aria all'interno del salone situato al primo piano della Palazzina, è stato pensato di utilizzare delle strisce di carta appese dal soffitto al pavimento e la tecnica della termografia infrarossa che ha permesso, in tal modo, di rilevare le temperature presenti nel salone alle diverse quote di altezza. Sono state effettuate diverse serie di acquisizione dati al fine di monitorare sia il flusso di aria calda sia il flusso di aria fredda e di ricavare, per ogni condizione di prova, le mappe di temperatura orizzontali e verticali. Dal confronto dei risultati ottenuti e la verifica mediante l'utilizzo di un fumogeno, che ha reso visibile l'andamento del flusso dell'aria, è possibile affermare che tale particolare metodologia di analisi fornisce un attendibile esempio di monitoraggio del flusso dei moti convettivi dell'aria senza dover ricorrere ad interventi invasivi e dannosi per la struttura in esame. Tale studio rappresenta infine un buon punto di partenza per rilevare, mediante l'utilizzo della carta, la temperatura di superfici e materiali con bassa emissività o fortemente riflettenti quali ad esempio l'aria o il vetro.

Ulteriore indagine alla Palazzina della Viola è stata svolta sui pavimenti presenti al primo piano mediante l'utilizzo del GPR al fine di evidenziare la struttura principale dei solai in esame ed accrescere il livello di conoscenza del manufatto. Al termine dell'elaborazione dei dati, acquisiti mediante l'antenna da 900 MHz, e del confronto tra i risultati ottenuti è possibile affermare che sono stati individuati tutti gli elementi principali costituenti le diverse tipologie di solaio presenti della zona analizzata. Nello specifico è stato possibile caratterizzare i diversi elementi, con un livello di approssimazione accettabile, in termini di materiale costituente, posizione, interasse e dimensioni geometriche principali. Le maggiori difficoltà riscontrate rappresentano l'individuazione degli elementi lignei che, essendo più profondi e poco riflettenti, tendono ad essere coperti dalla forte riflessione propria degli elementi metallici presenti

nelle circostanze. I risultati ottenuti forniscono quindi un importante ausilio all'organizzazione e pianificazione delle opere di ristrutturazione e restauro previste per l'edificio in esame al fine di renderlo maggiormente efficiente dal punto di vista strutturale ed energetico.

Infine è stata svolta l'elaborazione dei dati radar acquisiti sui muretti in pietra leccese presso il laboratorio di ricerca CETMA (Brindisi) mediante l'utilizzo sia dell'antenna da 900 MHz sia dell'antenna Palm 2 GHz. I risultati ottenuti hanno messo in luce sia la struttura interna dei muretti intonacati, in termini di giunti di malta e corsi dei mattoni, sia i difetti di vario materiale e dimensione inclusi all'interno (fori ciechi, piastre metalliche, blocchi in legno, fogli di teflon, riempimento con malta cementizia). Di tutti gli elementi individuati è stato possibile rilevare, con approssimazione pari alla risoluzione delle antenne utilizzate, lo spessore, la profondità, le dimensioni geometriche ed il materiale costituente. È stato inoltre possibile cogliere la risalita dell'acqua, di qualche cm, presente alla base del muretto immerso in acqua e cloruro di sodio e quantificare l'abbattimento dell'ampiezza del segnale riflesso dovuto alla presenza di acqua che tende ad attenuare il segnale e ritardare la riflessione.

I risultati globalmente ottenuti mediante l'utilizzo di tecniche diagnostiche non distruttive, talvolta anche di carattere innovativo, su edifici storici hanno messo in luce l'applicabilità di tali metodologie anche al di fuori del campo dell'edilizia comune e la loro particolare adeguatezza nell'ambito della salvaguardia del patrimonio culturale esistente. Esse hanno infatti permesso di accrescere la conoscenza del manufatto, individuare le criticità e localizzare i principali elementi della struttura interna fornendo dati importanti per la programmazione di opere di ristrutturazione future al fine di migliorare l'efficienza energetica e strutturale di tali edifici senza che essi subiscano ulteriori danni. I risultati ottenuti costituiscono infine un'ottima base per nuovi sviluppi futuri circa l'applicabilità di tecniche diagnostiche non distruttive su edifici storici in muratura e le tematiche, sempre più diffuse, della riabilitazione strutturale e tutela ambientale.

BIBLIOGRAFIA

1. DIAGNOSTICA DEL PATRIMONIO ESISTENTE MEDIANTE TECNICHE NON DISTRUTTIVE

- Daniel J.D. (2004) “Ground Penetrating Radar”, Annan Editor
- Grego A., Quagliarini E. (2007) “L’involucro edilizio: una progettazione complessa”, Alinea Editrice
- Harry M. Jol (2009) “Ground penetrating radar: theory and applications”, Elsevier
- Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni (2006)
- Pardi G., Lucci A. (2010) “Architettura energetica”, Alinea Editrice
- Roche G. (2011) “Prontuario operativo per la certificazione energetica”, Maggioli Editore
- Ruggerone E. (2004) “Diagnostica strutturale”, Dario Flaccovio Editore
- www.georadar.it
- www.geophysical.com (GSSI)

2. STATO DELL'ARTE DELLE TECNICHE DIAGNOSTICHE NON DISTRUTTIVE UTILIZZATE

2.1 Termografia infrarossa applicata ad edifici storici in muratura: stato dell'arte della tecnica

- Accardo G., Camuffo D. (1980) “Microclimate inside the Scrovegni Chapel in Padua”, 8th IIC Congress, Conservation within historical Buildings, Vienna, pp. 15–17
- Barreira E., Vasco P. de Freitas (2007) “Evaluation of building materials using infrared thermography”, Construction and Building Materials, v. 21, n. 1, pp. 218-224
- Camuffo D., Fassina V., Havermans J. (2010) “Basic Environmental Mechanisms: affecting cultural heritage”, EnviArt, Nardini Editore, pp. 9-14
- Colantonio A. (1997) “Thermal performance patterns of solid masonry exterior walls of historical buildings”, SPIE 3056, pp. 87–95
- Grinzato E., Bressan C., Marinetti S., Bison P.G., Bonacina C. (2002) “Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared”, Infrared Physics and Technology, v 43, n 3-5, p 165-169

- Imposa S. (2010) "Infrared thermography and Georadar techniques applied to the „Sala delle Nicchie“ (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy)", *Journal of cultural heritage*, v. 11, n. 3, pp. 259-264

2.2 Ground Penetrating Radar applicato ad edifici storici in muratura: stato dell'arte della tecnica

- Barrile V., Pucinotti R. (2005) "Application of radar technology to reinforced concrete structures: A case study", *NDT&E International*, v. 38, n. 7, pp. 596-604

- Binda L., Lenzi G., Saisi A. (1998) "NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterisation of stone masonries", *NDT&E International*, v. 31, n. 6, pp. Capitolo 2 Stato dell'arte delle tecniche diagnostiche non distruttive utilizzate 411-419

- Binda L., Lualdi M., Saisi A., Zanzi L., Gianinetto M., Roche G. (2003) "NDT applied to the diagnosis of historic buildings: a case history", *Proceedings of the Int. Conf. on Structural Faults and Repair*, July 1-3, London

- Binda L., Saisi A., Zanzi L. (2008) "Radar investigation and diagnosis of historic masonry", *Proceedings of the Int. Conf. on Structural Faults and Repair*, June 10-12, Edinburgh

- Bungey J.H. (2004) "Sub-Ground Radar Testing of Concrete: A Review", *Construction and Building Materials*, v. 18, pp. 1-8

- Cassioli D., Marchetti D., Olini F., Orlandi O., Seri R., Spina S. (2009) "Esempi di applicazioni GPR (ground penetrating radar) su beni architettonici e grandi complessi di edilizia civile e industriale nel centro Italia", *AIPnD Journal*

- Giunta G. (2009) "Indagini Ground Penetrating Radar (GPR) su Monumenti Architettonici: Facciata della Basilica di San Pietro e Duomo di Milano", *AIPnD Journal*, n. 4, pp. 54-60

- Hugenschmidt J., Loser R. (2008) "Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 41, n. 4, pp.785-792

- Imposa S., Barone F., Gresta S., Leone A. (2009) "Ground penetrating radar survey finalized to the recovery of the S. Agata alla Badia church in Catania (eastern Sicily, Italy)", v. 58, n. 4, pp. 889-896

- Montemor, Simones, Ferreira (2003) "Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques", *Cem. Concr. Compos.*, n. 25, pp. 491-502

- Sbartai Z.M., Laurens S., Balayssac J.P., Ballivy G., Airliguie G. (2006) “Effect of Concrete Moisture on Radar Signal Amplitude”, *ACI Materials Journal*, v. 103, n. 6
- Zanzi L., Lualdi M. (2009) “Recenti progressi nella tecnologia GPR e loro impatto sulle applicazioni per la diagnostica”, *AIPnD Journal*, n. 4, pp. 47-53

2.3 Valutazione della tenuta all’aria degli edifici mediante il Blower Door Test: stato dell’arte della tecnica

- Binamu A. (2002) “Integrating building design properties „air tightness” and ventilation heat recovery for minimum heating energy consumption in cold climates”, Dissertation. Tampere University of Technology.
- DePani S., P.E., Fazio P. (2005) “Airtightness testing of two- And three-unit buildings with a single fan”, *Journal of Architectural Engineering*, v. 11, n. 1, pp. 19-24
- Jokisalu J, Kurnitski J. (2002) “Simulation of energy consumption in typical Finnish detached house”, Helsinki University of Technology, HVAC-laboratory, Report B74
- Kalamees T. (2007) “Air tightness and air leakages of new lightweight single - family detached houses in Estonia”, *Building and Environment*, v. 42, n. 6, pp. 2369-2377
- Sfakianaki A., Pavlou K., Santamouris M., Livada I., Assimakopoulos M.-N., Mantas P., Christakopoulos, A. (2008) “Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece”, *Building and Environment*, v. 43, n. 4, pp. 398-405

3. PROGETTI EUROPEI E RELATIVI CASI STUDIO

- Zucchini D., Giordani P. (1935) “La Palazzina della Viola in Bologna”, Editore Cassa di Risparmio
- www.smoohs.eu
- www.3encult.eu

4. MONITORAGGIO DEI MOTI CONVETTIVI

- Camuffo D. (1998) “Microclimate for Cultural Heritage”, Amsterdam, Elsevier
- Camuffo D., Fassina V., Havermans J. “Basic Environmental Mechanisms”, Nardini
- Lucci A., Pardi G. (2010) “Architettura Energetica”, Alinea

7. PROVA DI PERMEABILITÀ ALL'ARIA DI UN EDIFICIO STORICO IN MURATURA

- Bernardini C. (2002) “Collezioni Comunali d'Arte di Bologna”, Ferrara
- UNI EN 13829:2002 “Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici. Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore”
- Zucchini G. (1938) “Catalogo delle Collezioni Comunali d'Arte di Bologna”, Bologna

ALLEGATO A: Tabelle delle temperature delle strisce di carta per le varie quote di riferimento e per le diverse serie termografiche

Sono riportati in tabella (Tab. A1-A8) i valori di temperatura dei livelli di quote di riferimento ricavati per ciascuna serie di acquisizioni dati; in nero sono riportati i dati estrapolati da ogni termogramma mediante l'utilizzo del software specifico mentre in rosso sono i valori ricavati mediante proporzione aritmetica. Inoltre sono mostrati i valori di temperatura (Tab. A9-A11) corrispondenti alle mezzerie delle pareti, agli angoli, al pavimento ed al soffitto del salone 1F9 ed ai pezzi di carta applicati sugli infissi (cfr. Cap. 5.5-5.6).

- TUTTO CHIUSO

Tabella A.1: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la serie con tutti gli infissi chiusi.

TUTTO CHIUSO				
STRISCIA	IR-DC	T_{pav}	IR-DC	T_{1m}
1	3436/37-3446/47	18,6	3436/37-3446/3447	19,3
2	3436/37-3446/47	18,4	3436/37-3446/47	19,0
3	3436/37-3438/39	18,1	3436/37-3438/39-3446/47	18,8
4	3434/35	18,7	3436/37-3446/3447	19,2
5	3470/71	18,6	3470/71-3472/73	20,0
6	3442/43	18	3442/43	18,6
7	3442/43	18,1	3450/51	18,5
8	3438/39-3440/41	17,95	3438/39-3440/41-3448/49	18,7
9	3438/39-3448/49	18,2	3438/39-3448/49	18,7
10	3436/37-3438/39-3446/47	18,4	3436/37-3438/39-3446/47	18,7
11	3438/39-3448/49	18,2	3438/39-3448/49	18,6
12	3440/41	18	3440/41	18,6
13	3444/45	17,8	3444/45	18,6
14	3442/43	17,9	3450/51	18,4
15	3440/41-3442/43	18,1	3440/41-3450/51	18,5
16	3440/41-3448/49	18	3440/41-3448/49	18,5
17	3438/39-3440/41-3448/49	17,9	3438/39-3440/41-3448/49	18,6

T media

18,2

18,8

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoffitto
3446/47	19,5	3454/55	19,2	19,10	19,00	3454-55	18,9
3446/47	19,1	3454/55	19				
3446/47	18,8	3454/55	19,1				
3454/55	19,4		19,30	19,20	19,10	3464/65 (travetto)	19
3472/73	19,7	3474/75	19,5				
3450/51	18,8		18,77	18,75	18,73	3460/61	18,7
	18,50	3468/69	18,5	18,60	18,50	3460/61	18,5
3448/49	18,9	3456/57	18,8	18,80	18,80	3466/67	18,8
3448/49	18,9		18,80	18,70	18,67	3456/57-3466/67	18,6
3446/47	18,8	3454/55	18,7	18,76	18,82	3454-55	18,9
3448/49	18,60		18,70	18,70	18,80	3456/57	18,9
	18,62		18,64	18,66	18,68	3458/59-3466/67	18,7
3452-53	18,7	3452/53	18,9	18,80	18,70	3462/63 (travetto)	18,7
3450/51	18,8						
	18,54		18,58	18,62	18,66	3458/59-3468/69	18,7
3448/49	18,7		18,70	18,70	18,70	3456/57 (TRAVE)	18,7
3448/49	18,6		18,63	18,65	18,67	3456/57	18,7

T media	18,9
----------------	------

18,9	18,8	18,8
------	------	------

18,8

- FINESTRA APERTA: 1° SERIE

Tabella A.2: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la 1° serie a finestra aperta.

FINESTRA APERTA 1°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3480/81-3490/91	18,9	3480/81-3490/91	19,8
2	3480/81	18,5	3480/81-3490/91	19,1
3	3480/81-3482/83	18,0	3480/81-3482/83-3490/91-3492/93	18,8
4	3478/79	18,6	3480/81	19,2
5				
6	3486/87	18,1	3486/87	18,8
7	3484/85-3486/87	18,0	3484/85	18,8
8	3482/83	18,1	3482/83-3492/93	18,8
9	3482/83	18,3	3482/83-3492/93	18,8
10	3480/81-3482/83	18,5		19,0
11	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	18,8
12	3484/85	18,0	3484/85	18,8
13	3488/89	18,0	3488/89	18,7
14	3486/87	18,0		
15	3484/85	18,1	3484/85	18,9
16				
17	3482/83	18,2	3482/83-3492/93	18,6

T media

18,2

18,9

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoffitto
3490/91	20,1	3490/91	20,4	20,56	20,7	3498/99	20,9
3490/91	19,3		19,36	19,4	19,49	3498/99	19,5
3490/91-3492/93	19,2	3498/99	19,5				
	19,2		19,28	19,32	19,36	3506/06(travetto)	19,4
	18,9		18,96	19,04	19,12	3504/05	19,2
	19,0		19,12	19,28	19,44	3504/05	19,6
3492/93	19,0		19,3	19,7	19,9	3500/01	20,2
3492/93	19,2	3492/93	19,3	19,56	19,82	3500/01	20,1
	19,5		20	20,5	21	3498/99	21,5
3492/93	18,8	3492/93	19,1	19,6	20,1	3500/01	20,5
	18,9	3496/97	19,1	19,4	19,22	3502/03(trave)	19,3
						3500/01(trave)	19,9
3492/93	18,9	3492/93	19,1	19,7	19,9	3500/01	20,1

T media

19,2

19,4

19,6

19,8

20,0

- FINESTRA APERTA: 2° SERIE

Tabella A.3: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la 2° serie a finestra aperta.

FINESTRA APERTA 2°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3528/29	18,8	3510/11-3520/21	19,7
2	3528/29-3532/33	18,5	3510/11-3520/21	19,3
3	3530/31-3532/33	18,4	3510/11-3520/21	19,1
4		18,5	3510/11	19,3
5	3548/49	18,5	3542/43	20,0
6	3538/39	18,2	3514/15	18,8
7	3536/37-3538/39	18,1	3514/15	18,8
8	3532/33-3534/35	18,1	3512/13-3522/23	18,9
9	3532/33-3534/35	18,2	3512/13-3522/23	18,7
10	3528/29	18,8		19,05
11	3534/35	18,3	3512/13-3522/23	18,4
12	3536/37	18,2	3512/13-3522/23	18,7
13	3540/41	17,8	3516/17	18,7

14		18,0		18,55
15	3536/37	18,1		18,50
16	3534/35	18,0	3512/13-3522/23	18,9
17	3534/35	18,2	3512/13-3522/23	18,7

T media

18,3

18,9

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoffitto
3520/21	20,0		20,32	20,65	20,97	3528/29	21,3
3520/21	19,4		19,6	19,8	20	3528/29-3532/33	20,2
3520/21	19,5		19,6	19,55	19,58	3530/31-3532/33	19,6
3520/21	19,9						
3544/45	20,3	3546/47	19,9	19,76	19,63	3548/49	19,5
3524/25	19,2		19,23	19,25	19,27	3538/39	19,3
3524/25	19,1		19,22	19,35	19,47	3536/37-3538/39	19,6
3522/23	19,5		19,6	19,6	19,5	3532/33-3534/35	19,5
3522/23	19,4		19,53	19,65	19,77	3532/33-3534/35	19,9
3520/21	19,3		19,75	20,2	20,65	3528/29	21,1
3522/23	19,3	3522/23	19,4	19,76	20,12	3534/35	20,5
3522/23	19,1		19,3	19,5	19,7	3536/37	19,9
3526/27	19,2	3526/27	19,6	19,56	19,53	3540/41	19,5
3524/25	19,1	3524/25	19,5				
	18,90	3524/25	19,3	19,34	19,36	3536/37	19,4
3512/13-3522/23	19,2						
3512/13-3522/23	19,3	3522/23	19,6	19,8	20	3534/35	20,2

T media 19,4

19,6 19,7 19,8

20,0

- FINESTRA APERTA: 3° SERIE

Tabella A.4: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la 3° serie a finestra aperta.

FINESTRA APERTA 3°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3552/53	18,8	3552/53-3562/63	20,6
2	3552/53-3554/55	19,2	3552/53-3554/55-3562/63	20,1
3	3550/51-3552/53-3554/55	19,0	3552/53-3554/55-3562/63	20,0
4	3550/51	19,4	3552/53	20,2
5			3588/89	20,7
6	3558/59	19,1	3558/59	20,0
7	3558/59	19,0	3566/67	18,6

8	3556/57	19,0	3556/57-3564/65	19,8
9	3554/55	19,2	3554/55-3564/65	19,9
10	3552/53-3554/55	19,2	3552/53-3554/55-3562/63	19,9
11	3554/55	19,0	3554/55	19,8
12	3554/55	19,0	3554/55-3564/65	19,8
13	3560/61	18,6	3560/61-3568/69	19,6
14	3558/59	18,9	3566/67	19,5
15	3556/57-3558/59	18,9	3556/57-3566/67	19,6
16	3556/57	18,8	3556/57-3564/65	19,9
17	3554/55-3556/57	18,9	3554/55-3556/57-3564/65	19,8

T media	19,0	19,9
----------------	------	------

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoffitto
3562/63	21	3562/63-3570/71	21,15	21,6	21,57	3570/71-3572/73	21,8
3562/63	20,5	3570/71	20,7	20,76	20,83	3572/73	20,9
3562/63	20,4	3570/71	20,6	20,50	20,33	3572/73-3574/75	20,2
3570/71	20,7						
3590/91	20,4	3590/91	20,5	20,4	20,24	3592/93	20,1
3566/67	20,2		20,10	19,9	19,80	3584/85	19,7
3566/67	20		20,02	20,05	20,07	3580/81-3582/83-3584/85	20,1
3564/65	20,2	3576/77-3578/79	20,3	20,26	20,23	3580/81	20,2
3564/65	20	3564/65-3576/77	20,2	20,36	20,52	3572/73-3576/77-3578/79	20,7
3552/53-3562/63	19,9		20,33	20,75	21,18	3570/71	21,6
	20,00		20,30	20,68	21,08	3576/77-3578/79	21,0
3564/65	20,1	3564/65	20,3	20,33	20,36	3578/79-3580/81	20,4
3568/69	20,1	3568/69	20,3	20,20	20,10	3586/87(TRAVETTO)	20,0
3566/67	20					3582/83	20,0
3566/67	19,9	3566/67	20,1	20,17	20,23	3580/81-3582/83	20,3
3564/65	20,1	3564/65	20,3	20,43	20,57	3578/79(TRAVE)	20,7
3564/65	20,1	3564/65	20,3	20,60	20,70	3576/77-3578/79	20,8

T media	20,2	20,4	20,5	20,5	20,5
----------------	------	------	------	------	------

- FINESTRA APERTA: 4° SERIE

Tabella A.5: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la 4° serie a finestra aperta.

FINESTRA APERTA 4°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3612/13	19,3	3612/13-3622/23	20,3
2	3612/13	18,8	3612/13-3622/23	19,8
3	3612/13-3614/15	18,4	3612/13-3614/15-3622/23	19,6

4	3610/11	18,8	3612/13	19,9
5	3646/47	18,9	3646/47	20,7
6	3618/19	18,4		19,15
7	3616/17-3618/19	18,3	3616/17-3624/25	19,6
8	3614/15	18,5	3614/15	19,6
9	3614/15	18,7	3614/15	19,6
10	3612/13-3614/15	18,8	3612/13-3614/15-3622/23	19,5
11	3614/15	18,6	3614/15-3624/25	19,5
12	3616/17	18,5	3616/17-3626/27	19,3
13	3620/21	18,1	3620/21	19,3
14	3618/19	18,3		19,0
15	3616/17	18,5	3616/17-3626/27-3628/29	19,4
16	3616/17	18,2	3616/17-3626/27	19,2
17	3614/15	18,6	3614/15-3624/25	19,5

T media	18,6	19,6
----------------	------	------

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoffitto
3622/23	20,5	3622/23	20,8	21,03	21,26	3632/33	21,5
3622/23	20,1	3622/23	20,2	20,30	20,46	3632/33	20,6
3622/23-3624/25	19,9	3632/33-3636/37	19,9	20,00	20,10	3634/35	20,2
3622/23	20,3						
3648/49	20,5	3648/49	20,4	20,20	20,05	3650/51(travetto)	19,9
3628/29	19,9		19,82	19,75	19,67	3640/41	19,6
3624/25-3626/27-3628/29	19,7	3624/25	20	19,80	19,96	3640/41-3642/43	19,95
3624/25	19,9	3624/25	19,9	19,95	20,00	3636/37-3638/39	20,05
	19,8		19,96	20,14	20,32	3636/37	20,5
3622/23-3624/25	19,8		20,28	20,75	21,22	3632/33-3636/37	21,7
3624/25	19,7	3624/25	19,9	20,30	20,70	3636/37	21,1
3626/27	19,7	3626/27	19,8	19,86	19,93	3642/43	20
3630/31	19,7	3630/31	20,1	19,96	19,83	3644/45(travetto)	19,7
3628/29	19,7		19,59	19,55	19,47	3642/43	19,4
3626/27-3628/29	19,6	3626/27	19,9	19,96	20,03	3642/43	20,1
3626/27	19,5		19,67	19,85	20,03	3638/39(trave)	20,2
3624/25	19,7	3624/25	20,1	20,20	20,30	3636/37	20,4

T media	19,9	20,0	20,1	20,2	20,3
----------------	------	------	------	------	------

- PORTA APERTA: 1° SERIE**Tabella A.6:** Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la 1° serie a porta aperta.

PORTA APERTA 1°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3712/13	19,3	3712/13-3722/23	19,6
2	3712/13-3714/15	19,2	3712/13-3714/15-3722/23	19,5
3	3712/13-3714/15	18,9	3712/13-3714/15-3722/23	19,3
4	3710/11	19,4	3712/13	19,8
5				
6	3718/19	18,2	3718/19	19,0
7	3718/19	18,4		18,53
8	3716/17	19,1	3716/17	19,7
9	3714/15-3716/17	19,1	3714/15-3716/17	19,6
10	3712/13-3714/15	19,3	3712/13-3714/15-3722/23	19,2
11	3714/15-3716/17	18,9	3714/15-3716/17-3724/25	19,3
12	3716/17	19,2		18,21
13	3720/21	18,2	3720/21	18,7
14	3718/19	18,3		18,46
15	3718/19	18,3		18,48
16	3716/17	18,9	3716/17	19,5
17	3716/17	18,8	3716/17-3724/25	19,4

T media

18,8

19,1

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoff
3722/23	19,6	3722/23-3730/31	19,7	19,76	19,83	3730/31	19,9
3722/23	19,3	3722/23-3730/31	19,4	19,50	19,60	3734/35	19,7
3722/23	19,2	3730/31	19,3	19,40	19,50	3732/33	19,6
3722/23-3730/31	19,6						
	19,15	3738/39-3744/45	19,3				
	18,66	3742/43	18,8	19,00	19,20	3740/41	19,4
3724/25	19,4	3724/25	19,6	19,50	19,40	3736/37	19,3
3724/25	19,2	3724/25	19,4	19,46	19,53	3734/35-3736/37	19,6
3722/23	19,1		19,23	19,35	19,47	3730/31	19,6
3724/25	19,1	3724/25	19,2	19,30	19,40	3734/35-3736/37	19,5
	18,27		18,33	18,39	18,46	3736/37-3738/39-3740/41	19,3
	19,00	3728/29	19,3	19,30	19,30	3744/45	19,3
	18,63		18,79	18,96	19,13	3742/43	19,3

	18,66		18,85	19,03	19,20	3738/39-3740/41	19,4
	19,46		19,42	19,38	19,34	3736/37	19,3
3724/25	19,3	3724/25	19,5	19,46	19,43	3734/35-3736/37	19,4

T media	19,1
----------------	------

19,2	19,3	19,3
------	------	------

19,5

- PORTA APERTA: 2° SERIE

Tabella A.7: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la 2° serie a porta aperta.

PORTA APERTA 2°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3748/49-3758/59	18,8	3748/49-3758/59	19,3
2	3748/49	18,6	3748/49-3758/59	19,1
3	3748/49	18,4	3748/49-3758/59	19,0
4	3746/47	18,7	3748/49-3758/59	19,2
5	3780/81	18,6	3780/81	19,6
6	3752/53-3754/55	18,3	3752/53-3754/55	18,9
7	3752/53-3754/55	18,2	3752/53	18,9
8	3750/51	18,5	3750/51-3760/61	18,9
9	3750/51	18,4	3750/51-3760/61	18,9
10	3748/49-3758/59	18,6	3748/49-3758/59	19,0
11	3750/51-3760/61	18,2	3750/51-3760/61	18,8
12	3750/51-3752/53	18,4		18,55
13	3756/57	18,3	3756/57	18,8
14	3754/55	18,2		18,50
15	3752/53	18,3		18,48
16	3750/51-3760/61	18,1	3760/61	18,6
17	3750/51-3760/61	18,1	3750/51-3760/61	19,0

T media	
----------------	--

18,4

18,9

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoff
3758/59	19,4	3758/59	19,5	19,53	19,56	3768/69	19,7
3758/59	19,2		19,33	19,45	19,58	3768/69	19,7
3758/59	19,2	3770/71	18,9				
	19,24		19,28	19,32	19,36	3778/79(travetto)	19,4
3782/83	19,5	3782/83	19,5	19,46	19,43	3784/85(travetto)	19,4
3764/65	19,1	3772/73	19,2	19,23	19,26	3774/75	19,3
3764/65	18,8	3772/73	19,1	19,23	19,36	3774/75	19,5
3760/61	19,2		19,22	19,25	19,27	3770/71	19,3

3760/61	19,1		19,20	19,30	19,40	3770/71	19,5
3758/59	19,0		19,15	19,30	19,45	3768/69	19,6
3760/61	19,0	3760/61	19,0	19,13	19,26	3770/71	19,4
	18,70		18,85	19,00	19,15	3772/73	19,3
	18,95	3766/67	19,1	19,17	19,23	3776/77(travetto)	19,3
3764/65	18,8	3764/65	19,1				
	18,66		18,85	19,03	19,22	3772/73	19,4
3760/61	18,9						
3750/51-3760/61	19,2	3760/61	19,1	19,17	19,23	3770/71	19,3

T media	19,1	19,1	19,3	19,3	19,4
----------------	------	------	------	------	------

- PORTA APERTA: 3° SERIE

Tabella A.8: Media aritmetica delle temperature rilevate da ogni termogramma e valori ricavati con proporzione aritmetica (in rosso) per la 3° serie a porta aperta.

PORTA APERTA 3°SERIE				
STRISCIA	IR-DC	Tpav	IR-DC	T1m
1	3788/89	19,7	3788/89-3796/97	20,1
2	3788/89	19,3	3788/89-3796/97	19,8
3	3788/89	19,2	3788/89	19,3
4	3786/87	19,7	3788/89	20,1
5	3818/19	19,2	3818/19	20,3
6	3792/93	19,1	3792/93	19,6
7	3792/93	19,1		19,20
8	3790/91	19,1	3790/91	19,8
9	3790/91	19,1	3790/91	19,5
10	3788/89	19,6	3788/89	19,8
11				
12	3790/91	19,2	3790/91	19,6
13	3794/95	18,8	3794/95	19,3
14	3792/93	19,0		
15	3792/93	19,1		
16	3790/91	19,1	3790/91	19,5
17	3790/91	18,8	3790/91	19,7

T media	19,2	19,7
----------------	------	------

IR-DC	T2m	IR-DC	T3m	T4m	T5m	IR-DC	Tsoff
3796/97	20,2	3796/97	20,2	20,26	20,33	3806/07	20,0
3796/97	19,8	3796/97	19,9	19,90	19,90	3806/07	19,9
3796/97	19,9	3806/07-3808-09	19,5				
3796/97	20,1		20,07	20,05	20,02	3804/05(travetto)	20,0

3820/21	19,7	3820/21	19,8	19,76	19,73	3824/25	19,7
	19,60		19,50	19,50	19,60	3814/15	19,6
	19,30		19,40	19,50	19,70	3812/13-3814/15	19,7
3798/99	19,6	3798/99-3808/09-3810/11	19,5				
3798/99	19,6	3798/99	19,6	19,66	19,73	3808/09-3810/11	19,8
3796/97	19,6		19,65	19,70	19,75	3806/07	19,8
3798/99	19,5	3798/99	19,6	19,66	19,73	3808/09	19,8
	19,62		19,64	19,66	19,68	3810/11	19,7
	19,45	3802/03	19,6	19,56	19,53	3816/17	19,5
3798/99	19,4	3798/99	19,6	19,60	19,60	3810/11	19,6
3798/99	19,7	3798/99	19,7	19,66	19,63	3808/09-3810/11	19,6

T media	19,7
----------------	------

19,7	19,7	19,8
------	------	------

19,7

- RILIEVO SU PARETI, ANGOLI, PAVIMENTO E SOFFITTO: 1° SERIE

Tabella A.9: Temperature rilevate da ogni termogramma relativo alla 1° serie di rilievi sulle pareti, angoli, pavimento, soffitto del salone 1F9 e sui tasselli di carta applicati in esso.

	Tpav	T2m	T3m	T4m	Tsoff
angolo Ovest	17,8	18,55	18,7	18,5	18,5
mezzeria parete N-O	17,5		18,3		18,4
angolo Nord	16,8	17,8	18	18	18
mezzeria parete N-E	17,2			18,1	18,2
angolo Est	17,7	18,4	18,2	18,3	18,4
mezzeria parete S-E	17,7		18,4		18
angolo Sud	17,9	18,5	18,6		18,5
mezzeria parete S-O	17,7		18,3	18,3	

Tasselli carta					
B	22,9	M	19	T	18
G	20,8	N	19	S	17,8
H	25,5	O	18,65	U	19,4
I	19,2	P	18,8	V	18,8
L	19,4	R	17,8	Z	17,8

- RILIEVO SU PARETI, ANGOLI, PAVIMENTO E SOFFITTO: 2° SERIE

Tabella A.10: Temperature rilevate da ogni termogramma relativo alla 2° serie di rilievi sulle pareti, angoli, pavimento, soffitto del salone 1F9 e sui tasselli di carta applicati in esso.

	Tpav	T2m	T3m	T4m	Tsoff
angolo Ovest	17,7	19,1	19,7	19,8	20,2
mezzeria parete N-O	18,3		19,5	19,8	19,7
angolo Nord	17,3	18,9	19,2	19,5	19,3
mezzeria parete N-E	18		19,3	19,4	19,1
angolo Est	18,3	19,3	19,6	19,3	19,3
mezzeria parete S-E	18,2		19,3	19,5	19,5
angolo Sud	18,7	19,7	19,7	19,9	20,2
mezzeria parete S-O	18		19	19,4	19,6

Tasselli carta					
A	21,7	M	20	S	19,7
B	21,4	N	19,9	T	19,5
G	21,4	O	19,4	U	19,3
H	20,9	P	19	V	19,9
I	20,7	Q	18,7	Z	18,8
L		20,4	R	18,6	

- RILIEVO SU PARETI, ANGOLI, PAVIMENTO E SOFFITTO: 3° SERIE

Tabella A.11: Temperature rilevate da ogni termogramma relativo alla 3° serie di rilievi sulle pareti, angoli, pavimento, soffitto del salone 1F9 e sui tasselli di carta applicati in esso.

	Tpav	T2m	T3m	T4m	Tsoff
angolo Ovest	17,5	18,7	19		20
mezzeria parete N-O	18,3	18,9		18,8	19,4
angolo Nord	17,2	18,6	18,5	18,8	19
mezzeria parete N-E	18,2		18,9		18,8
angolo Est	18,6		19,1	19,1	19,3
mezzeria parete S-E	18,5	19	19,5	19,6	20,2
angolo Sud	18,8	19,8	19,5	19,6	19,7
mezzeria parete S-O	17,8		19,1	19,5	19,7

Tasselli carta					
I	21,4	P	18,7	T	19,2
L	21	Q	18,7	V	19,7
M	20,6	R	18,1	Z	18,7
N		20,2	S	19,3	

ALLEGATO B: Tabelle di input per la creazione delle mappe delle temperature

Sono riportati in tabella (Tab. B1-B120) i file di input inseriti in Surfer per ottenere le mappe orizzontali e verticali, alle diverse quote di riferimento, per ogni serie termografica (cfr. Cap. 5.6).

MONITORAGGIO DI FLUSSI DI ARIA CALDA

Sezioni orizzontali

- TUTTO CHIUSO

Tabella B.1: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la serie con tutti gli infissi chiusi.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	18,6
2	4,22	2,05	18,4
3	6,69	2,17	18,1
4	9,83	1,28	18,7
5	12,92	1,4	18,6
6	10,58	4,1	18
7	9,47	5,02	18,1
8	6,77	4,19	17,95
9	3,98	4,51	18,2
10	1,28	3,33	18,4
11	0,96	5,44	18,2
12	5,88	6,58	18
13	12,8	7,41	17,8
14	9,09	7,83	17,9
15	6,85	7,73	18,1
16	2,6	8,27	18
17	1,11	7,34	17,9

Tabella B.2: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la serie con tutti gli infissi chiusi.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,3

2	4,22	2,05	19,0
3	6,69	2,17	18,8
4	9,54	1,07	19,2
5	12,92	1,4	20,0
6	10,58	4,1	18,6
7	9,47	5,02	18,5
8	6,77	4,19	18,7
9	3,98	4,51	18,7
10	1,28	3,33	18,7
11	0,98	5,65	18,6
12	5,88	6,58	18,6
13	12,8	7,41	18,6
14	9,09	7,83	18,4
15	6,85	7,73	18,5
16	2,6	8,27	18,5
17	1,11	7,34	18,6

Tabella B.3: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la serie con tutti gli infissi chiusi.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,5
2	4,22	2,05	19,1
3	6,69	2,17	18,8
4	9,54	1,07	19,4
5	12,92	1,4	19,7
6	10,58	4,1	18,8
7	9,47	5,02	18,50
8	6,77	4,19	18,9
9	3,98	4,51	18,9
10	1,28	3,33	18,8
11	0,98	5,65	18,60
12	5,88	6,58	18,62
13	12,8	7,41	18,7
14	9,09	7,83	18,8
15	6,85	7,73	18,54
16	2,6	8,27	18,7
17	1,11	7,34	18,6

Tabella B.4: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la serie con tutti gli infissi chiusi.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,2
2	4,22	2,05	19
3	6,69	2,17	19,1
4	9,54	1,07	19,30
5	12,92	1,4	19,5
6	10,58	4,1	18,77
7	9,47	5,02	18,5
8	6,77	4,19	18,8
9	3,98	4,51	18,80
10	1,28	3,33	18,7
11	0,98	5,65	18,70
12	5,88	6,58	18,64
13	12,8	7,41	18,9
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	18,58
16	2,6	8,27	18,70
17	1,11	7,34	18,63

Tabella B.5: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la serie con tutti gli infissi chiusi.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,10
2	4,22	2,05	
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,20
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,75
7	9,47	5,02	18,60
8	6,77	4,19	18,80
9	3,98	4,51	18,70
10	1,28	3,33	18,76
11	0,98	5,65	18,70
12	5,88	6,58	18,66
13	12,8	7,41	18,80
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	18,62
16	2,6	8,27	18,70
17	1,11	7,34	18,65

Tabella B.6: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la serie con tutti gli infissi chiusi.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,00
2	4,22	2,05	
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,10
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,73
7	9,47	5,02	18,50
8	6,77	4,19	18,80
9	3,98	4,51	18,67
10	1,28	3,33	18,82
11	0,98	5,65	18,80
12	5,88	6,58	18,68
13	12,8	7,41	18,70
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	18,66
16	2,6	8,27	18,70
17	1,11	7,34	18,67

Tabella B.7: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la serie con tutti gli infissi chiusi.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	18,9
2	4,22	2,05	
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,7
7	9,47	5,02	18,5
8	6,77	4,19	18,8
9	3,98	4,51	18,6
10	1,28	3,33	18,9
11	0,98	5,65	18,9
12	5,88	6,58	18,7
13	12,8	7,41	18,7
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	18,7
16	2,6	8,27	18,7
17	1,11	7,34	18,7

- FINESTRA APERTA: 1° SERIE

Tabella B.8: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	18,9
2	4,22	2,05	18,5
3	6,69	2,17	18,0
4	9,83	1,28	18,6
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,1
7	9,47	5,02	18,0
8	6,77	4,19	18,1
9	3,98	4,51	18,3
10	1,28	3,33	18,5
11	0,96	5,44	18,2
12	5,88	6,58	18,0
13	12,8	7,41	18,0
14	9,09	7,83	18,0
15	6,85	7,73	18,1
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	18,2

Tabella B.9: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,8
2	4,22	2,05	19,1
3	6,69	2,17	18,8
4	9,54	1,07	19,2
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,8
7	9,47	5,02	18,8
8	6,77	4,19	18,8
9	3,98	4,51	18,8
10	1,28	3,33	19,0
11	0,98	5,65	18,8
12	5,88	6,58	18,8
13	12,8	7,41	18,7
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	18,9

16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	18,6

Tabella B.10: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,1
2	4,22	2,05	19,3
3	6,69	2,17	19,2
4	9,54	1,07	19,2
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,9
7	9,47	5,02	19,0
8	6,77	4,19	19,0
9	3,98	4,51	19,2
10	1,28	3,33	19,5
11	0,98	5,65	18,8
12	5,88	6,58	
13	12,8	7,41	18,9
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	18,9

Tabella B.11: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,4
2	4,22	2,05	19,36
3	6,69	2,17	19,5
4	9,54	1,07	19,28
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,96
7	9,47	5,02	19,12
8	6,77	4,19	19,3
9	3,98	4,51	19,3
10	1,28	3,33	20
11	0,98	5,65	19,1
12	5,88	6,58	
13	12,8	7,41	19,1

14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,1

Tabella B.12: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,56
2	4,22	2,05	19,4
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,32
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	19,04
7	9,47	5,02	19,28
8	6,77	4,19	19,7
9	3,98	4,51	19,56
10	1,28	3,33	20,5
11	0,98	5,65	19,6
12	5,88	6,58	
13	12,8	7,41	19,4
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,7

Tabella B.13: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,7
2	4,22	2,05	19,49
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,36
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	19,12
7	9,47	5,02	19,44
8	6,77	4,19	19,9
9	3,98	4,51	19,82
10	1,28	3,33	21
11	0,98	5,65	20,1

12	5,88	6,58	
13	12,8	7,41	19,22
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,9

Tabella B.14: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la 1° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,9
2	4,22	2,05	19,5
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,4
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	19,2
7	9,47	5,02	19,6
8	6,77	4,19	20,2
9	3,98	4,51	20,1
10	1,28	3,33	21,5
11	0,98	5,65	20,5
12	5,88	6,58	
13	12,8	7,41	19,3
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	19,9
17	1,11	7,34	20,1

- FINESTRA APERTA: 2° SERIE

Tabella B.15: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 2° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	18,8
2	4,22	2,05	18,5
3	6,69	2,17	18,4
4	9,83	1,28	18,5
5	12,92	1,4	18,5
6	10,58	4,1	18,2
7	9,47	5,02	18,1

8	6,77	4,19	18,1
9	3,98	4,51	18,2
10	1,28	3,33	18,8
11	0,96	5,44	18,3
12	5,88	6,58	18,2
13	12,8	7,41	17,8
14	9,09	7,83	18,0
15	6,85	7,73	18,1
16	2,6	8,27	18,0
17	1,11	7,34	18,2

Tabella B.16: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la 2° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,7
2	4,22	2,05	19,3
3	6,69	2,17	19,1
4	9,54	1,07	19,3
5	12,92	1,4	20,0
6	10,58	4,1	18,8
7	9,47	5,02	18,8
8	6,77	4,19	18,9
9	3,98	4,51	18,7
10	1,28	3,33	19,05
11	0,98	5,65	18,4
12	5,88	6,58	18,7
13	12,8	7,41	18,7
14	9,09	7,83	18,55
15	6,85	7,73	18,50
16	2,6	8,27	18,9
17	1,11	7,34	18,7

Tabella B.17: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la 2° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,0
2	4,22	2,05	19,4
3	6,69	2,17	19,5
4	9,54	1,07	19,9
5	12,92	1,4	20,3

6	10,58	4,1	19,2
7	9,47	5,02	19,1
8	6,77	4,19	19,5
9	3,98	4,51	19,4
10	1,28	3,33	19,3
11	0,98	5,65	19,3
12	5,88	6,58	19,1
13	12,8	7,41	19,2
14	9,09	7,83	19,1
15	6,85	7,73	18,90
16	2,6	8,27	19,2
17	1,11	7,34	19,3

Tabella B.18: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la 2° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,32
2	4,22	2,05	19,6
3	6,69	2,17	19,6
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	19,9
6	10,58	4,1	19,23
7	9,47	5,02	19,22
8	6,77	4,19	19,6
9	3,98	4,51	19,53
10	1,28	3,33	19,75
11	0,98	5,65	19,4
12	5,88	6,58	19,3
13	12,8	7,41	19,6
14	9,09	7,83	19,5
15	6,85	7,73	19,3
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,6

Tabella B.19: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la 2° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,65
2	4,22	2,05	19,8
3	6,69	2,17	19,55

4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	19,76
6	10,58	4,1	19,25
7	9,47	5,02	19,35
8	6,77	4,19	19,6
9	3,98	4,51	19,65
10	1,28	3,33	20,2
11	0,98	5,65	19,76
12	5,88	6,58	19,5
13	12,8	7,41	19,56
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	19,34
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,8

Tabella B.20: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la 2° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,97
2	4,22	2,05	20
3	6,69	2,17	19,58
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	19,63
6	10,58	4,1	19,27
7	9,47	5,02	19,47
8	6,77	4,19	19,5
9	3,98	4,51	19,77
10	1,28	3,33	20,65
11	0,98	5,65	20,12
12	5,88	6,58	19,7
13	12,8	7,41	19,53
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	19,36
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	20

Tabella B.21: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la 2° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,3

2	4,22	2,05	20,2
3	6,69	2,17	19,6
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	19,5
6	10,58	4,1	19,3
7	9,47	5,02	19,6
8	6,77	4,19	19,5
9	3,98	4,51	19,9
10	1,28	3,33	21,1
11	0,98	5,65	20,5
12	5,88	6,58	19,9
13	12,8	7,41	19,5
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	19,4
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	20,2

- FINESTRA APERTA: 3° SERIE

Tabella B.22: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 3° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	18,8
2	4,22	2,05	19,2
3	6,69	2,17	19,0
4	9,83	1,28	19,4
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	19,1
7	9,47	5,02	19,0
8	6,77	4,19	19,0
9	3,98	4,51	19,2
10	1,28	3,33	19,2
11	0,96	5,44	19,0
12	5,88	6,58	19,0
13	12,8	7,41	18,6
14	9,09	7,83	18,9
15	6,85	7,73	18,9
16	2,6	8,27	18,8
17	1,11	7,34	18,9

Tabella B.23: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la 3° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,6
2	4,22	2,05	20,1
3	6,69	2,17	20,0
4	9,54	1,07	20,2
5	12,92	1,4	20,7
6	10,58	4,1	20,0
7	9,47	5,02	18,6
8	6,77	4,19	19,8
9	3,98	4,51	19,9
10	1,28	3,33	19,9
11	0,98	5,65	19,8
12	5,88	6,58	19,8
13	12,8	7,41	19,6
14	9,09	7,83	19,5
15	6,85	7,73	19,6
16	2,6	8,27	19,9
17	1,11	7,34	19,8

Tabella B.24: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la 3° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21
2	4,22	2,05	20,5
3	6,69	2,17	20,4
4	9,54	1,07	20,7
5	12,92	1,4	20,4
6	10,58	4,1	20,2
7	9,47	5,02	20
8	6,77	4,19	20,2
9	3,98	4,51	20
10	1,28	3,33	19,9
11	0,98	5,65	20,00
12	5,88	6,58	20,1
13	12,8	7,41	20,1
14	9,09	7,83	20
15	6,85	7,73	19,9
16	2,6	8,27	20,1
17	1,11	7,34	20,1

Tabella B.25: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la 3° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,15
2	4,22	2,05	20,7
3	6,69	2,17	20,6
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	20,5
6	10,58	4,1	20,10
7	9,47	5,02	20,02
8	6,77	4,19	20,3
9	3,98	4,51	20,2
10	1,28	3,33	20,33
11	0,98	5,65	20,30
12	5,88	6,58	20,3
13	12,8	7,41	20,3
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	20,1
16	2,6	8,27	20,3
17	1,11	7,34	20,3

Tabella B.26: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la 3° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,6
2	4,22	2,05	20,76
3	6,69	2,17	20,50
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	20,4
6	10,58	4,1	19,9
7	9,47	5,02	20,05
8	6,77	4,19	20,26
9	3,98	4,51	20,36
10	1,28	3,33	20,75
11	0,98	5,65	20,68
12	5,88	6,58	20,33
13	12,8	7,41	20,20
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	20,17
16	2,6	8,27	20,43
17	1,11	7,34	20,60

Tabella B.27: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la 3° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,57
2	4,22	2,05	20,83
3	6,69	2,17	20,33
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	20,24
6	10,58	4,1	19,80
7	9,47	5,02	20,07
8	6,77	4,19	20,23
9	3,98	4,51	20,52
10	1,28	3,33	21,18
11	0,98	5,65	21,08
12	5,88	6,58	20,36
13	12,8	7,41	20,10
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	20,23
16	2,6	8,27	20,57
17	1,11	7,34	20,70

Tabella B.28: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la 3° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,8
2	4,22	2,05	20,9
3	6,69	2,17	20,2
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	20,1
6	10,58	4,1	19,7
7	9,47	5,02	20,1
8	6,77	4,19	20,2
9	3,98	4,51	20,7
10	1,28	3,33	21,6
11	0,98	5,65	21,0
12	5,88	6,58	20,4
13	12,8	7,41	20,0
14	9,09	7,83	20,0
15	6,85	7,73	20,3
16	2,6	8,27	20,7
17	1,11	7,34	20,8

- FINESTRA APERTA: 4° SERIE

Tabella B.29: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 4° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	19,3
2	4,22	2,05	18,8
3	6,69	2,17	18,4
4	9,83	1,28	18,8
5	12,92	1,4	18,9
6	10,58	4,1	18,4
7	9,47	5,02	18,3
8	6,77	4,19	18,5
9	3,98	4,51	18,7
10	1,28	3,33	18,8
11	0,96	5,44	18,6
12	5,88	6,58	18,5
13	12,8	7,41	18,1
14	9,09	7,83	18,3
15	6,85	7,73	18,5
16	2,6	8,27	18,2
17	1,11	7,34	18,6

Tabella B.30: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la 4° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,3
2	4,22	2,05	19,8
3	6,69	2,17	19,6
4	9,54	1,07	19,9
5	12,92	1,4	20,7
6	10,58	4,1	19,15
7	9,47	5,02	19,6
8	6,77	4,19	19,6
9	3,98	4,51	19,6
10	1,28	3,33	19,5
11	0,98	5,65	19,5
12	5,88	6,58	19,3
13	12,8	7,41	19,3
14	9,09	7,83	19,0

15	6,85	7,73	19,4
16	2,6	8,27	19,2
17	1,11	7,34	19,5

Tabella B.31: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la 4° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,5
2	4,22	2,05	20,1
3	6,69	2,17	19,9
4	9,54	1,07	20,3
5	12,92	1,4	20,5
6	10,58	4,1	19,9
7	9,47	5,02	19,7
8	6,77	4,19	19,9
9	3,98	4,51	19,78
10	1,28	3,33	19,8
11	0,98	5,65	19,7
12	5,88	6,58	19,7
13	12,8	7,41	19,7
14	9,09	7,83	19,7
15	6,85	7,73	19,6
16	2,6	8,27	19,5
17	1,11	7,34	19,7

Tabella B.32: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la 4° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,8
2	4,22	2,05	20,2
3	6,69	2,17	19,9
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	20,4
6	10,58	4,1	19,82
7	9,47	5,02	20
8	6,77	4,19	19,9
9	3,98	4,51	19,96
10	1,28	3,33	20,28
11	0,98	5,65	19,9
12	5,88	6,58	19,8

13	12,8	7,41	20,1
14	9,09	7,83	19,59
15	6,85	7,73	19,9
16	2,6	8,27	19,67
17	1,11	7,34	20,1

Tabella B.33: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la 4° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,03
2	4,22	2,05	20,30
3	6,69	2,17	20,00
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	20,20
6	10,58	4,1	19,75
7	9,47	5,02	19,80
8	6,77	4,19	19,95
9	3,98	4,51	20,14
10	1,28	3,33	20,75
11	0,98	5,65	20,30
12	5,88	6,58	19,86
13	12,8	7,41	19,96
14	9,09	7,83	19,55
15	6,85	7,73	19,96
16	2,6	8,27	19,85
17	1,11	7,34	20,20

Tabella B.34: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la 4° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,26
2	4,22	2,05	20,46
3	6,69	2,17	20,10
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	20,05
6	10,58	4,1	19,67
7	9,47	5,02	19,96
8	6,77	4,19	20,00
9	3,98	4,51	20,32
10	1,28	3,33	21,22

11	0,98	5,65	20,70
12	5,88	6,58	19,93
13	12,8	7,41	19,83
14	9,09	7,83	19,47
15	6,85	7,73	20,03
16	2,6	8,27	20,03
17	1,11	7,34	20,30

Tabella B.35: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la 4° serie a finestra aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	21,5
2	4,22	2,05	20,6
3	6,69	2,17	20,2
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	19,9
6	10,58	4,1	19,6
7	9,47	5,02	19,95
8	6,77	4,19	20,05
9	3,98	4,51	20,5
10	1,28	3,33	21,7
11	0,98	5,65	21,1
12	5,88	6,58	20
13	12,8	7,41	19,7
14	9,09	7,83	19,4
15	6,85	7,73	20,1
16	2,6	8,27	20,2
17	1,11	7,34	20,4

Sezioni verticali

- TUTTO CHIUSO

Tabella B.36: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	18,6	5,96	3	18,7
2,51	0,05	18,5	7,68	3	18,7
4,23	0,05	18,3	0,79	4	19,1
5,96	0,05	18,1	2,51	4	18,9
7,68	0,05	18	4,23	4	18,8

0,79	1	19,3	5,96	4	18,7
2,51	1	18,9	7,68	4	18,7
4,23	1	18,7	0,79	5	19
5,96	1	18,6	2,51	5	18,9
7,68	1	18,6	4,23	5	18,8
0,79	2	19,5	5,96	5	18,8
2,51	2	19,1	7,68	5	18,7
4,23	2	18,8	0,79	6,05	18,9
5,96	2	18,7	2,51	6,05	18,9
7,68	2	18,7	4,23	6,05	18,9
0,79	3	19,2	5,96	6,05	18,9
2,51	3	18,9	7,68	6,05	18,7
		4,23	3	18,8	

Tabella B.37 File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	18,5	5,92	3	18,8
2,47	0,05	18,3	7,65	3	18,7
4,19	0,05	18,2	0,75	4	19,1
5,92	0,05	18,1	2,47	4	18,9
7,65	0,05	18,1	4,19	4	18,8
0,75	1	19,1	5,92	4	18,7
2,47	1	18,9	7,65	4	18,7
4,19	1	18,8	0,75	5	19
5,92	1	18,6	2,47	5	18,8
7,65	1	18,6	4,19	5	18,7
0,75	2	19,3	5,92	5	18,7
2,47	2	19,1	7,65	5	18,7
4,19	2	18,9	0,75	6,05	18,9
5,92	2	18,8	2,47	6,05	18,8
7,65	2	18,7	4,19	6,05	18,7
0,75	3	19,2	5,92	6,05	18,7
2,47	3	19	7,65	6,05	18,7
		4,19	3	18,9	

Tabella B.38: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	18,4	5,89	3	18,7
2,44	0,05	18,1	7,61	3	18,6

4,16	0,05	18	0,71	4	19,1
5,89	0,05	18,1	2,44	4	18,9
7,61	0,05	18,1	4,16	4	18,8
0,71	1	19,1	5,89	4	18,7
2,44	1	18,8	7,61	4	18,7
4,16	1	18,8	0,71	5	19
5,89	1	18,6	2,44	5	18,9
7,61	1	18,5	4,16	5	18,8
0,71	2	19,1	5,89	5	18,7
2,44	2	18,9	7,61	5	18,7
4,16	2	18,9	0,71	6,05	19
5,89	2	18,7	2,44	6,05	18,9
7,61	2	18,6	4,16	6,05	18,8
0,71	3	19,2	5,89	6,05	18,7
2,44	3	19	7,61	6,05	18,7
		4,16	3	18,8	

Tabella B.39: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	18,6	5,85	3	18,6
2,4	0,05	18,3	7,85	3	18,6
4,12	0,05	18,1	0,68	4	19,2
5,85	0,05	18	2,4	4	19
7,85	0,05	18	4,12	4	18,7
0,68	1	19,2	5,85	4	18,7
2,4	1	18,9	7,85	4	18,7
4,12	1	18,6	0,68	5	19,1
5,85	1	18,5	2,4	5	18,9
7,85	1	18,4	4,12	5	18,7
0,68	2	19	5,85	5	18,6
2,4	2	19,4	7,85	5	18,7
4,12	2	18,7	0,68	6,05	19
5,85	2	18,7	2,4	6,05	18,9
7,85	2	18,7	4,12	6,05	18,6
0,68	3	19,3	5,85	6,05	18,6
2,4	3	19	7,85	6,05	18,7
		4,12	3	18,7	

Tabella B.40: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	18,6	5,87	3	18,9
2,42	0,05	18,4	7,59	3	18,9
4,14	0,05	18,1	0,7	4	19,1
5,87	0,05	17,9	2,42	4	19
7,59	0,05	17,9	4,14	4	18,9
0,7	1	19,7	5,87	4	18,8
2,42	1	19,4	7,59	4	18,8
4,14	1	18,9	0,7	5	19
5,87	1	18,7	2,42	5	18,9
7,59	1	18,6	4,14	5	18,8
0,7	2	19,7	5,87	5	18,7
2,42	2	19,3	7,59	5	18,7
4,14	2	19	0,7	6,05	19
5,87	2	18,8	2,42	6,05	18,9
7,59	2	18,7	4,14	6,05	18,8
0,7	3	19,5	5,87	6,05	18,7
2,42	3	19,1	7,59	6,05	18,7
	4,14	3	19		

Tabella B.41: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18	9,18	3	18,6
3,97	0,05	18,1	12,42	3	18,9
6,6	0,05	18,1	1,42	4	18,7
9,18	0,05	18	3,97	4	18,7
12,42	0,05	17,9	6,6	4	18,7
1,42	1	18,6	9,18	4	18,7
3,97	1	18,4	12,42	4	18,8
6,6	1	18,5	1,42	5	18,7
9,18	1	18,6	3,97	5	18,7
12,42	1	18,6	6,6	5	18,7
1,42	2	18,7	9,18	5	18,7
3,97	2	18,7	12,42	5	18,7
6,6	2	18,6	1,42	6,05	18,7
9,18	2	18,7	3,97	6,05	18,7
12,42	2	18,7	6,6	6,05	18,7
1,42	3	18,7	9,18	6,05	18,7

3,97	3	18,7	12,42	6,05	18,7
		6,6	3	18,6	

Tabella B.42: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,1	9,18	3	18,7
3,97	0,05	18,1	12,42	3	19
6,6	0,05	18,1	1,42	4	18,8
9,18	0,05	18	3,97	4	18,8
12,42	0,05	17,9	6,6	4	18,8
1,42	1	18,9	9,18	4	18,7
3,97	1	18,6	12,42	4	18,9
6,6	1	18,8	1,42	5	18,8
9,18	1	18,8	3,97	5	18,7
12,42	1	18,7	6,6	5	18,8
1,42	2	18,8	9,18	5	18,7
3,97	2	18,9	12,42	5	18,8
6,6	2	18,9	1,42	6,05	18,9
9,18	2	18,7	3,97	6,05	18,7
12,42	2	19	6,6	6,05	18,8
1,42	3	18,8	9,18	6,05	18,6
3,97	3	18,9	12,42	6,05	18,8
		6,6	3	18,8	

Tabella B.43: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la serie con tutti gli infissi chiusi.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,6	9,18	3	19,3
3,97	0,05	18,5	12,42	3	19,5
6,6	0,05	18,4	1,42	4	19,1
9,18	0,05	18,6	3,97	4	19,1
12,42	0,05	18,6	6,6	4	19,1
1,42	1	19,7	9,18	4	19,2
3,97	1	19,2	12,42	4	19,1
6,6	1	19,1	1,42	5	19
9,18	1	19,1	3,97	5	19
12,42	1	19,3	6,6	5	19
1,42	2	19,5	9,18	5	19,1
3,97	2	19,3	12,42	5	19

6,6	2	19,1	1,42	6,05	18,9
9,18	2	19,4	3,97	6,05	18,9
12,42	2	19,7	6,6	6,05	19
1,42	3	19,2	9,18	6,05	19
3,97	3	19,2	12,42	6,05	19
		6,6	3	19,2	

- FINESTRA APERTA: 1° SERIE

Tabella B.44: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	18,9	5,96	3	19,3
2,51	0,05	18,6	7,68	3	19,1
4,23	0,05	18,4	0,79	4	20,5
5,96	0,05	18,2	2,51	4	20,5
7,68	0,05	18,2	4,23	4	20,1
0,79	1	19,7	5,96	4	19,7
2,51	1	19,2	7,68	4	19,7
4,23	1	18,9	0,79	5	20,6
5,96	1	18,8	2,51	5	20,8
7,68	1	18,7	4,23	5	20,6
0,79	2	20,1	5,96	5	20,1
2,51	2	19,7	7,68	5	19,9
4,23	2	19,3	0,79	6,05	20,8
5,96	2	18,9	2,51	6,05	21,2
7,68	2	18,9	4,23	6,05	21
0,79	3	20,3	5,96	6,05	20,4
2,51	3	20,1	7,68	6,05	20,1
		4,23	3	19,6	

Tabella B.45 File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	18,6	5,92	3	19,2
2,47	0,05	18,5	7,65	3	19,1
4,19	0,05	18,4	0,75	4	19,7
5,92	0,05	18,2	2,47	4	19,6
7,65	0,05	18,2	4,19	4	19,6
0,75	1	19,3	5,92	4	19,6

2,47	1	19,1	7,65	4	19,6
4,19	1	18,9	0,75	5	19,8
5,92	1	18,8	2,47	5	19,8
7,65	1	18,8	4,19	5	19,9
0,75	2	19,6	5,92	5	19,9
2,47	2	19,4	7,65	5	19,8
4,19	2	19,3	0,75	6,05	19,8
5,92	2	19	2,47	6,05	19,8
7,65	2	18,9	4,19	6,05	20,2
0,75	3	19,7	5,92	6,05	20,1
2,47	3	19,5	7,65	6,05	20
		4,19	3	19,4	

Tabella B.46: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	18,3	5,89	3	19,2
2,44	0,05	18,1	7,61	3	19,1
4,16	0,05	18,1	0,71	4	19,5
5,89	0,05	18,1	2,44	4	19,6
7,61	0,05	18,1	4,16	4	19,6
0,71	1	19,1	5,89	4	19,6
2,44	1	18,9	7,61	4	19,6
4,16	1	18,8	0,71	5	19,5
5,89	1	18,8	2,44	5	19,6
7,61	1	18,8	4,16	5	19,8
0,71	2	19,3	5,89	5	19,8
2,44	2	19,2	7,61	5	19,7
4,16	2	19,1	0,71	6,05	19,6
5,89	2	19	2,44	6,05	19,8
7,61	2	18,9	4,16	6,05	20
0,71	3	19,6	5,89	6,05	20
2,44	3	19,5	7,61	6,05	19,9
		4,16	3	19,3	

Tabella B.47: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	18,5	5,85	3	19,2
2,4	0,05	18,3	7,85	3	19,1

4,12	0,05	18,1	0,68	4	19,3
5,85	0,05	18	2,4	4	19,2
7,85	0,05	18,1	4,12	4	19,3
0,68	1	19,2	5,85	4	19,3
2,4	1	19	7,85	4	19,4
4,12	1	18,9	0,68	5	19,4
5,85	1	18,8	2,4	5	19,5
7,85	1	18,8	4,12	5	19,5
0,68	2	19,3	5,85	5	19,6
2,4	2	19,1	7,85	5	19,5
4,12	2	19	0,68	6,05	19,5
5,85	2	19	2,4	6,05	19,6
7,85	2	18,9	4,12	6,05	19,7
0,68	3	19,4	5,85	6,05	19,7
2,4	3	19,3	7,85	6,05	19,7
		4,12	3	19,2	

Tabella B.48: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	18,5	5,87	3	19,1
2,42	0,05	18,3	7,59	3	19,1
4,14	0,05	18,2	0,7	4	19,3
5,87	0,05	18,1	2,42	4	19,2
7,59	0,05	18	4,14	4	19,2
0,7	1	19,1	5,87	4	19,3
2,42	1	19	7,59	4	19,4
4,14	1	18,9	0,7	5	19,1
5,87	1	18,8	2,42	5	19,1
7,59	1	18,8	4,14	5	19,1
0,7	2	19,2	5,87	5	19,2
2,42	2	19,1	7,59	5	19,2
4,14	2	19	0,7	6,05	19,3
5,87	2	19	2,42	6,05	19,2
7,59	2	18,9	4,14	6,05	19,2
0,7	3	19,2	5,87	6,05	19,3
2,42	3	19,1	7,59	6,05	19,4
		4,14	3	19,1	

Tabella B.49: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,2	9,18	3	19,1
3,97	0,05	18,2	12,42	3	19,1
6,6	0,05	18,1	1,42	4	19,7
9,18	0,05	18,1	3,97	4	19,6
12,42	0,05	18	6,6	4	19,6
1,42	1	18,7	9,18	4	19,5
3,97	1	18,8	12,42	4	19,5
6,6	1	18,8	1,42	5	19,8
9,18	1	18,8	3,97	5	19,7
12,42	1	18,8	6,6	5	19,6
1,42	2	18,9	9,18	5	19,4
3,97	2	18,9	12,42	5	19,2
6,6	2	18,9	1,42	6,05	20,1
9,18	2	18,9	3,97	6,05	20
12,42	2	18,9	6,6	6,05	19,9
1,42	3	19,1	9,18	6,05	19,7
3,97	3	19,1	12,42	6,05	19,4
		6,6	3	19,1	

Tabella B.50: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,4	9,18	3	19,2
3,97	0,05	18,4	12,42	3	19,1
6,6	0,05	18,1	1,42	4	20,1
9,18	0,05	18,1	3,97	4	19,6
12,42	0,05	18,2	6,6	4	19,6
1,42	1	19	9,18	4	19,3
3,97	1	18,9	12,42	4	19,2
6,6	1	18,8	1,42	5	20,6
9,18	1	18,9	3,97	5	19,9
12,42	1	18,9	6,6	5	19,8
1,42	2	19,3	9,18	5	19,4
3,97	2	19,3	12,42	5	19,2
6,6	2	19,1	1,42	6,05	21
9,18	2	19	3,97	6,05	20,2
12,42	2	19	6,6	6,05	20
1,42	3	19,6	9,18	6,05	19,7

3,97	3	19,4	12,42	6,05	19,2
		6,6	3	19,3	

Tabella B.51: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,8	9,18	3	19,4
3,97	0,05	18,6	12,42	3	19,2
6,6	0,05	18,3	1,42	4	20,5
9,18	0,05	18,5	3,97	4	19,7
12,42	0,05	18,5	6,6	4	19,4
1,42	1	19,7	9,18	4	19,3
3,97	1	19,3	12,42	4	19,2
6,6	1	19,1	1,42	5	20,6
9,18	1	19,2	3,97	5	19,8
12,42	1	19,1	6,6	5	19,5
1,42	2	20,1	9,18	5	19,3
3,97	2	19,6	12,42	5	19,1
6,6	2	19,3	1,42	6,05	20,8
9,18	2	19,3	3,97	6,05	19,8
12,42	2	19,1	6,6	6,05	19,7
1,42	3	20,3	9,18	6,05	19,5
3,97	3	19,7	12,42	6,05	19,3
		6,6	3	19,6	

- FINESTRA APERTA: 2° SERIE

Tabella B.52: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	18,8	5,96	3	19,5
2,51	0,05	18,8	7,68	3	19,6
4,23	0,05	18,6	0,79	4	20,6
5,96	0,05	18,3	2,51	4	20,3
7,68	0,05	18,2	4,23	4	20
0,79	1	19,7	5,96	4	19,8
2,51	1	19,3	7,68	4	19,8
4,23	1	18,8	0,79	5	20
5,96	1	18,5	2,51	5	20,1
7,68	1	18,7	4,23	5	20,4

0,79	2	20	5,96	5	20,1
2,51	2	19,5	7,68	5	20
4,23	2	19,3	0,79	6,05	21,2
5,96	2	19,3	2,51	6,05	21,1
7,68	2	19,3	4,23	6,05	20,8
0,79	3	20,3	5,96	6,05	20,4
2,51	3	19,9	7,68	6,05	20,2
		4,23	3	19,6	

Tabella B.53 File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	18,7	5,92	3	19,5
2,47	0,05	18,5	7,65	3	19,5
4,19	0,05	18,3	0,75	4	20,1
5,92	0,05	18,2	2,47	4	19,9
7,65	0,05	18,1	4,19	4	19,7
0,75	1	19,5	5,92	4	19,7
2,47	1	19,2	7,65	4	19,6
4,19	1	18,8	0,75	5	20,4
5,92	1	18,7	2,47	5	20,1
7,65	1	18,7	4,19	5	19
0,75	2	19,7	5,92	5	19,8
2,47	2	19,5	7,65	5	19,8
4,19	2	19,4	0,75	6,05	20,4
5,92	2	19,3	2,47	6,05	20,2
7,65	2	19,2	4,19	6,05	20
0,75	3	20	5,92	6,05	20
2,47	3	19,7	7,65	6,05	19,9
		4,19	3	19,6	

Tabella B.54: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	18,6	5,89	3	19,4
2,44	0,05	18,4	7,61	3	19,4
4,16	0,05	18,2	0,71	4	19,7
5,89	0,05	18,2	2,44	4	19,6
7,61	0,05	18,1	4,16	4	19,6
0,71	1	19,3	5,89	4	19,5

2,44	1	19	7,61	4	19,4
4,16	1	18,9	0,71	5	19,8
5,89	1	18,7	2,44	5	19,6
7,61	1	18,6	4,16	5	19,6
0,71	2	19,7	5,89	5	19,6
2,44	2	19,5	7,61	5	19,5
4,16	2	19,5	0,71	6,05	19,8
5,89	2	19,2	2,44	6,05	19,6
7,61	2	19	4,16	6,05	19,6
0,71	3	19,7	5,89	6,05	19,8
2,44	3	19,6	7,61	6,05	19,6
		4,16	3	19,6	

Tabella B.55: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	18,5	5,85	3	19,4
2,4	0,05	18,4	7,85	3	19,5
4,12	0,05	18,2	0,68	4	19,6
5,85	0,05	18,1	2,4	4	19,5
7,85	0,05	18	4,12	4	19,4
0,68	1	19,3	5,85	4	19,4
2,4	1	19,1	7,85	4	19,4
4,12	1	18,9	0,68	5	19,6
5,85	1	18,7	2,4	5	19,5
7,85	1	18,6	4,12	5	19,5
0,68	2	19,9	5,85	5	19,5
2,4	2	19,6	7,85	5	19,4
4,12	2	19,2	0,68	6,05	19,6
5,85	2	19,1	2,4	6,05	19,5
7,85	2	19,1	4,12	6,05	19,5
0,68	3	19,7	5,85	6,05	19,5
2,4	3	19,5	7,85	6,05	19,5
		4,12	3	19,3	

Tabella B.56: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	18,5	5,87	3	19,5
2,42	0,05	18,3	7,59	3	19,5

4,14	0,05	18,1	0,7	4	19,8
5,87	0,05	18	2,42	4	19,6
7,59	0,05	17,9	4,14	4	19,5
0,7	1	19,9	5,87	4	19,5
2,42	1	19,5	7,59	4	19,6
4,14	1	19,1	0,7	5	19,7
5,87	1	18,8	2,42	5	19,5
7,59	1	18,7	4,14	5	19,5
0,7	2	20,3	5,87	5	19,5
2,42	2	19,8	7,59	5	19,5
4,14	2	19,4	0,7	6,05	19,5
5,87	2	19,3	2,42	6,05	19,5
7,59	2	19,2	4,14	6,05	19,4
0,7	3	19,9	5,87	6,05	19,5
2,42	3	19,7	7,59	6,05	19,5
		4,14	3	19,4	

Tabella B.57: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,2	9,18	3	19,5
3,97	0,05	18,1	12,42	3	19,6
6,6	0,05	18,1	1,42	4	19,8
9,18	0,05	18	3,97	4	19,6
12,42	0,05	17,9	6,6	4	19,4
1,42	1	18,7	9,18	4	19,4
3,97	1	18,7	12,42	4	19,6
6,6	1	18,6	1,42	5	20
9,18	1	18,6	3,97	5	19,8
12,42	1	18,7	6,6	5	19,5
1,42	2	19,3	9,18	5	19,4
3,97	2	19,2	12,42	5	19,5
6,6	2	19	1,42	6,05	20,2
9,18	2	19,1	3,97	6,05	19,9
12,42	2	19,2	6,6	6,05	19,6
1,42	3	19,6	9,18	6,05	19,5
3,97	3	19,5	12,42	6,05	19,5
		6,6	3	19,4	

Tabella B.58: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,6	9,18	3	19,3
3,97	0,05	18,3	12,42	3	19,5
6,6	0,05	18,2	1,42	4	20
9,18	0,05	18,2	3,97	4	19,7
12,42	0,05	18,1	6,6	4	19,6
1,42	1	18,7	9,18	4	19,4
3,97	1	18,7	12,42	4	19,5
6,6	1	18,8	1,42	5	20,4
9,18	1	18,8	3,97	5	19,9
12,42	1	19,1	6,6	5	19,6
1,42	2	19,3	9,18	5	19,5
3,97	2	19,4	12,42	5	19,5
6,6	2	19,5	1,42	6,05	20,8
9,18	2	19,2	3,97	6,05	20
12,42	2	19,5	6,6	6,05	19,6
1,42	3	19,6	9,18	6,05	19,5
3,97	3	19,6	12,42	6,05	19,4
		6,6	3	19,6	

Tabella B.59: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,8	9,18	3	19,7
3,97	0,05	18,7	12,42	3	19,9
6,6	0,05	18,6	1,42	4	20,6
9,18	0,05	18,5	3,97	4	20
12,42	0,05	18,5	6,6	4	19,7
1,42	1	19,7	9,18	4	19,6
3,97	1	19,5	12,42	4	19,8
6,6	1	19,3	1,42	5	20,9
9,18	1	19,3	3,97	5	20,3
12,42	1	19,9	6,6	5	19,8
1,42	2	20	9,18	5	19,6
3,97	2	19,7	12,42	5	19,7
6,6	2	19,7	1,42	6,05	20,2
9,18	2	19,9	3,97	6,05	20,4
12,42	2	20,3	6,6	6,05	19,8
1,42	3	20,3	9,18	6,05	19,6

3,97	3	19,9	12,42	6,05	19,5
	6,6	3	19,7		

- FINESTRA APERTA: 3° SERIE

Tabella B.60: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	18,7	5,96	3	20,3
2,51	0,05	19	7,68	3	20,4
4,23	0,05	19,1	0,79	4	21,5
5,96	0,05	18,9	2,51	4	21
7,68	0,05	18,8	4,23	4	20,7
0,79	1	20,6	5,96	4	20,7
2,51	1	20,1	7,68	4	20,6
4,23	1	19,9	0,79	5	21,5
5,96	1	19,8	2,51	5	21,3
7,68	1	19,9	4,23	5	21,1
0,79	2	21	5,96	5	21
2,51	2	20,3	7,68	5	20,7
4,23	2	20	0,79	6,05	21,8
5,96	2	20,1	2,51	6,05	21,7
7,68	2	20,2	4,23	6,05	21,3
0,79	3	21,1	5,96	6,05	20,9
2,51	3	20,6	7,68	6,05	20,8
	4,23	3	20,3		

Tabella B.61 File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	19	5,92	3	20,3
2,47	0,05	19,1	7,65	3	20,3
4,19	0,05	19,1	0,75	4	21
5,92	0,05	19	2,47	4	20,7
7,65	0,05	18,8	4,19	4	20,4
0,75	1	20,3	5,92	4	20,4
2,47	1	20,1	7,65	4	20,4
4,19	1	19,9	0,75	5	21
5,92	1	19,9	2,47	5	20,8
7,65	1	19,9	4,19	5	20,6

0,75	2	20,7	5,92	5	20,6
2,47	2	20,4	7,65	5	20,5
4,19	2	20,1	0,75	6,05	21,2
5,92	2	20,1	2,47	6,05	21,1
7,65	2	20,1	4,19	6,05	20,8
0,75	3	20,9	5,92	6,05	20,7
2,47	3	20,6	7,65	6,05	20,6
		4,19	3	20,3	

Tabella B.62: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	19	5,89	3	20,3
2,44	0,05	18,7	7,61	3	20,2
4,16	0,05	19	0,71	4	20,6
5,89	0,05	18,9	2,44	4	20,5
7,61	0,05	18,8	4,16	4	20,3
0,71	1	20,2	5,89	4	20,3
2,44	1	20	7,61	4	20,3
4,16	1	19,8	0,71	5	20,5
5,89	1	19,7	2,44	5	20,4
7,61	1	19,7	4,16	5	20,3
0,71	2	20,6	5,89	5	20,3
2,44	2	20,4	7,61	5	20,3
4,16	2	20,2	0,71	6,05	20,4
5,89	2	20,1	2,44	6,05	20,3
7,61	2	20	4,16	6,05	20,3
0,71	3	20,8	5,89	6,05	20,4
2,44	3	20,6	7,61	6,05	20,4
		4,16	3	20,3	

Tabella B.63: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	19,3	5,85	3	20,1
2,4	0,05	19,1	7,85	3	20,1
4,12	0,05	19	0,68	4	20,5
5,85	0,05	18,9	2,4	4	20,2
7,85	0,05	18,8	4,12	4	20,1
0,68	1	20,2	5,85	4	20,1

2,4	1	19,7	7,85	4	20,2
4,12	1	19,1	0,68	5	20,3
5,85	1	19,1	2,4	5	20,1
7,85	1	19,6	4,12	5	20,1
0,68	2	20,7	5,85	5	20,2
2,4	2	20,4	7,85	5	20,2
4,12	2	20,1	0,68	6,05	20,1
5,85	2	20	2,4	6,05	20
7,85	2	20	4,12	6,05	20,1
0,68	3	20,6	5,85	6,05	20,1
2,4	3	20,4	7,85	6,05	20,1
		4,12	3	20,1	

Tabella B.64: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	19,2	5,87	3	20,3
2,42	0,05	19,1	7,59	3	20,3
4,14	0,05	18,9	0,7	4	20,4
5,87	0,05	18,7	2,42	4	20,2
7,59	0,05	18,6	4,14	4	20,1
0,7	1	20,7	5,87	4	20,2
2,42	1	20,4	7,59	4	20,2
4,14	1	20	0,7	5	20,3
5,87	1	19,7	2,42	5	20,1
7,59	1	19,6	4,14	5	20
0,7	2	20,6	5,87	5	20,1
2,42	2	20,4	7,59	5	20,2
4,14	2	20,2	0,7	6,05	20,1
5,87	2	20,2	2,42	6,05	20
7,59	2	20,1	4,14	6,05	19,9
0,7	3	20,5	5,87	6,05	20
2,42	3	20,4	7,59	6,05	20
		4,14	3	20,3	

Tabella B.65: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,8	9,18	3	20,1

3,97	0,05	18,8	12,42	3	20,3
6,6	0,05	18,8	1,42	4	20,6
9,18	0,05	18,8	3,97	4	20,4
12,42	0,05	18,6	6,6	4	20,3
1,42	1	19,9	9,18	4	20,2
3,97	1	19,9	12,42	4	20,2
6,6	1	19,7	1,42	5	20,7
9,18	1	19,6	3,97	5	20,5
12,42	1	19,6	6,6	5	20,3
1,42	2	20,2	9,18	5	20,2
3,97	2	20,1	12,42	5	20,2
6,6	2	20	1,42	6,05	20,8
9,18	2	20	3,97	6,05	20,6
12,42	2	20,1	6,6	6,05	20,4
1,42	3	20,4	9,18	6,05	20,1
3,97	3	20,3	12,42	6,05	20
		6,6	3	20,2	

Tabella B.66: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	19,1	9,18	3	20,1
3,97	0,05	19,1	12,42	3	20,3
6,6	0,05	19	1,42	4	20,7
9,18	0,05	19	3,97	4	20,4
12,42	0,05	18,9	6,6	4	20,3
1,42	1	19,9	9,18	4	20,1
3,97	1	19,9	12,42	4	20,1
6,6	1	19,8	1,42	5	21,1
9,18	1	19,1	3,97	5	20,6
12,42	1	20	6,6	5	20,3
1,42	2	20	9,18	5	20,1
3,97	2	20,1	12,42	5	20
6,6	2	20,2	1,42	6,05	21,3
9,18	2	20,1	3,97	6,05	20,8
12,42	2	20,2	6,6	6,05	20,3
1,42	3	20,3	9,18	6,05	20,1
3,97	3	20,3	12,42	6,05	19,9
		6,6	3	20,3	

Tabella B.67: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,7	9,18	3	20,6
3,97	0,05	19	12,42	3	20,5
6,6	0,05	19	1,42	4	21,5
9,18	0,05	19,3	3,97	4	21,1
12,42	0,05	19,2	6,6	4	20,7
1,42	1	20,6	9,18	4	20,5
3,97	1	20,3	12,42	4	20,4
6,6	1	20,2	1,42	5	21,5
9,18	1	20,2	3,97	5	21
12,42	1	20,7	6,6	5	20,5
1,42	2	21	9,18	5	20,3
3,97	2	20,7	12,42	5	20,3
6,6	2	20,6	1,42	6,05	21,8
9,18	2	20,7	3,97	6,05	21,2
12,42	2	20,5	6,6	6,05	20,4
1,42	3	21,1	9,18	6,05	20,1
3,97	3	20,9	12,42	6,05	20,1
		6,6	3	20,8	

- FINESTRA APERTA: 4° SERIE

Tabella B.68: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	19,3	5,96	3	20
2,51	0,05	19	7,68	3	20,1
4,23	0,05	18,8	0,79	4	21
5,96	0,05	18,6	2,51	4	20,8
7,68	0,05	18,6	4,23	4	20,6
0,79	1	20,2	5,96	4	20,3
2,51	1	19,8	7,68	4	20,2
4,23	1	19,6	0,79	5	21,2
5,96	1	19,5	2,51	5	21,2
7,68	1	19,4	4,23	5	21
0,79	2	20,5	5,96	5	20,6
2,51	2	20,1	7,68	5	20,3
4,23	2	19,8	0,79	6,05	21,6

5,96	2	19,7	2,51	6,05	21,4
7,68	2	19,7	4,23	6,05	21,2
0,79	3	20,8	5,96	6,05	20,9
2,51	3	20,5	7,68	6,05	20,4
		4,23	3	20,1	

Tabella B.69: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	19	5,92	3	19,9
2,47	0,05	18,8	7,65	3	19,8
4,19	0,05	18,8	0,75	4	20,5
5,92	0,05	18,6	2,47	4	20,4
7,65	0,05	18,4	4,19	4	20,2
0,75	1	20	5,92	4	20,1
2,47	1	19,8	7,65	4	19,9
4,19	1	19,7	0,75	5	20,7
5,92	1	19,4	2,47	5	20,6
7,65	1	19,3	4,19	5	20,4
0,75	2	20,3	5,92	5	20,2
2,47	2	20,1	7,65	5	20,1
4,19	2	19,8	0,75	6,05	20,8
5,92	2	19,7	2,47	6,05	20,7
7,65	2	19,6	4,19	6,05	20,6
0,75	3	20,4	5,92	6,05	20,4
2,47	3	20,2	7,65	6,05	20,2
		4,19	3	20	

Tabella B.70: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	18,7	5,89	3	19,9
2,44	0,05	18,5	7,61	3	19,9
4,16	0,05	18,6	0,71	4	20,2
5,89	0,05	18,5	2,44	4	20
7,61	0,05	18,5	4,16	4	20
0,71	1	19,8	5,89	4	19,9
2,44	1	19,7	7,61	4	19,8
4,16	1	19,6	0,71	5	20,3
5,89	1	19,4	2,44	5	20,1

7,61	1	19,4	4,16	5	20,1
0,71	2	20,1	5,89	5	20
2,44	2	20	7,61	5	20
4,16	2	19,9	0,71	6,05	20,4
5,89	2	19,8	2,44	6,05	20,2
7,61	2	19,6	4,16	6,05	20,1
0,71	3	20,1	5,89	6,05	20
2,44	3	20	7,61	6,05	20,1
		4,16	3	19,9	

Tabella B.71: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	18,8	5,85	3	19,9
2,4	0,05	18,6	7,85	3	19,7
4,12	0,05	18,4	0,68	4	20,1
5,85	0,05	18,3	2,4	4	20
7,85	0,05	18,4	4,12	4	19,9
0,68	1	19,9	5,85	4	19,8
2,4	1	19,6	7,85	4	19,6
4,12	1	19,6	0,68	5	20,1
5,85	1	19,4	2,4	5	20
7,85	1	19,1	4,12	5	20
0,68	2	20,3	5,85	5	19,7
2,4	2	20,1	7,85	5	19,6
4,12	2	19,8	0,68	6,05	20,1
5,85	2	19,8	2,4	6,05	20
7,85	2	19,7	4,12	6,05	20
0,68	3	20,1	5,85	6,05	19,8
2,4	3	20	7,85	6,05	19,5
		4,12	3	20	

Tabella B.72: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	18,9	5,87	3	20,1
2,42	0,05	18,7	7,59	3	20
4,14	0,05	18,4	0,7	4	20,2
5,87	0,05	18,2	2,42	4	20,1
7,59	0,05	18,2	4,14	4	19,9

0,7	1	20,6	5,87	4	19,9
2,42	1	20	7,59	4	19,9
4,14	1	19,6	0,7	5	20,1
5,87	1	19,4	2,42	5	19,9
7,59	1	19,3	4,14	5	19,8
0,7	2	20,5	5,87	5	19,8
2,42	2	20,3	7,59	5	19,8
4,14	2	20	0,7	6,05	20
5,87	2	19,8	2,42	6,05	19,8
7,59	2	19,7	4,14	6,05	19,7
0,7	3	20,4	5,87	6,05	19,7
2,42	3	20,2	7,59	6,05	19,7
		4,14	3	20,1	

Tabella B.73: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,6	9,18	3	19,7
3,97	0,05	18,4	12,42	3	20
6,6	0,05	18,5	1,42	4	20,2
9,18	0,05	18,4	3,97	4	19,9
12,42	0,05	18,2	6,6	4	19,8
1,42	1	19,4	9,18	4	19,6
3,97	1	19,3	12,42	4	19,9
6,6	1	19,4	1,42	5	20,3
9,18	1	19,1	3,97	5	20,1
12,42	1	19,3	6,6	5	20
1,42	2	19,7	9,18	5	19,6
3,97	2	19,6	12,42	5	19,8
6,6	2	19,6	1,42	6,05	20,4
9,18	2	19,7	3,97	6,05	20,2
12,42	2	19,7	6,6	6,05	20,1
1,42	3	20,1	9,18	6,05	19,5
3,97	3	19,8	12,42	6,05	19,7
		6,6	3	19,9	

Tabella B.74: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,8	9,18	3	20

3,97	0,05	18,8	12,42	3	20,1
6,6	0,05	18,6	1,42	4	20,6
9,18	0,05	18,4	3,97	4	20,2
12,42	0,05	18,4	6,6	4	20
1,42	1	19,6	9,18	4	20
3,97	1	19,7	12,42	4	20,1
6,6	1	19,6	1,42	5	21
9,18	1	19,6	3,97	5	20,4
12,42	1	19,6	6,6	5	20,1
1,42	2	19,8	9,18	5	20
3,97	2	19,8	12,42	5	19,8
6,6	2	19,9	1,42	6,05	21,4
9,18	2	19,8	3,97	6,05	20,6
12,42	2	20	6,6	6,05	20,1
1,42	3	20,1	9,18	6,05	20
3,97	3	20	12,42	6,05	19,8
		6,6	3	19,9	

Tabella B.75: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 4° serie a finestra aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	19,3	9,18	3	20,1
3,97	0,05	19	12,42	3	20,4
6,6	0,05	18,7	1,42	4	21
9,18	0,05	18,8	3,97	4	20,6
12,42	0,05	18,9	6,6	4	20,2
1,42	1	20,2	9,18	4	20,1
3,97	1	20	12,42	4	20,2
6,6	1	19,8	1,42	5	21,2
9,18	1	19,9	3,97	5	20,7
12,42	1	20,6	6,6	5	20,3
1,42	2	20,5	9,18	5	20,1
3,97	2	20,3	12,42	5	20,1
6,6	2	20,1	1,42	6,05	21,5
9,18	2	20,3	3,97	6,05	20,6
12,42	2	20,5	6,6	6,05	20,4
1,42	3	20,7	9,18	6,05	20,1
3,97	3	20,4	12,42	6,05	20
		6,6	3	20,1	

- MONITORAGGIO DI FLUSSI DI ARIA FREDDA

Sezioni orizzontali

- PORTA APERTA: 1° SERIE

Tabella B.76: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 1° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	19,3
2	4,22	2,05	19,2
3	6,69	2,17	18,9
4	9,83	1,28	19,4
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	18,2
7	9,47	5,02	18,4
8	6,77	4,19	19,1
9	3,98	4,51	19,1
10	1,28	3,33	19,3
11	0,96	5,44	18,9
12	5,88	6,58	19,2
13	12,8	7,41	18,2
14	9,09	7,83	18,3
15	6,85	7,73	18,3
16	2,6	8,27	18,9
17	1,11	7,34	18,8

Tabella B.77: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la 1° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,6
2	4,22	2,05	19,5
3	6,69	2,17	19,3
4	9,54	1,07	19,8
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	19,0
7	9,47	5,02	18,53
8	6,77	4,19	19,7
9	3,98	4,51	19,6
10	1,28	3,33	19,2
11	0,98	5,65	19,3
12	5,88	6,58	18,21

13	12,8	7,41	18,7
14	9,09	7,83	18,46
15	6,85	7,73	18,48
16	2,6	8,27	19,5
17	1,11	7,34	19,4

Tabella B.78: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la 1° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,6
2	4,22	2,05	19,3
3	6,69	2,17	19,2
4	9,54	1,07	19,6
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	19,15
7	9,47	5,02	18,66
8	6,77	4,19	19,4
9	3,98	4,51	19,2
10	1,28	3,33	19,1
11	0,98	5,65	19,1
12	5,88	6,58	18,27
13	12,8	7,41	19,00
14	9,09	7,83	18,63
15	6,85	7,73	18,66
16	2,6	8,27	19,46
17	1,11	7,34	19,3

Tabella B.79: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la 1° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,7
2	4,22	2,05	19,4
3	6,69	2,17	19,3
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	19,3
7	9,47	5,02	18,8
8	6,77	4,19	19,6
9	3,98	4,51	19,4
10	1,28	3,33	19,23
11	0,98	5,65	19,2

12	5,88	6,58	18,33
13	12,8	7,41	19,3
14	9,09	7,83	18,79
15	6,85	7,73	18,85
16	2,6	8,27	19,42
17	1,11	7,34	19,5

Tabella B.80: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la 1° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,76
2	4,22	2,05	19,50
3	6,69	2,17	19,40
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	
7	9,47	5,02	19,00
8	6,77	4,19	19,50
9	3,98	4,51	19,46
10	1,28	3,33	19,35
11	0,98	5,65	19,30
12	5,88	6,58	18,39
13	12,8	7,41	19,30
14	9,09	7,83	18,96
15	6,85	7,73	19,03
16	2,6	8,27	19,38
17	1,11	7,34	19,46

Tabella B.81: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la 1° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,83
2	4,22	2,05	19,60
3	6,69	2,17	19,50
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	
7	9,47	5,02	19,20
8	6,77	4,19	19,40
9	3,98	4,51	19,53
10	1,28	3,33	19,47

11	0,98	5,65	19,40
12	5,88	6,58	18,46
13	12,8	7,41	19,30
14	9,09	7,83	19,13
15	6,85	7,73	19,20
16	2,6	8,27	19,34
17	1,11	7,34	19,43

Tabella B.82: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la 1° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,9
2	4,22	2,05	19,7
3	6,69	2,17	19,6
4	9,54	1,07	
5	12,92	1,4	
6	10,58	4,1	
7	9,47	5,02	19,4
8	6,77	4,19	19,3
9	3,98	4,51	19,6
10	1,28	3,33	19,6
11	0,98	5,65	19,5
12	5,88	6,58	19,3
13	12,8	7,41	19,3
14	9,09	7,83	19,3
15	6,85	7,73	19,4
16	2,6	8,27	19,3
17	1,11	7,34	19,4

- PORTA APERTA: 2° SERIE

Tabella B.83: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 2° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	18,8
2	4,22	2,05	18,6
3	6,69	2,17	18,4
4	9,83	1,28	18,7
5	12,92	1,4	18,6
6	10,58	4,1	18,3

7	9,47	5,02	18,2
8	6,77	4,19	18,5
9	3,98	4,51	18,4
10	1,28	3,33	18,6
11	0,96	5,44	18,2
12	5,88	6,58	18,4
13	12,8	7,41	18,3
14	9,09	7,83	18,2
15	6,85	7,73	18,3
16	2,6	8,27	18,1
17	1,11	7,34	18,1

Tabella B.84: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la 2° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,3
2	4,22	2,05	19,1
3	6,69	2,17	19,0
4	9,54	1,07	19,2
5	12,92	1,4	19,6
6	10,58	4,1	18,9
7	9,47	5,02	18,9
8	6,77	4,19	18,9
9	3,98	4,51	18,9
10	1,28	3,33	19,0
11	0,98	5,65	18,8
12	5,88	6,58	18,55
13	12,8	7,41	18,8
14	9,09	7,83	18,50
15	6,85	7,73	18,48
16	2,6	8,27	18,6
17	1,11	7,34	19,0

Tabella B.85: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la 2° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,4
2	4,22	2,05	19,2
3	6,69	2,17	19,2
4	9,54	1,07	19,24
5	12,92	1,4	19,5

6	10,58	4,1	19,1
7	9,47	5,02	18,8
8	6,77	4,19	19,2
9	3,98	4,51	19,1
10	1,28	3,33	19,0
11	0,98	5,65	19,0
12	5,88	6,58	18,70
13	12,8	7,41	18,95
14	9,09	7,83	18,8
15	6,85	7,73	18,66
16	2,6	8,27	18,9
17	1,11	7,34	19,2

Tabella B.86: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la 2° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,5
2	4,22	2,05	19,33
3	6,69	2,17	18,9
4	9,54	1,07	19,28
5	12,92	1,4	19,5
6	10,58	4,1	19,2
7	9,47	5,02	19,1
8	6,77	4,19	19,22
9	3,98	4,51	19,20
10	1,28	3,33	19,15
11	0,98	5,65	19,0
12	5,88	6,58	18,85
13	12,8	7,41	19,1
14	9,09	7,83	19,1
15	6,85	7,73	18,85
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,1

Tabella B.87 File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la 2° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,53
2	4,22	2,05	19,45
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,32

5	12,92	1,4	19,46
6	10,58	4,1	19,23
7	9,47	5,02	19,23
8	6,77	4,19	19,25
9	3,98	4,51	19,30
10	1,28	3,33	19,30
11	0,98	5,65	19,13
12	5,88	6,58	19,00
13	12,8	7,41	19,17
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	19,03
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,17

Tabella B.88: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la 2° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,56
2	4,22	2,05	19,58
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,36
5	12,92	1,4	19,43
6	10,58	4,1	19,26
7	9,47	5,02	19,36
8	6,77	4,19	19,27
9	3,98	4,51	19,40
10	1,28	3,33	19,45
11	0,98	5,65	19,26
12	5,88	6,58	19,15
13	12,8	7,41	19,23
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	19,22
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,23

Tabella B.89: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la 2° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	19,7
2	4,22	2,05	19,7

3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	19,4
5	12,92	1,4	19,4
6	10,58	4,1	19,3
7	9,47	5,02	19,5
8	6,77	4,19	19,3
9	3,98	4,51	19,5
10	1,28	3,33	19,6
11	0,98	5,65	19,4
12	5,88	6,58	19,3
13	12,8	7,41	19,3
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	19,4
16	2,6	8,27	
17	1,11	7,34	19,3

- PORTA APERTA: 3° SERIE

Tabella B.90: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del pavimento per la 3° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,01	0,96	19,7
2	4,22	2,05	19,3
3	6,69	2,17	19,2
4	9,83	1,28	19,7
5	12,92	1,4	19,2
6	10,58	4,1	19,1
7	9,47	5,02	19,1
8	6,77	4,19	19,1
9	3,98	4,51	19,1
10	1,28	3,33	19,6
11	0,96	5,44	
12	5,88	6,58	19,2
13	12,8	7,41	18,8
14	9,09	7,83	19,0
15	6,85	7,73	19,1
16	2,6	8,27	19,1
17	1,11	7,34	18,8

Tabella B.91: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 1 m per la 3° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,1
2	4,22	2,05	19,8
3	6,69	2,17	19,3
4	9,54	1,07	20,1
5	12,92	1,4	20,3
6	10,58	4,1	19,6
7	9,47	5,02	19,20
8	6,77	4,19	19,8
9	3,98	4,51	19,5
10	1,28	3,33	19,8
11	0,98	5,65	
12	5,88	6,58	19,6
13	12,8	7,41	19,3
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	19,5
17	1,11	7,34	19,7

Tabella B.92: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 2 m per la 3° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,2
2	4,22	2,05	19,8
3	6,69	2,17	19,9
4	9,54	1,07	20,1
5	12,92	1,4	19,7
6	10,58	4,1	19,60
7	9,47	5,02	19,30
8	6,77	4,19	19,6
9	3,98	4,51	19,6
10	1,28	3,33	19,6
11	0,98	5,65	19,5
12	5,88	6,58	19,62
13	12,8	7,41	19,45
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	19,4
17	1,11	7,34	19,7

Tabella B.93: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 3 m per la 3° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,2
2	4,22	2,05	19,9
3	6,69	2,17	19,5
4	9,54	1,07	20,07
5	12,92	1,4	19,8
6	10,58	4,1	19,50
7	9,47	5,02	19,40
8	6,77	4,19	19,5
9	3,98	4,51	19,6
10	1,28	3,33	19,65
11	0,98	5,65	19,6
12	5,88	6,58	19,64
13	12,8	7,41	19,6
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	19,6
17	1,11	7,34	19,7

Tabella B.94 File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 4 m per la 3° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,26
2	4,22	2,05	19,90
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	20,05
5	12,92	1,4	19,76
6	10,58	4,1	19,50
7	9,47	5,02	19,50
8	6,77	4,19	
9	3,98	4,51	19,66
10	1,28	3,33	19,70
11	0,98	5,65	19,66
12	5,88	6,58	19,66
13	12,8	7,41	19,56
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	19,60
17	1,11	7,34	19,66

Tabella B.95: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota di 5 m per la 3° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,33
2	4,22	2,05	19,90
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	20,02
5	12,92	1,4	19,73
6	10,58	4,1	19,60
7	9,47	5,02	19,70
8	6,77	4,19	
9	3,98	4,51	19,73
10	1,28	3,33	19,75
11	0,98	5,65	19,73
12	5,88	6,58	19,68
13	12,8	7,41	19,53
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	19,60
17	1,11	7,34	19,63

Tabella B.96: File di input contenente le coordinate delle 17 strisce di carta rispetto all'angolo sud del salone 1F9 e le temperature presenti alla quota del soffitto per la 3° serie a porta aperta.

Strisce	x	y	T (°C)
1	1,02	0,84	20,0
2	4,22	2,05	19,9
3	6,69	2,17	
4	9,54	1,07	20,0
5	12,92	1,4	19,7
6	10,58	4,1	19,6
7	9,47	5,02	19,7
8	6,77	4,19	
9	3,98	4,51	19,8
10	1,28	3,33	19,8
11	0,98	5,65	19,8
12	5,88	6,58	19,7
13	12,8	7,41	19,5
14	9,09	7,83	
15	6,85	7,73	
16	2,6	8,27	19,6
17	1,11	7,34	19,6

Sezioni verticali**- PORTA APERTA: 1° SERIE**

Tabella B.97: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	19,3	5,96	3	19,3
2,51	0,05	19,3	7,68	3	19,5
4,23	0,05	19,1	0,79	4	19,8
5,96	0,05	18,9	2,51	4	19,5
7,68	0,05	18,9	4,23	4	19,4
0,79	1	19,6	5,96	4	19,4
2,51	1	19,4	7,68	4	19,5
4,23	1	19,3	0,79	5	19,8
5,96	1	19,3	2,51	5	19,6
7,68	1	19,4	4,23	5	19,5
0,79	2	19,6	5,96	5	19,4
2,51	2	19,3	7,68	5	19,5
4,23	2	19,2	0,79	6,05	19,9
5,96	2	19,2	2,51	6,05	19,7
7,68	2	19,4	4,23	6,05	19,6
0,79	3	19,7	5,96	6,05	19,5
2,51	3	19,4	7,68	6,05	19,4
		4,23	3	19,3	

Tabella B.98: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	19,3	5,92	3	19,1
2,47	0,05	19,2	7,65	3	19,1
4,19	0,05	19,2	0,75	4	19,6
5,92	0,05	19,1	2,47	4	19,5
7,65	0,05	19	4,19	4	19,5
0,75	1	19,5	5,92	4	19,2
2,47	1	19,4	7,65	4	19,2
4,19	1	19,5	0,75	5	19,7
5,92	1	19,2	2,47	5	19,6
7,65	1	19,1	4,19	5	19,6
0,75	2	19,5	5,92	5	19,2
2,47	2	19,3	7,65	5	19,2

4,19	2	19,3	0,75	6,05	19,8
5,92	2	19	2,47	6,05	19,7
7,65	2	19,1	4,19	6,05	19,7
0,75	3	19,5	5,92	6,05	19,5
2,47	3	19,5	7,65	6,05	19,4
		4,19	3	19,4	

Tabella B.99: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	19,1	5,89	3	18,7
2,44	0,05	19	7,61	3	18,8
4,16	0,05	19,1	0,71	4	19,5
5,89	0,05	19	2,44	4	19,5
7,61	0,05	18,5	4,16	4	19,4
0,71	1	19,4	5,89	4	18,8
2,44	1	19,4	7,61	4	19
4,16	1	19,5	0,71	5	19,6
5,89	1	18,6	2,44	5	19,5
7,61	1	18,5	4,16	5	19,3
0,71	2	19,4	5,89	5	18,8
2,44	2	19,3	7,61	5	19,1
4,16	2	19,3	0,71	6,05	19,7
5,89	2	18,6	2,44	6,05	19,6
7,61	2	18,7	4,16	6,05	19,4
0,71	3	19,4	5,89	6,05	19,4
2,44	3	19,4	7,61	6,05	19,4
		4,16	3	19,5	

Tabella B.100: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	19,2	5,85	3	18,9
2,4	0,05	18,9	7,85	3	18,9
4,12	0,05	18,6	0,68	4	19,4
5,85	0,05	18,4	2,4	4	19,3
7,85	0,05	18,3	4,12	4	19,1
0,68	1	19,8	5,85	4	19
2,4	1	19,4	7,85	4	19
4,12	1	18,8	0,68	5	19,5

5,85	1	18,6	2,4	5	19,4
7,85	1	18,5	4,12	5	19,3
0,68	2	19,7	5,85	5	19,2
2,4	2	19,3	7,85	5	19,2
4,12	2	18,9	0,68	6,05	19,6
5,85	2	18,7	2,4	6,05	19,5
7,85	2	18,7	4,12	6,05	19,4
0,68	3	19,4	5,85	6,05	19,4
2,4	3	19,3	7,85	6,05	19,3
		4,12	3	19	

Tabella B.101: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	19	5,87	3	19,3
2,42	0,05	18,6	7,59	3	19,2
4,14	0,05	18,3	0,7	4	19,4
5,87	0,05	18,3	2,42	4	19,3
7,59	0,05	18,2	4,14	4	19,3
0,7	1	19,5	5,87	4	19,3
2,42	1	19,3	7,59	4	19,3
4,14	1	19	0,7	5	19,5
5,87	1	18,8	2,42	5	19,4
7,59	1	18,7	4,14	5	19,4
0,7	2	19,5	5,87	5	19,3
2,42	2	19,4	7,59	5	19,3
4,14	2	19,2	0,7	6,05	19,6
5,87	2	19	2,42	6,05	19,5
7,59	2	19	4,14	6,05	19,4
0,7	3	19,5	5,87	6,05	19,4
2,42	3	19,4	7,59	6,05	19,3
		4,14	3	19,3	

Tabella B.102: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,9	9,18	3	18,7
3,97	0,05	19	12,42	3	19
6,6	0,05	18,5	1,42	4	19,5
9,18	0,05	18,3	3,97	4	19,1

12,42	0,05	18,2	6,6	4	18,8
1,42	1	19,4	9,18	4	18,9
3,97	1	19,1	12,42	4	19,2
6,6	1	18,5	1,42	5	19,5
9,18	1	18,5	3,97	5	19,2
12,42	1	18,7	6,6	5	19,1
1,42	2	19,6	9,18	5	19,2
3,97	2	19,6	12,42	5	19,3
6,6	2	19,5	1,42	6,05	19,4
9,18	2	19,7	3,97	6,05	19,4
12,42	2	19,5	6,6	6,05	19,4
1,42	3	19,3	9,18	6,05	19,3
3,97	3	19,1	12,42	6,05	19,3
		6,6	3	18,7	

Tabella B.103: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	19,1	9,18	3	19
3,97	0,05	19,2	12,42	3	19,3
6,6	0,05	19,2	1,42	4	19,4
9,18	0,05	18,6	3,97	4	19,5
12,42	0,05	18,6	6,6	4	19,4
1,42	1	19,3	9,18	4	19,1
3,97	1	19,5	12,42	4	19,3
6,6	1	19,5	1,42	5	19,5
9,18	1	18,8	3,97	5	19,6
12,42	1	18,9	6,6	5	19,4
1,42	2	19,2	9,18	5	19,3
3,97	2	19,3	12,42	5	19,4
6,6	2	19,3	1,42	6,05	19,6
9,18	2	18,9	3,97	6,05	19,7
12,42	2	19,2	6,6	6,05	19,4
1,42	3	19,3	9,18	6,05	19,4
3,97	3	19,4	12,42	6,05	19,4
		6,6	3	19,5	

Tabella B.104: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 1° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	19,3	9,18	3	19,4
3,97	0,05	19,3	12,42	3	19,5
6,6	0,05	19,1	1,42	4	19,8
9,18	0,05	19,3	3,97	4	19,6
12,42	0,05	19	6,6	4	19,5
1,42	1	19,6	9,18	4	19,4
3,97	1	19,6	12,42	4	19,4
6,6	1	19,5	1,42	5	19,8
9,18	1	19,8	3,97	5	19,7
12,42	1	19,5	6,6	5	19,6
1,42	2	19,6	9,18	5	19,5
3,97	2	19,5	12,42	5	19,5
6,6	2	19,4	1,42	6,05	19,9
9,18	2	19,6	3,97	6,05	19,8
12,42	2	19,5	6,6	6,05	19,7
1,42	3	19,7	9,18	6,05	19,6
3,97	3	19,5	12,42	6,05	19,6
		6,6	3	19,4	

- PORTA APERTA: 2° SERIE

Tabella B.105: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	18,8	5,96	3	19,1
2,51	0,05	18,7	7,68	3	19,1
4,23	0,05	18,4	0,79	4	19,6
5,96	0,05	18,2	2,51	4	19,4
7,68	0,05	18,1	4,23	4	19,3
0,79	1	19,3	5,96	4	19,2
2,51	1	19,1	7,68	4	19,2
4,23	1	19	0,79	5	19,6
5,96	1	18,9	2,51	5	19,5
7,68	1	18,9	4,23	5	19,4
0,79	2	19,4	5,96	5	19,3
2,51	2	19,2	7,68	5	19,3
4,23	2	19,1	0,79	6,05	19,7

5,96	2	19,1	2,51	6,05	19,6
7,68	2	19,1	4,23	6,05	19,5
0,79	3	19,5	5,96	6,05	19,3
2,51	3	19,3	7,68	6,05	19,2
		4,23	3	19,1	

Tabella B.106: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	18,7	5,92	3	19,1
2,47	0,05	18,6	7,65	3	19
4,19	0,05	18,5	0,75	4	19,5
5,92	0,05	18,3	2,47	4	19,5
7,65	0,05	18,2	4,19	4	19,4
0,75	1	19,2	5,92	4	19,2
2,47	1	19,1	7,65	4	19,1
4,19	1	18,9	0,75	5	19,6
5,92	1	18,7	2,47	5	19,6
7,65	1	18,6	4,19	5	19,5
0,75	2	19,3	5,92	5	19,3
2,47	2	19,2	7,65	5	19,2
4,19	2	19,2	0,75	6,05	19,6
5,92	2	19	2,47	6,05	19,6
7,65	2	18,9	4,19	6,05	19,5
0,75	3	19,4	5,92	6,05	19,3
2,47	3	19,3	7,65	6,05	19,3
		4,19	3	19,3	

Tabella B.107: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	18,7	5,89	3	19
2,44	0,05	18,5	7,61	3	18,9
4,16	0,05	18,5	0,71	4	19,5
5,89	0,05	18,4	2,44	4	19,4
7,61	0,05	18,3	4,16	4	19,3
0,71	1	19,1	5,89	4	19,1
2,44	1	19	7,61	4	19,1
4,16	1	18,9	0,71	5	19,5
5,89	1	18,7	2,44	5	19,4

7,61	1	18,5	4,16	5	19,3
0,71	2	19,3	5,89	5	19,2
2,44	2	19,2	7,61	5	19,3
4,16	2	19,2	0,71	6,05	19,5
5,89	2	18,8	2,44	6,05	19,4
7,61	2	18,7	4,16	6,05	19,3
0,71	3	19,1	5,89	6,05	19,3
2,44	3	19,1	7,61	6,05	19,3
		4,16	3	19,2	

Tabella B.108: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	18,7	5,85	3	19,1
2,4	0,05	18,5	7,85	3	19,1
4,12	0,05	18,3	0,68	4	19,4
5,85	0,05	18,3	2,4	4	19,3
7,85	0,05	18,3	4,12	4	19,3
0,68	1	19,2	5,85	4	19,2
2,4	1	19,1	7,85	4	19,1
4,12	1	18,9	0,68	5	19,4
5,85	1	18,7	2,4	5	19,4
7,85	1	18,5	4,12	5	19,4
0,68	2	19,3	5,85	5	19,3
2,4	2	19,2	7,85	5	19,3
4,12	2	19	0,68	6,05	19,4
5,85	2	18,8	2,4	6,05	19,3
7,85	2	18,8	4,12	6,05	19,4
0,68	3	19,3	5,85	6,05	19,4
2,4	3	19,2	7,85	6,05	19,3
		4,12	3	19,2	

Tabella B.109: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	18,7	5,87	3	19,2
2,42	0,05	18,5	7,59	3	19,1
4,14	0,05	18,4	0,7	4	19,5
5,87	0,05	18,3	2,42	4	19,4
7,59	0,05	18,3	4,14	4	19,3

0,7	1	19,7	5,87	4	19,2
2,42	1	19,3	7,59	4	19,2
4,14	1	19,1	0,7	5	19,5
5,87	1	18,9	2,42	5	19,4
7,59	1	18,8	4,14	5	19,3
0,7	2	19,5	5,87	5	19,3
2,42	2	19,4	7,59	5	19,3
4,14	2	19,2	0,7	6,05	19,3
5,87	2	19	2,42	6,05	19,3
7,59	2	19	4,14	6,05	19,3
0,7	3	19,5	5,87	6,05	19,3
2,42	3	19,4	7,59	6,05	19,3
		4,14	3	19,3	

Tabella B.110: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,1	9,18	3	19,1
3,97	0,05	18,2	12,42	3	19,1
6,6	0,05	18,3	1,42	4	19,2
9,18	0,05	18,3	3,97	4	19,1
12,42	0,05	18,3	6,6	4	19,1
1,42	1	18,9	9,18	4	19,1
3,97	1	18,6	12,42	4	19,2
6,6	1	18,5	1,42	5	19,3
9,18	1	18,5	3,97	5	19,2
12,42	1	18,8	6,6	5	19,3
1,42	2	19,1	9,18	5	19,3
3,97	2	18,9	12,42	5	19,3
6,6	2	18,7	1,42	6,05	19,2
9,18	2	18,8	3,97	6,05	19,3
12,42	2	19	6,6	6,05	19,3
1,42	3	19,1	9,18	6,05	19,3
3,97	3	19	12,42	6,05	19,3
		6,6	3	18,9	

Tabella B.111: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,4	9,18	3	19,1

3,97	0,05	18,5	12,42	3	19,3
6,6	0,05	18,5	1,42	4	19,3
9,18	0,05	18,3	3,97	4	19,4
12,42	0,05	18,4	6,6	4	19,3
1,42	1	19	9,18	4	19,3
3,97	1	18,9	12,42	4	19,3
6,6	1	18,9	1,42	5	19,4
9,18	1	18,9	3,97	5	19,5
12,42	1	19,1	6,6	5	19,3
1,42	2	19,1	9,18	5	19,4
3,97	2	19,2	12,42	5	19,3
6,6	2	19,2	1,42	6,05	19,5
9,18	2	19	3,97	6,05	19,5
12,42	2	19,2	6,6	6,05	19,3
1,42	3	19,1	9,18	6,05	19,4
3,97	3	19,3	12,42	6,05	19,3
		6,6	3	19,1	

Tabella B.112: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 2° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,8	9,18	3	19,3
3,97	0,05	18,7	12,42	3	19,5
6,6	0,05	18,6	1,42	4	19,6
9,18	0,05	18,7	3,97	4	19,5
12,42	0,05	18,7	6,6	4	19,5
1,42	1	19,3	9,18	4	19,4
3,97	1	19,2	12,42	4	19,5
6,6	1	19,1	1,42	5	19,6
9,18	1	19,2	3,97	5	19,6
12,42	1	19,6	6,6	5	19,5
1,42	2	19,4	9,18	5	19,4
3,97	2	19,3	12,42	5	19,5
6,6	2	19,3	1,42	6,05	19,7
9,18	2	19,3	3,97	6,05	19,6
12,42	2	19,5	6,6	6,05	19,5
1,42	3	19,5	9,18	6,05	19,4
3,97	3	19,4	12,42	6,05	19,3
		6,6	3	19,1	

- PORTA APERTA: 3° SERIE

Tabella B.113: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione A-A' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,79	0,05	19,7	5,96	3	19,7
2,51	0,05	19,7	7,68	3	19,7
4,23	0,05	19,4	0,79	4	20,2
5,96	0,05	19,1	2,51	4	19,9
7,68	0,05	18,9	4,23	4	19,7
0,79	1	20,1	5,96	4	19,7
2,51	1	19,9	7,68	4	19,7
4,23	1	19,8	0,79	5	20,3
5,96	1	19,7	2,51	5	20
7,68	1	19,7	4,23	5	19,8
0,79	2	20,2	5,96	5	19,7
2,51	2	19,8	7,68	5	19,7
4,23	2	19,6	0,79	6,05	20
5,96	2	19,6	2,51	6,05	19,9
7,68	2	19,7	4,23	6,05	19,8
0,79	3	20,2	5,96	6,05	19,8
2,51	3	19,9	7,68	6,05	19,6
		4,23	3		19,7

Tabella B.144: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione B-B' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,75	0,05	19,5	5,92	3	19,7
2,47	0,05	19,3	7,65	3	19,6
4,19	0,05	19,2	0,75	4	20,1
5,92	0,05	19,2	2,47	4	19,9
7,65	0,05	19,2	4,19	4	19,7
0,75	1	19,9	5,92	4	19,7
2,47	1	19,7	7,65	4	19,7
4,19	1	19,6	0,75	5	20,1
5,92	1	19,6	2,47	5	19,9
7,65	1	19,6	4,19	5	19,8
0,75	2	20	5,92	5	19,7
2,47	2	19,8	7,65	5	19,7
4,19	2	19,7	0,75	6,05	20

5,92	2	19,6	2,47	6,05	19,9
7,65	2	19,5	4,19	6,05	19,8
0,75	3	20	5,92	6,05	19,7
2,47	3	19,9	7,65	6,05	19,7
		4,19	3	19,6	

Tabella B.115: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione C-C' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,71	0,05	19,4	5,89	3	19,6
2,44	0,05	19,2	7,61	3	19,6
4,16	0,05	19,2	0,71	4	20
5,89	0,05	19,2	2,44	4	19,9
7,61	0,05	19,2	4,16	4	19,7
0,71	1	19,6	5,89	4	19,7
2,44	1	19,5	7,61	4	19,6
4,16	1	19,7	0,71	5	20
5,89	1	19,6	2,44	5	19,9
7,61	1	19,5	4,16	5	19,8
0,71	2	20	5,89	5	19,7
2,44	2	19,9	7,61	5	19,7
4,16	2	19,6	0,71	6,05	20
5,89	2	19,6	2,44	6,05	19,9
7,61	2	19,5	4,16	6,05	19,8
0,71	3	19,8	5,89	6,05	19,7
2,44	3	19,6	7,61	6,05	19,7
		4,16	3	19,6	

Tabella B.116: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione D-D' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,68	0,05	19,7	5,85	3	19,5
2,4	0,05	19,4	7,85	3	19,6
4,12	0,05	19,2	0,68	4	20,1
5,85	0,05	19,1	2,4	4	19,8
7,85	0,05	19	4,12	4	19,6
0,68	1	20	5,85	4	19,6
2,4	1	19,7	7,85	4	19,6
4,12	1	19,4	0,68	5	20,1
5,85	1	19,3	2,4	5	19,9

7,85	1	19,3	4,12	5	19,8
0,68	2	20,1	5,85	5	19,7
2,4	2	19,8	7,85	5	19,6
4,12	2	19,5	0,68	6,05	20
5,85	2	19,4	2,4	6,05	19,9
7,85	2	19,4	4,12	6,05	19,7
0,68	3	20	5,85	6,05	19,7
2,4	3	19,7	7,85	6,05	19,6
		4,12	3	19,5	

Tabella B.117: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione E-E' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

y	z	T (°C)	y	z	T (°C)
0,7	0,05	19,3	5,87	3	19,6
2,42	0,05	19,2	7,59	3	19,6
4,14	0,05	19	0,7	4	19,8
5,87	0,05	18,9	2,42	4	19,7
7,59	0,05	18,9	4,14	4	19,6
0,7	1	20,3	5,87	4	19,6
2,42	1	20	7,59	4	19,6
4,14	1	19,7	0,7	5	19,8
5,87	1	19,4	2,42	5	19,7
7,59	1	19,3	4,14	5	19,6
0,7	2	19,8	5,87	5	19,6
2,42	2	19,7	7,59	5	19,6
4,14	2	19,6	0,7	6,05	19,8
5,87	2	19,5	2,42	6,05	19,7
7,59	2	19,5	4,14	6,05	19,6
0,7	3	19,9	5,87	6,05	19,6
2,42	3	19,7	7,59	6,05	19,6
		4,14	3	19,6	

Tabella B.118: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione F-F' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	18,9	9,18	3	19,6
3,97	0,05	19,2	12,42	3	19,6
6,6	0,05	19,2	1,42	4	19,7
9,18	0,05	18,9	3,97	4	19,7
12,42	0,05	19	6,6	4	19,6

1,42	1	19,7	9,18	4	19,6
3,97	1	19,6	12,42	4	19,6
6,6	1	19,5	1,42	5	19,7
9,18	1	19,3	3,97	5	19,7
12,42	1	19,3	6,6	5	19,7
1,42	2	19,7	9,18	5	19,6
3,97	2	19,5	12,42	5	19,6
6,6	2	19,5	1,42	6,05	19,6
9,18	2	19,4	3,97	6,05	19,7
12,42	2	19,5	6,6	6,05	19,7
1,42	3	19,7	9,18	6,05	19,6
3,97	3	19,7	12,42	6,05	19,6
		6,6	3	19,6	

Tabella B.119: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione G-G' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	19,4	9,18	3	19,5
3,97	0,05	19,2	12,42	3	19,6
6,6	0,05	19,2	1,42	4	19,7
9,18	0,05	19,2	3,97	4	19,7
12,42	0,05	19	6,6	4	19,6
1,42	1	19,8	9,18	4	19,6
3,97	1	19,6	12,42	4	19,6
6,6	1	19,7	1,42	5	19,8
9,18	1	19,4	3,97	5	19,8
12,42	1	19,7	6,6	5	19,8
1,42	2	19,6	9,18	5	19,8
3,97	2	19,7	12,42	5	19,6
6,6	2	19,6	1,42	6,05	19,8
9,18	2	19,5	3,97	6,05	19,8
12,42	2	19,6	6,6	6,05	19,8
1,42	3	19,7	9,18	6,05	19,7
3,97	3	19,7	12,42	6,05	19,6
		6,6	3	19,6	

Tabella B.120: File di input contenente le coordinate, rispetto all'angolo sud del salone 1F9, dei 5 nodi della griglia costituenti la sezione H-H' e le temperature corrispondenti, da pavimento a soffitto, per la 3° serie a porta aperta.

x	z	T (°C)	x	z	T (°C)
1,42	0,05	19,6	9,18	3	20

3,97	0,05	19,5	12,42	3	19,9
6,6	0,05	19,4	1,42	4	20,2
9,18	0,05	19,6	3,97	4	20,1
12,42	0,05	19,3	6,6	4	20
1,42	1	20,1	9,18	4	20,1
3,97	1	19	12,42	4	19,8
6,6	1	19,6	1,42	5	20,3
9,18	1	20	3,97	5	20,1
12,42	1	20,3	6,6	5	20
1,42	2	20,2	9,18	5	20,1
3,97	2	20	12,42	5	19,8
6,6	2	20	1,42	6,05	20
9,18	2	20,2	3,97	6,05	20
12,42	2	19,8	6,6	6,05	20
1,42	3	20,2	9,18	6,05	20
3,97	3	20	12,42	6,05	19,8
		6,6	3	19,8	

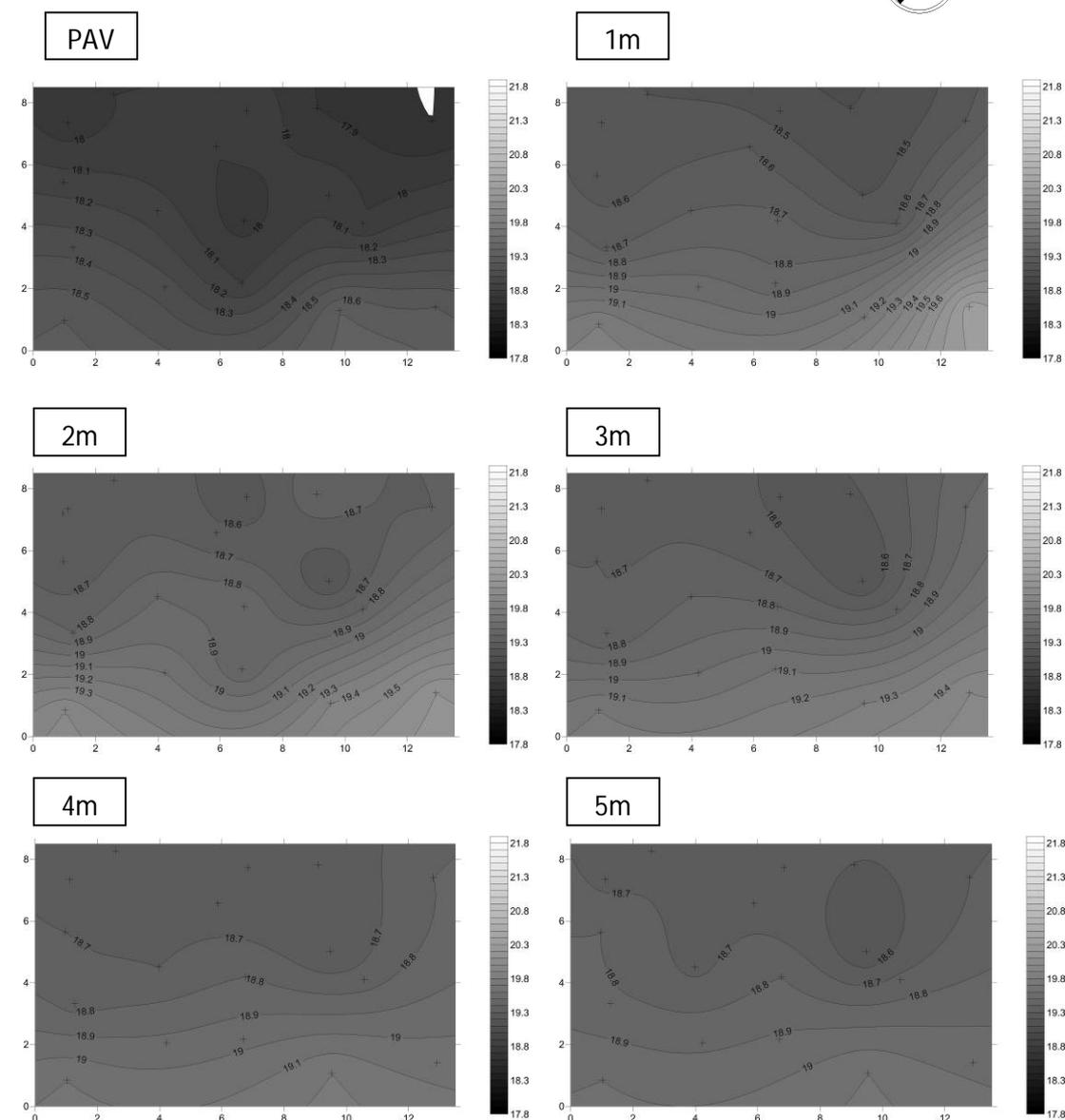
ALLEGATO C: Mappe delle temperature, orizzontali e verticali, delle diverse serie termografiche

Sono riportate le mappe delle temperature sia per le sezioni orizzontali sia per le sezioni verticali create utilizzando un campo di temperatura compreso tra 17.8-21.8 °C ossia tra i valori minimi e massimi in assoluto tra tutte le serie termografiche effettuate nelle differenti condizioni di prova (cfr. Cap.5.7).

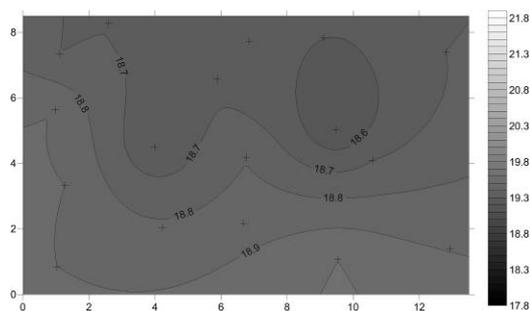
- SEZIONI OTTENUTE DAL MONITORAGGIO DI FLUSSI DI ARIA CALDA

Sezioni orizzontali

TUTTO CHIUSO (h 11.24)



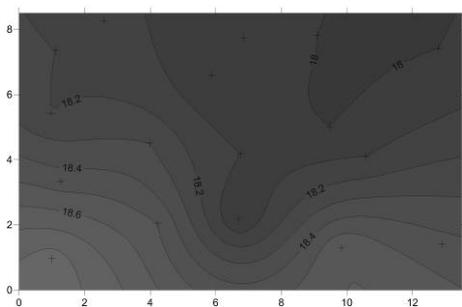
SOFF



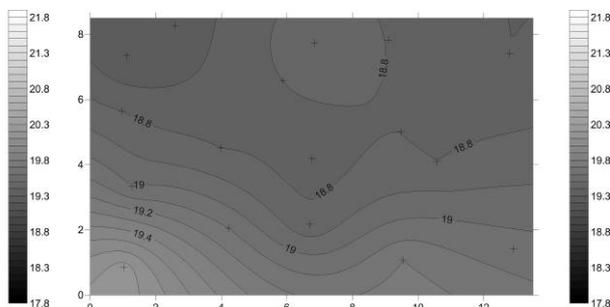
1°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.34)



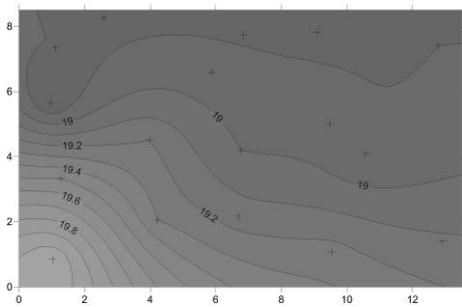
PAV



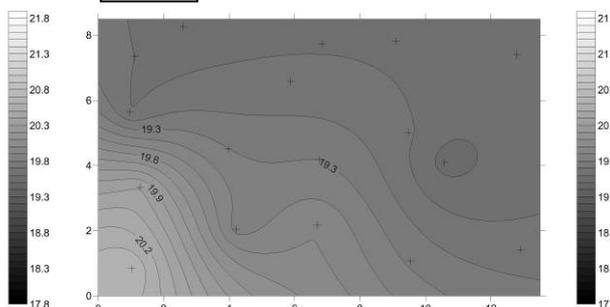
1m



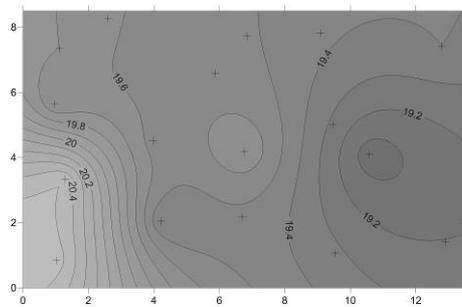
2m



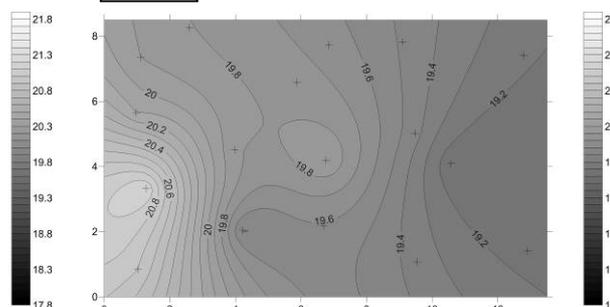
3m

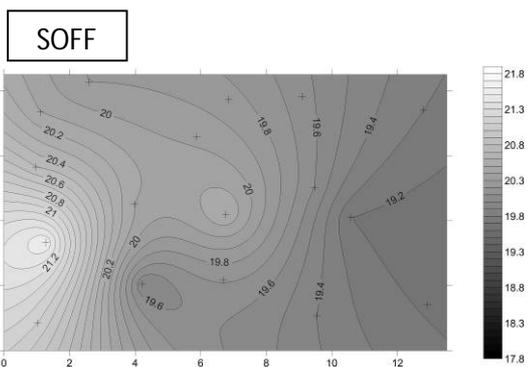


4m



5m

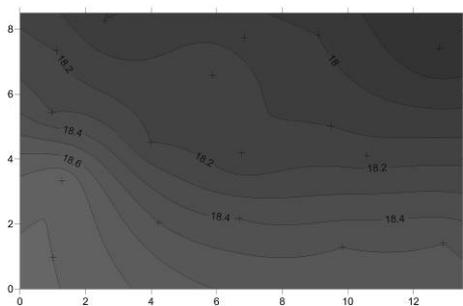




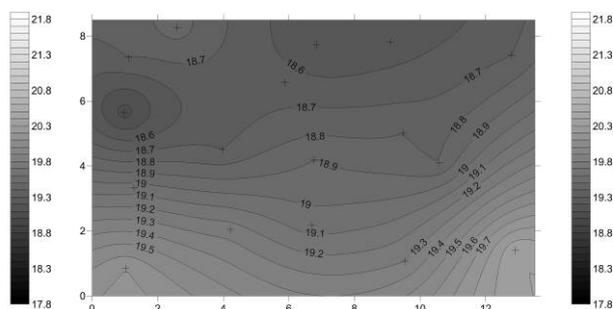
2°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.39)



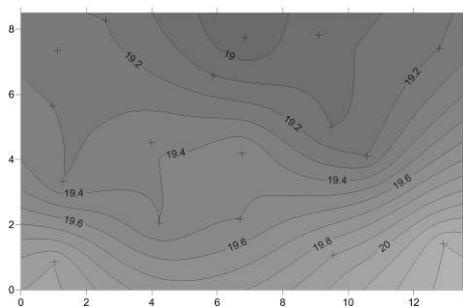
PAV



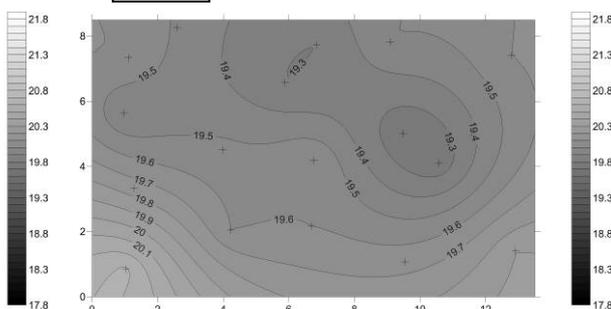
1m



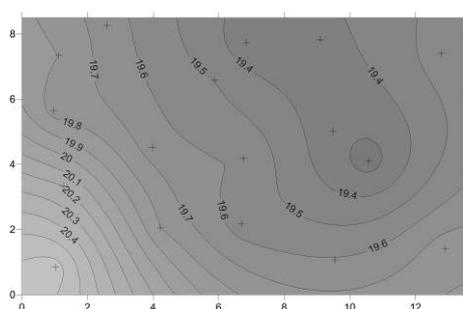
2m



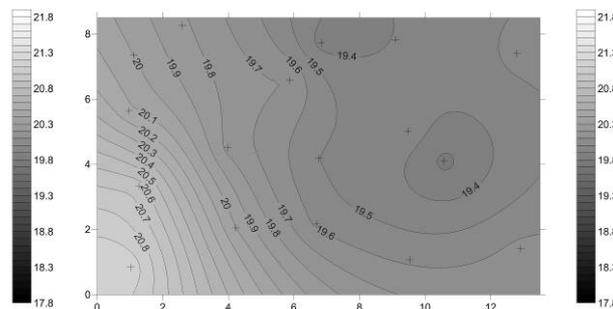
3m



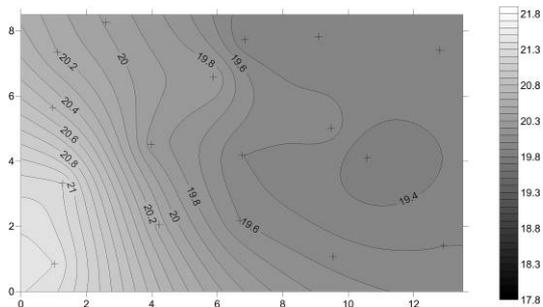
4m



5m



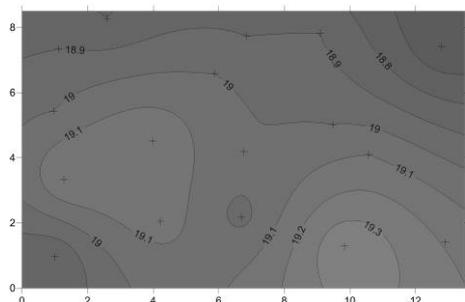
SOFF



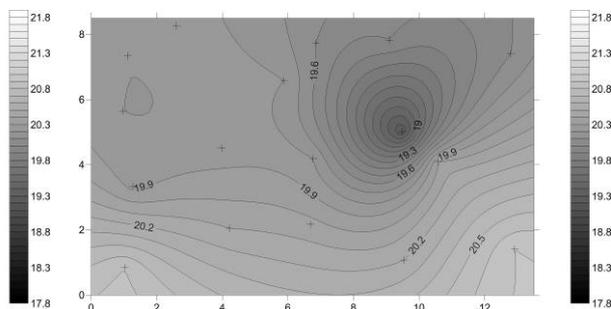
3°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.54)



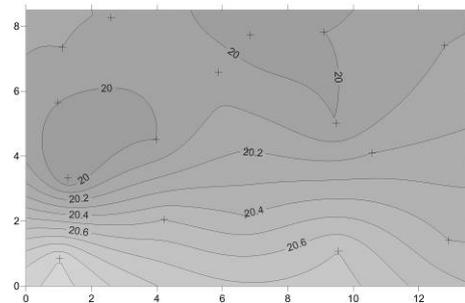
PAV



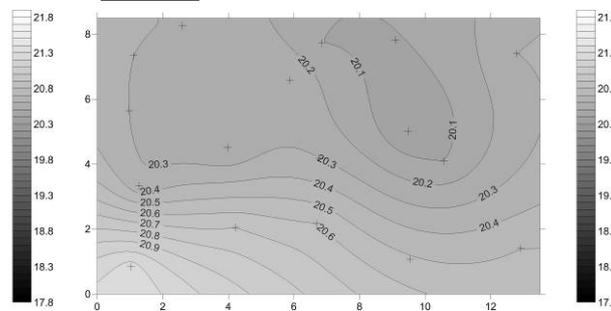
1m



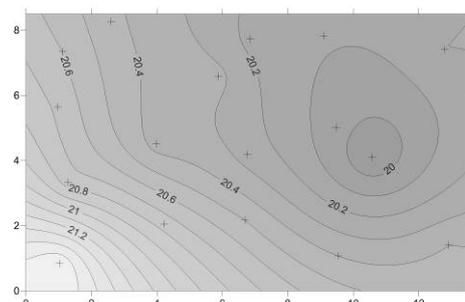
2m



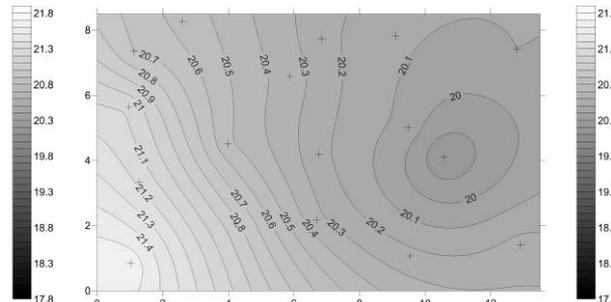
3m



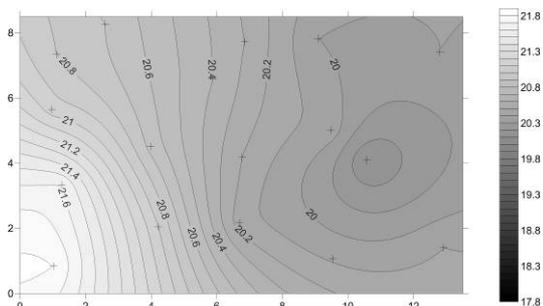
4m



5m



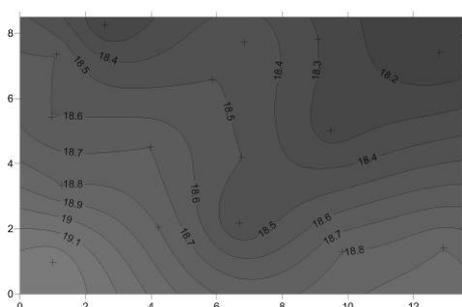
SOFF



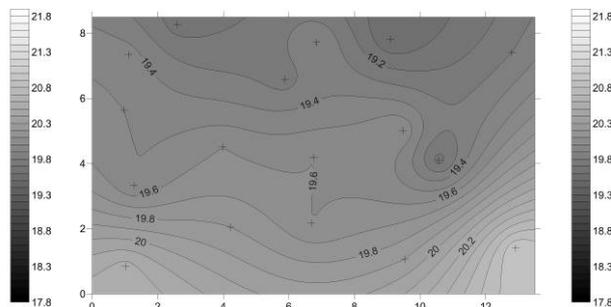
4°SERIE FINESTRA APERTA (h 12.19)



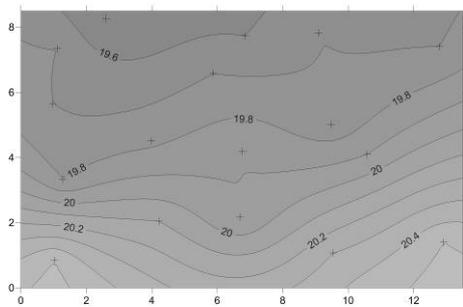
PAV



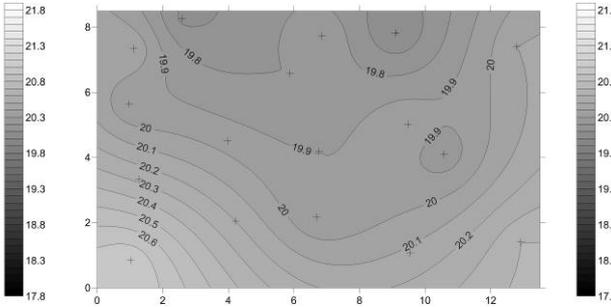
1m



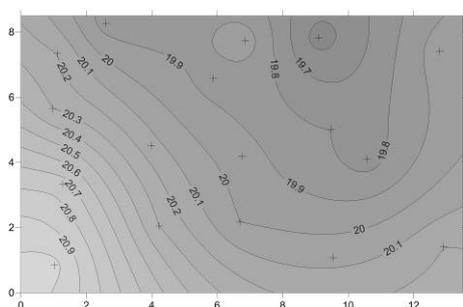
2m



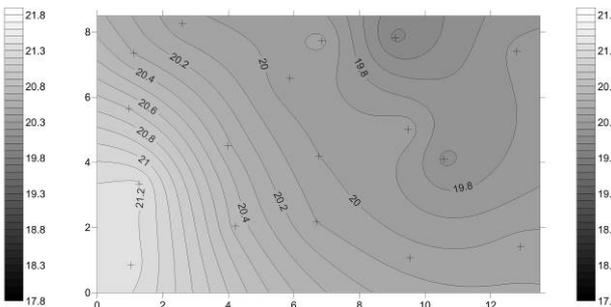
3m



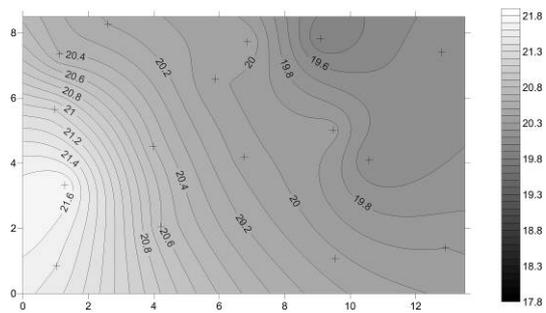
4m



5m



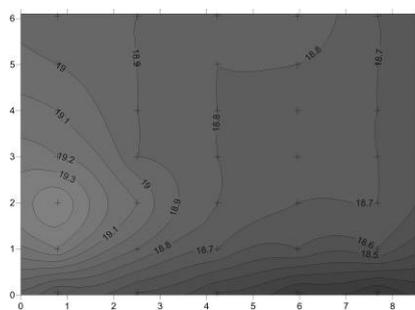
SOFF



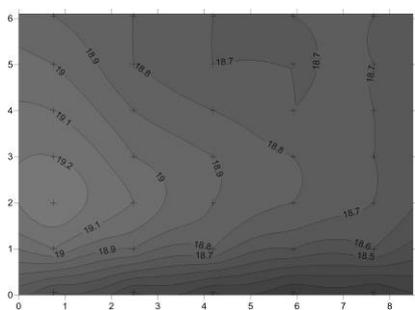
Sezioni verticali

TUTTO CHIUSO (h 11.24)

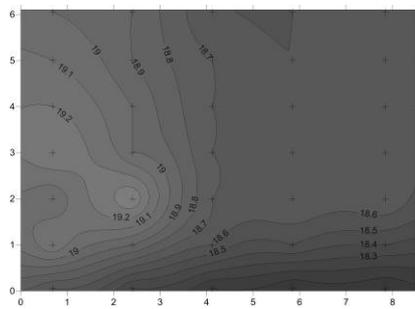
SEZ.A



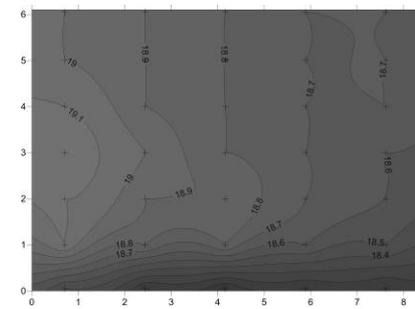
SEZ.B



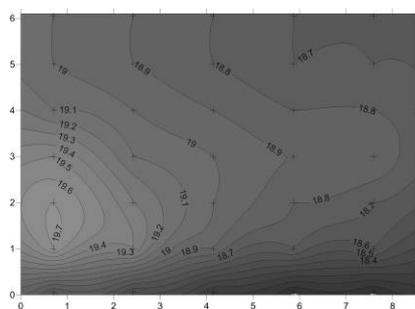
SEZ.C



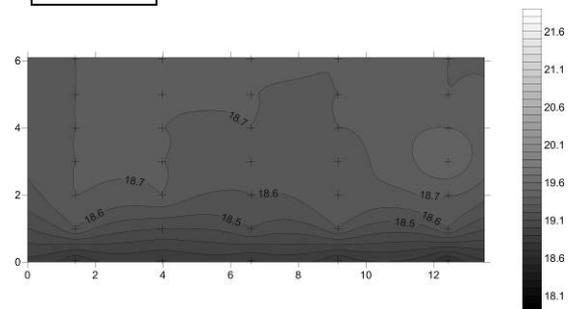
SEZ.D

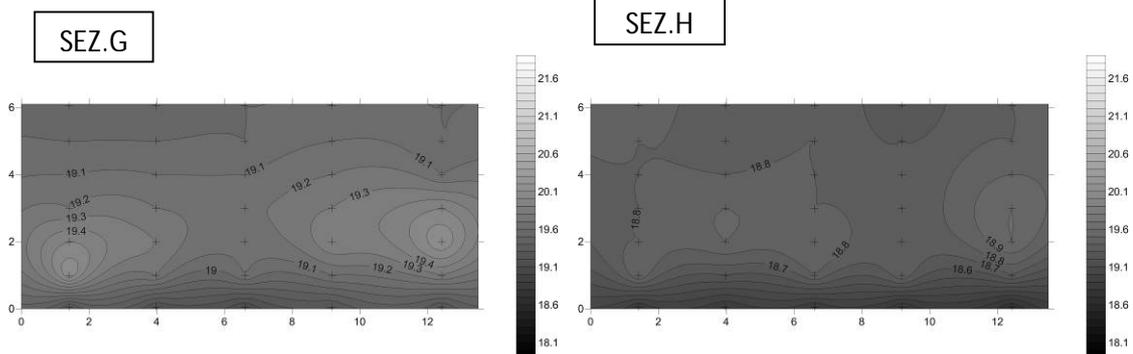


SEZ.E

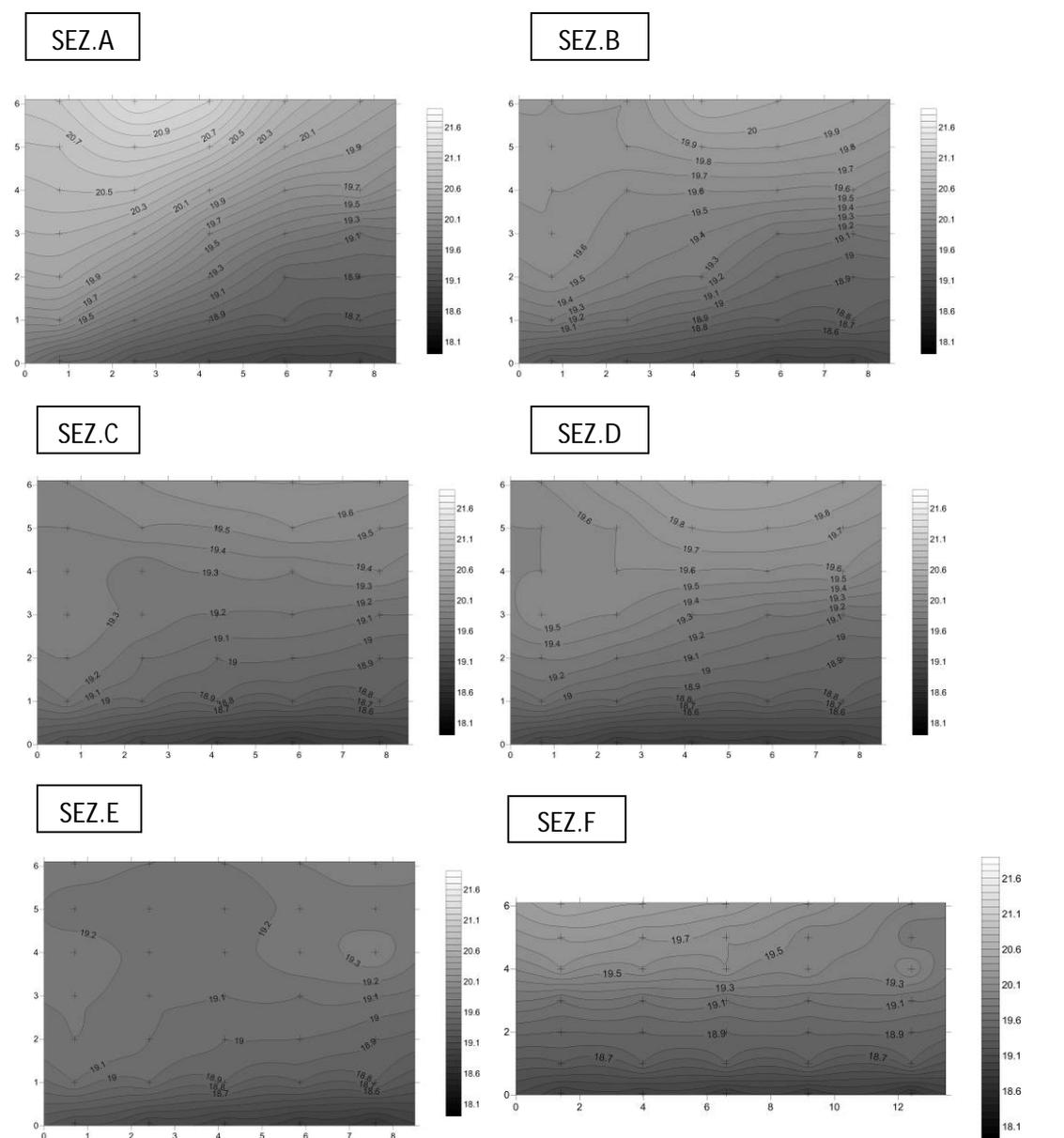


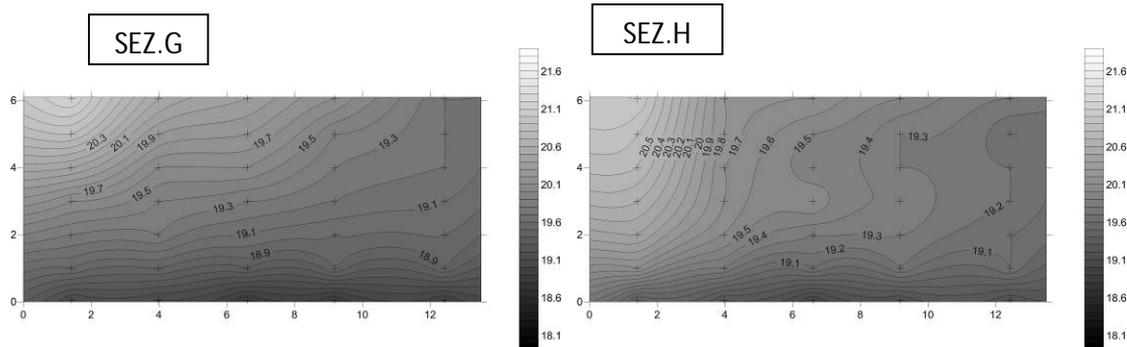
SEZ.F



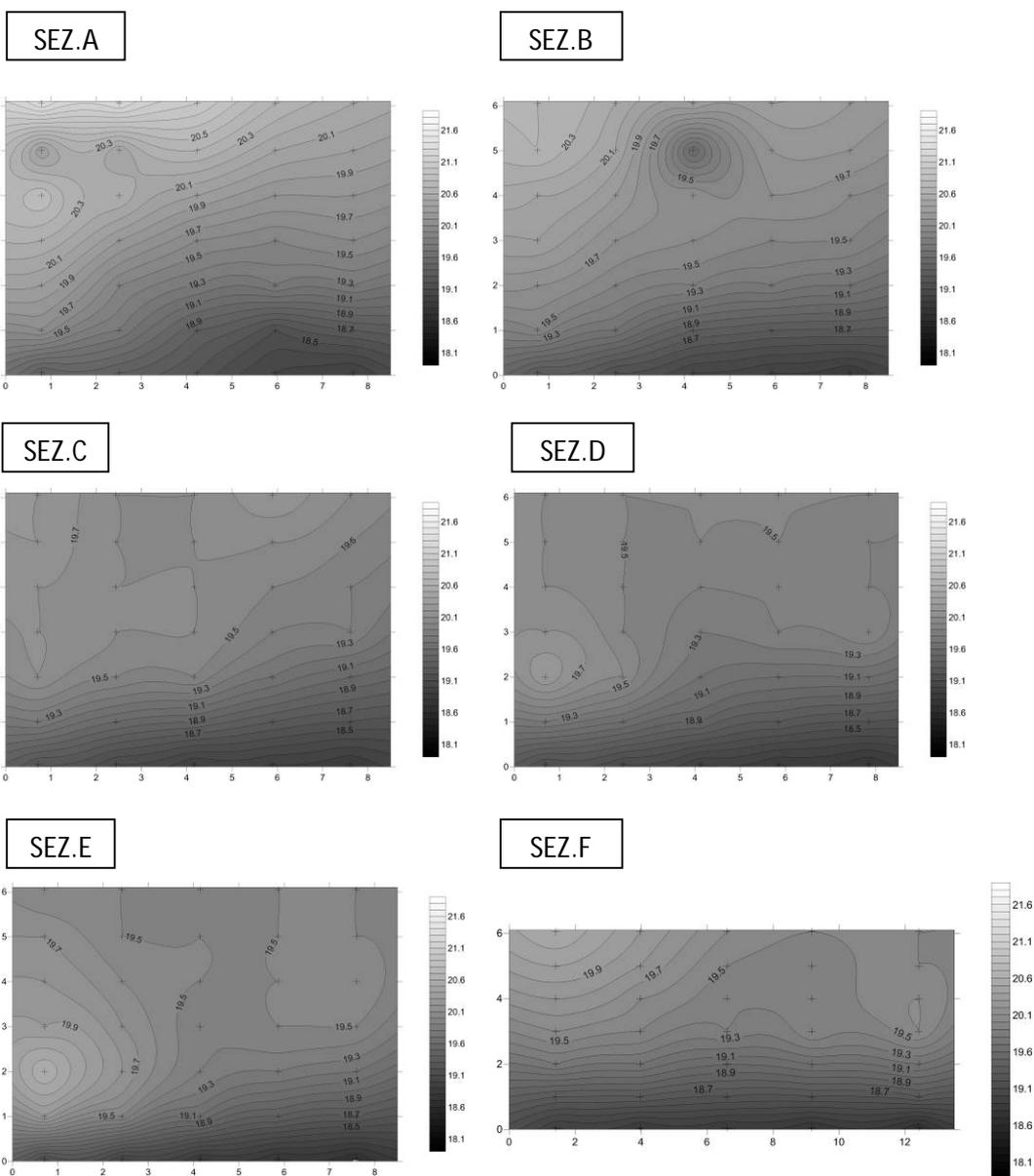


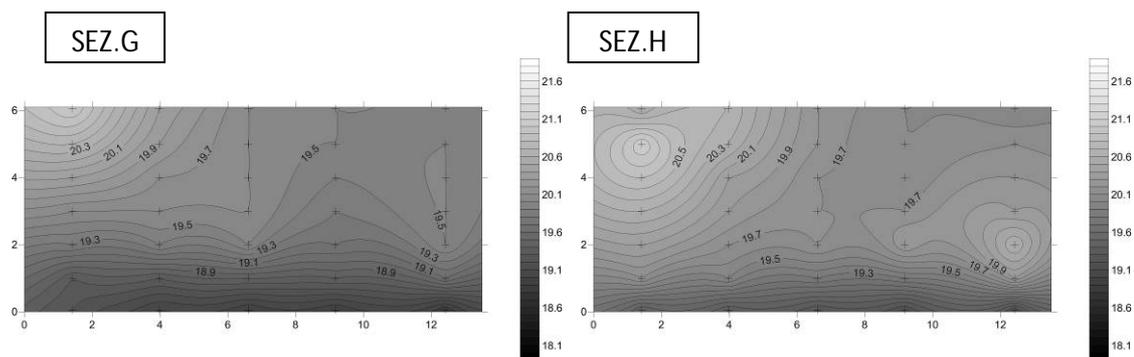
1°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.34)



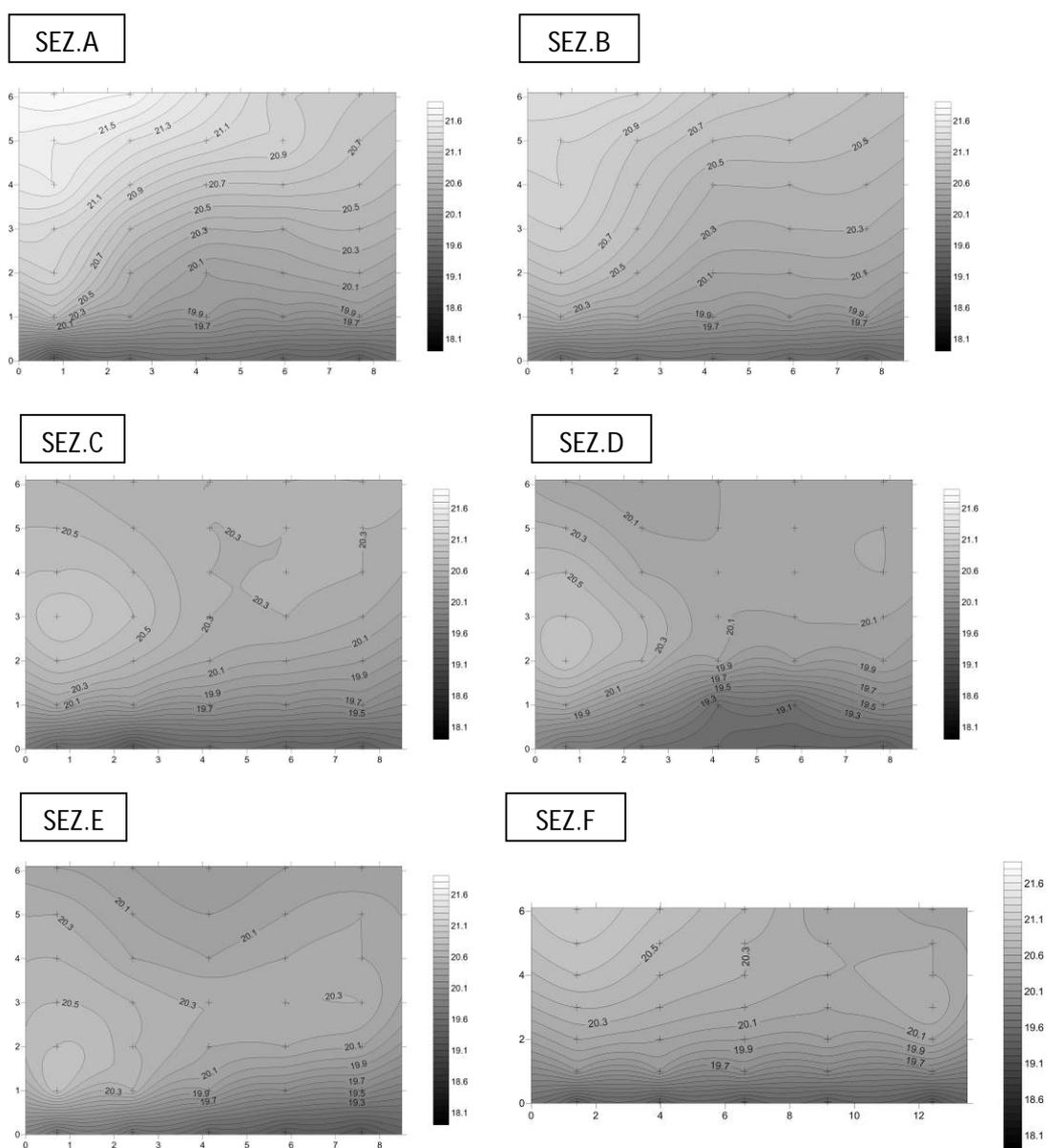


2°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.39)

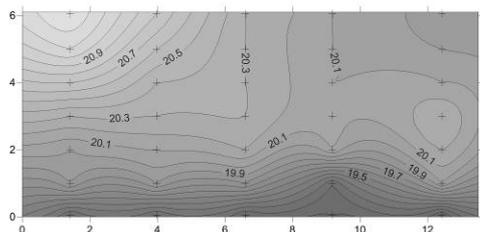




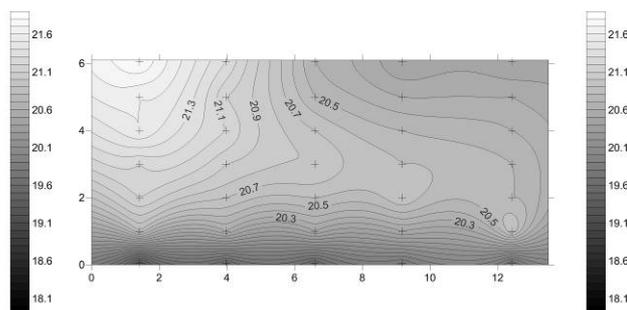
3°SERIE FINESTRA APERTA (h 11.54)



SEZ.G

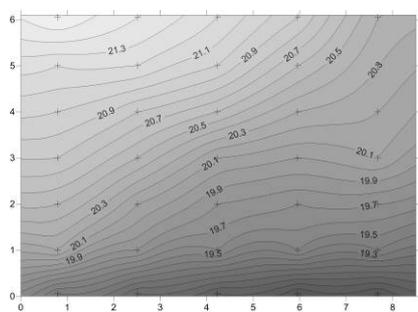


SEZ.H

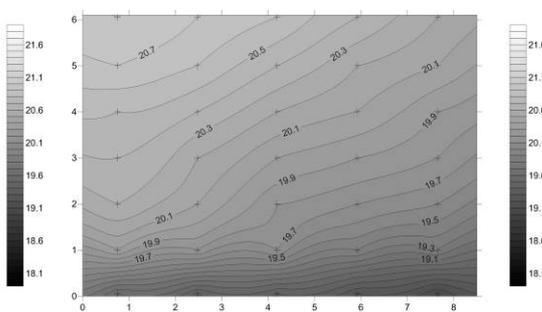


4°SERIE FINESTRA APERTA (h 12.19)

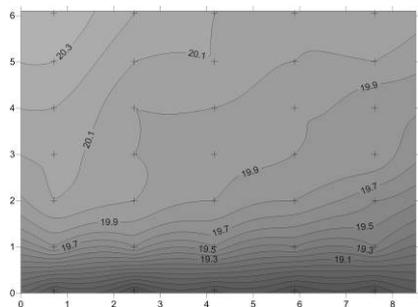
SEZ.A



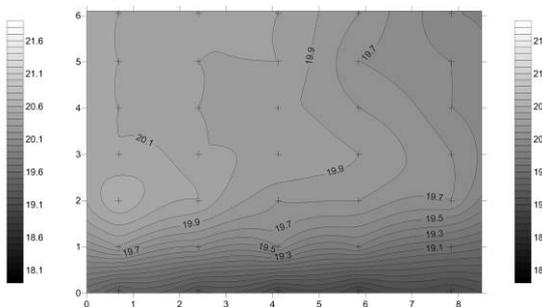
SEZ.B



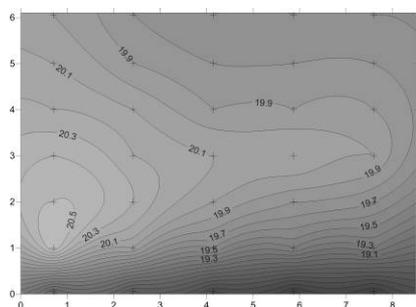
SEZ.C



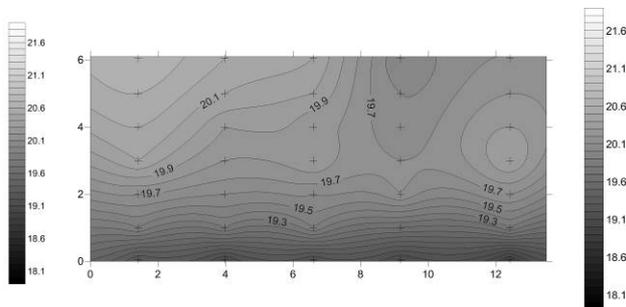
SEZ.D

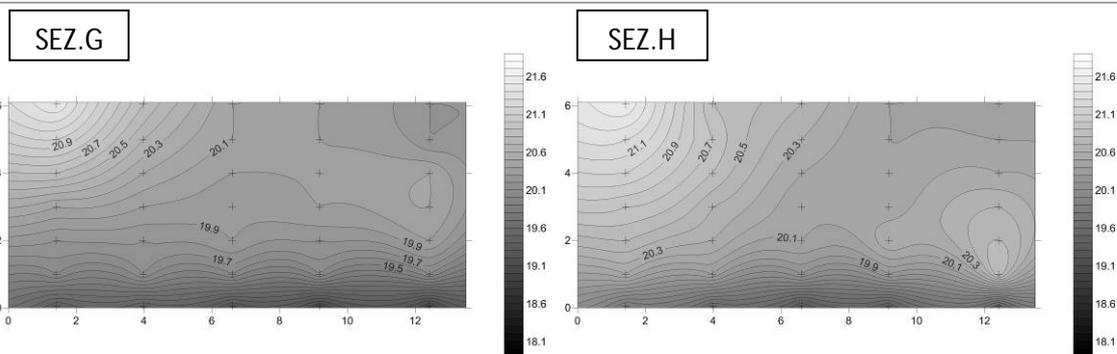


SEZ.E



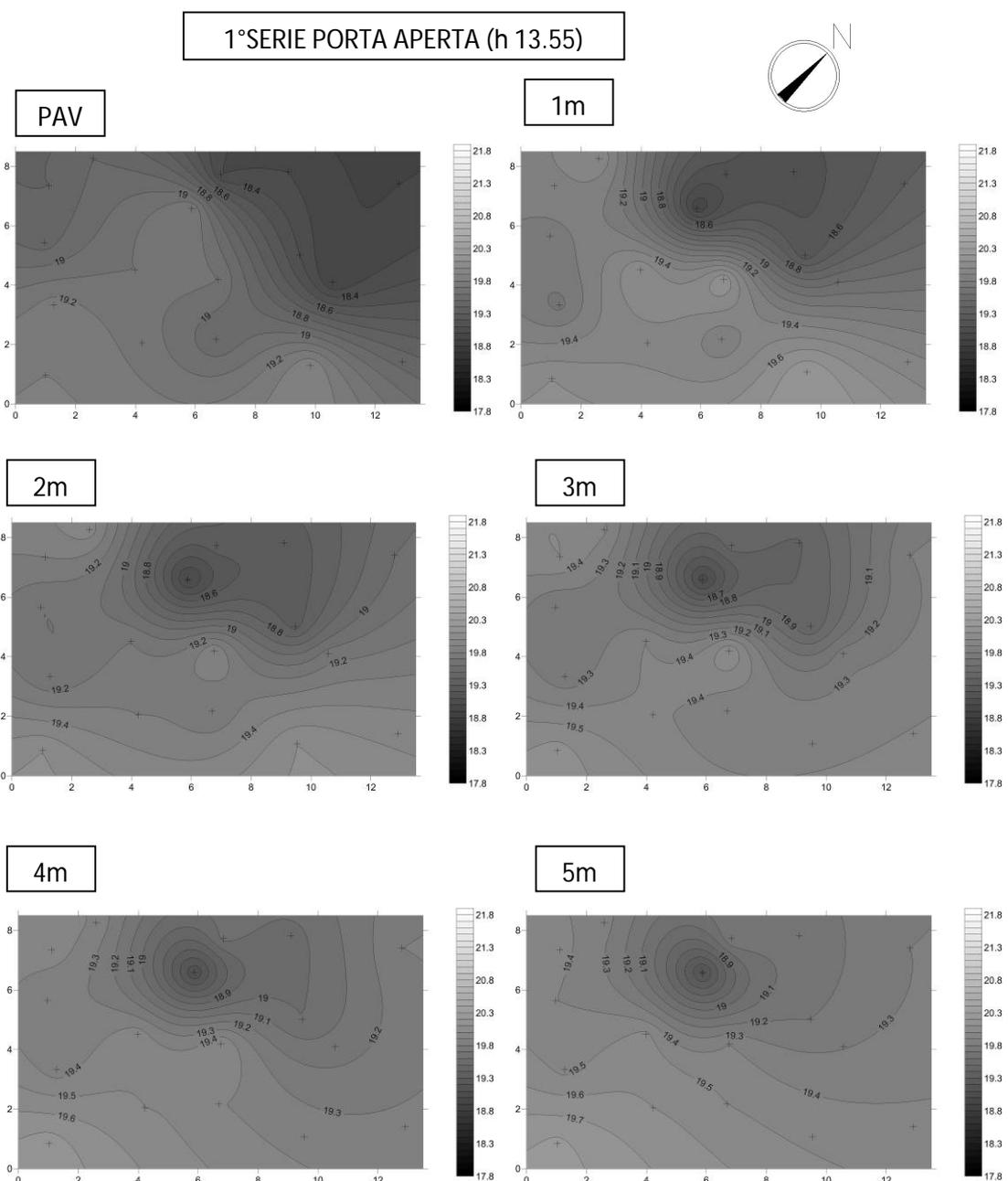
SEZ.F



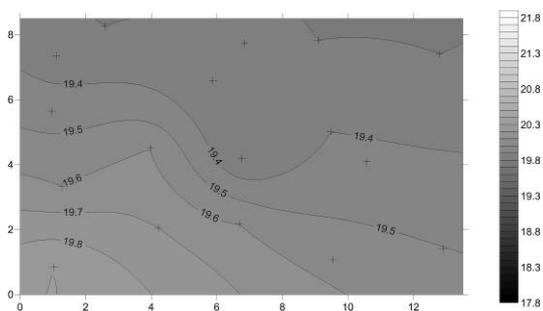


- SEZIONI OTTENUTE DAL MONITORAGGIO DI FLUSSI DI ARIA FREDDA

Sezioni orizzontali



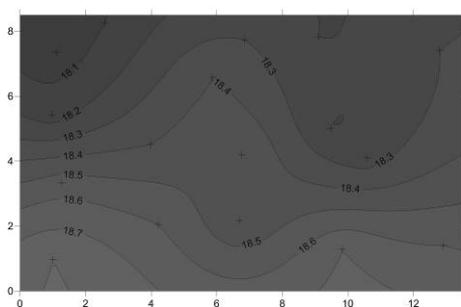
SOFF



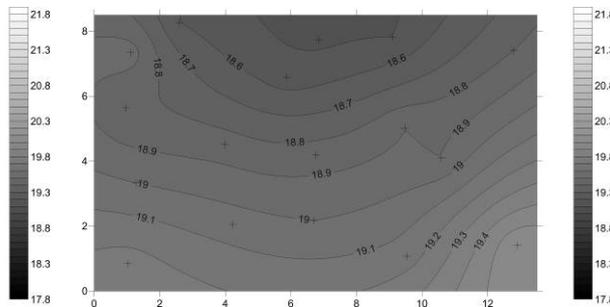
2°SERIE PORTA APERTA (h 14.03)



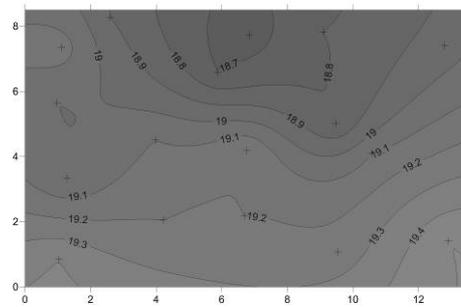
PAV



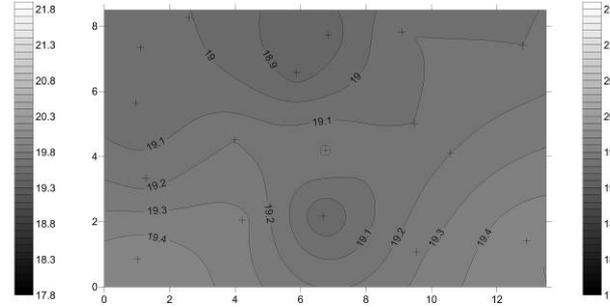
1m



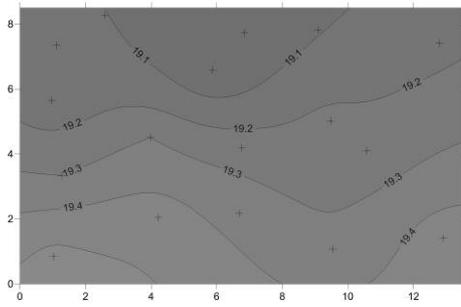
2m



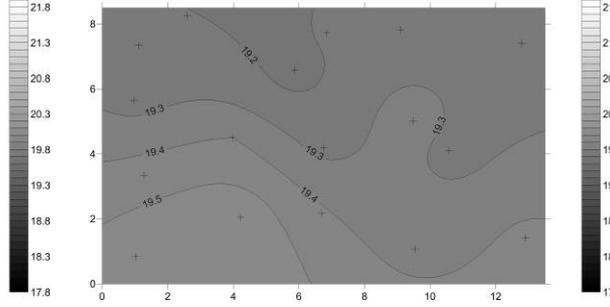
3m

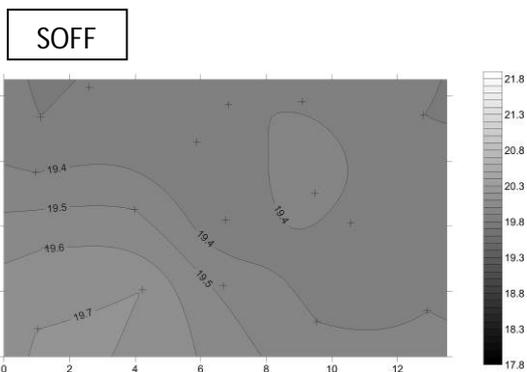


4m

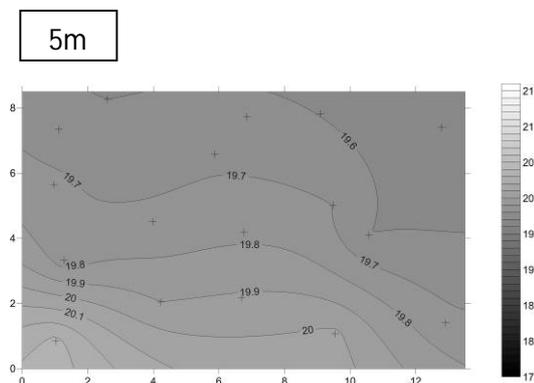
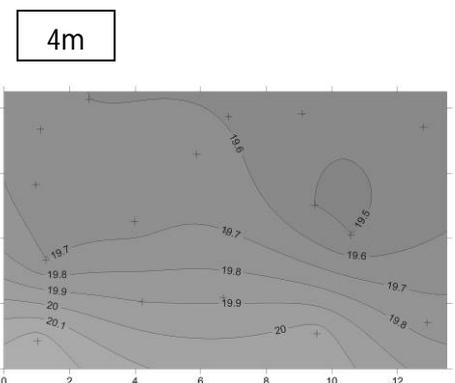
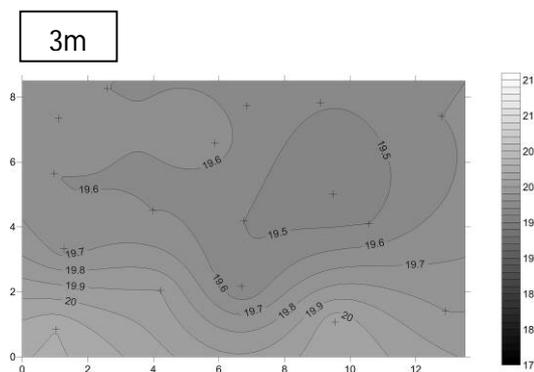
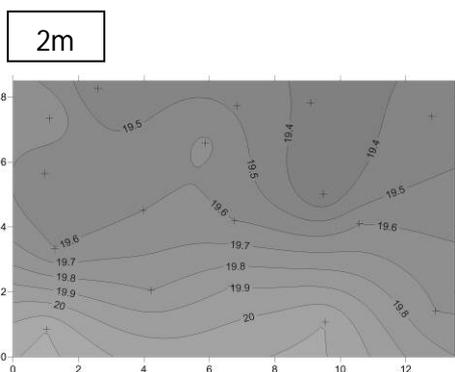
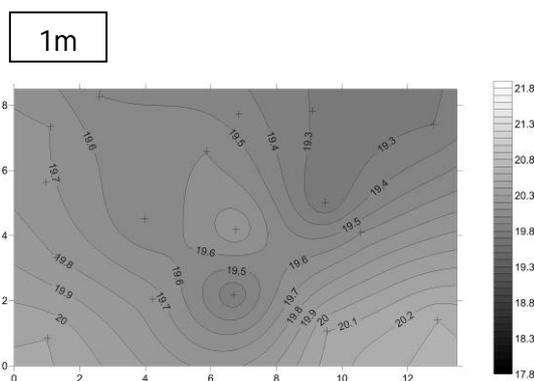
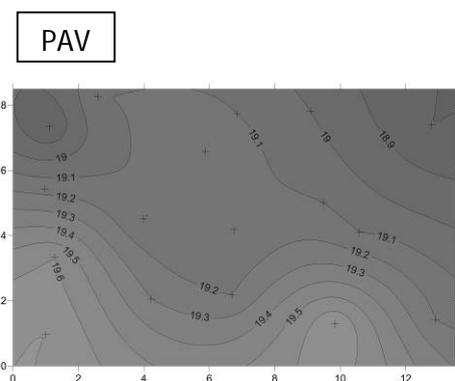


5m

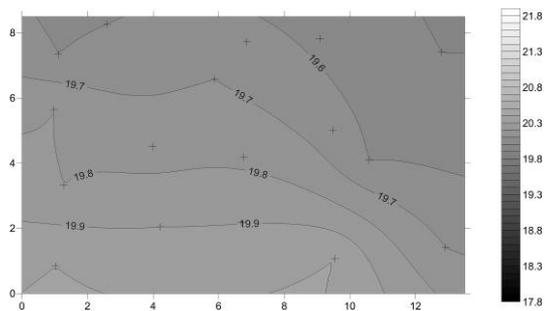




3°SERIE PORTA APERTA (h 14.42)



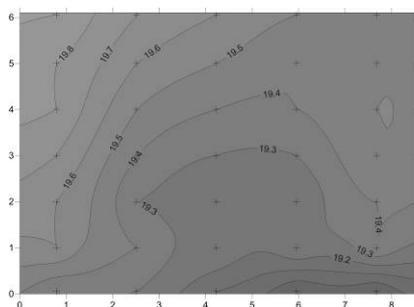
SOFF



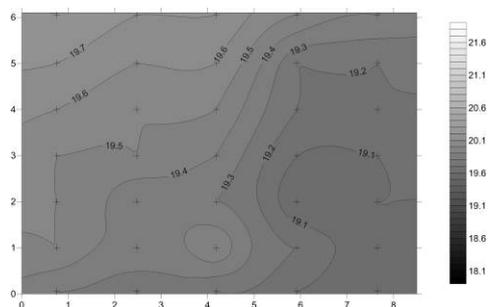
Sezioni verticali

1°SERIE PORTA APERTA (h 13.55)

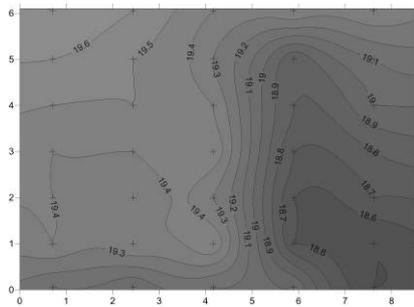
SEZ.A



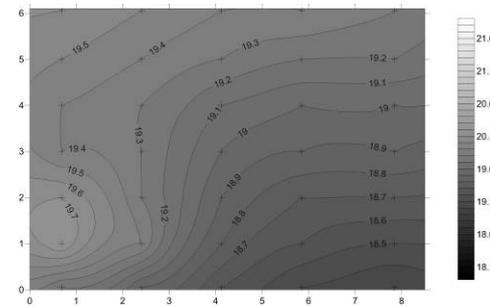
SEZ.B



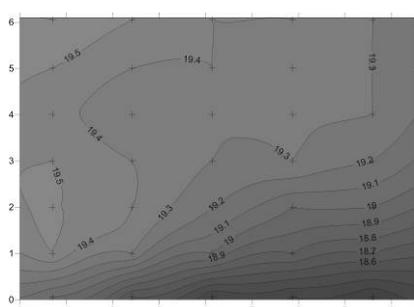
SEZ.C



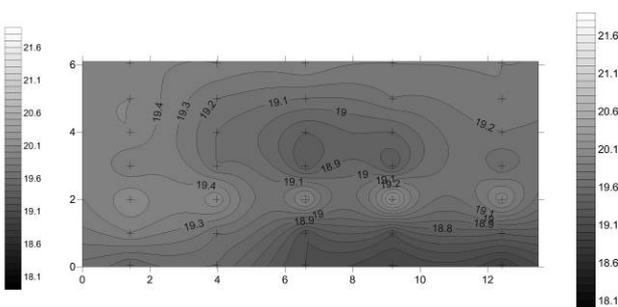
SEZ.D



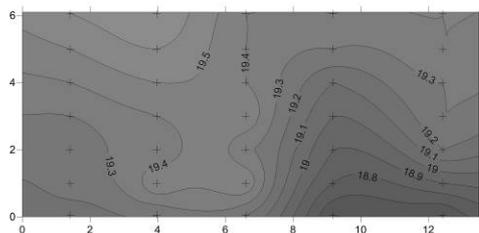
SEZ.E



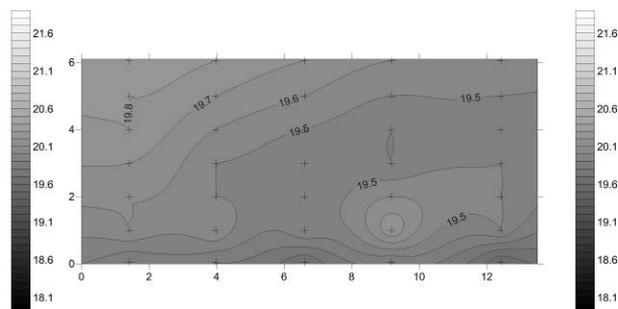
SEZ.F



SEZ.G

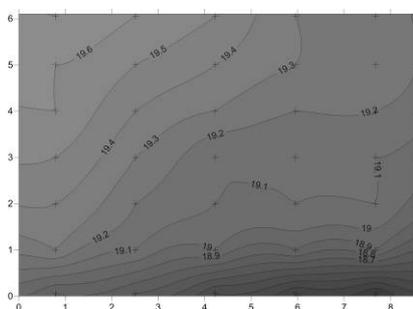


SEZ.H

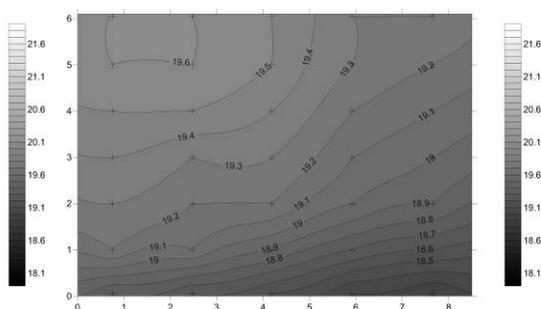


2°SERIE PORTA APERTA (h 14.03)

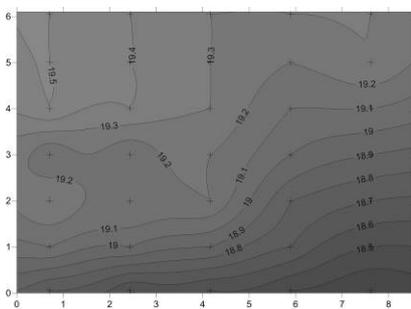
SEZ.A



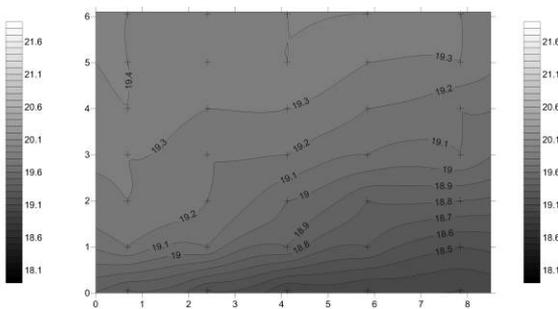
SEZ.B



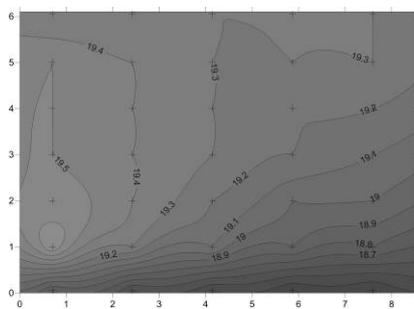
SEZ.C



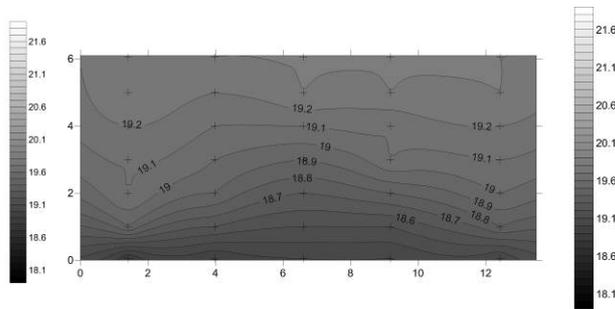
SEZ.D



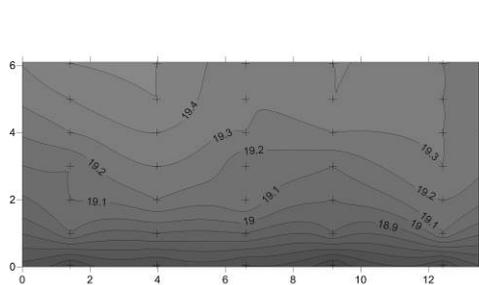
SEZ.E



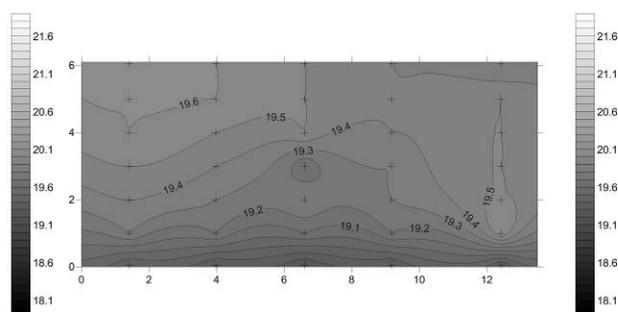
SEZ.F



SEZ.G

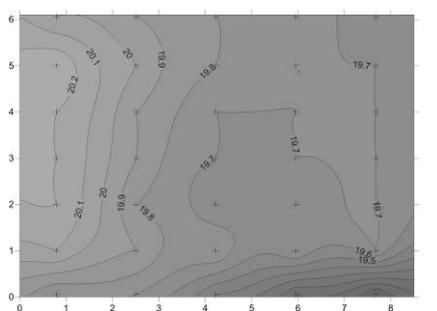


SEZ.H

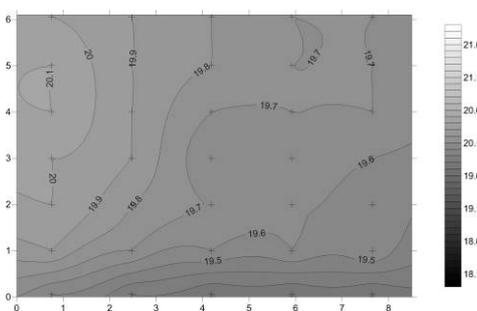


3°SERIE PORTA APERTA (h 14.42)

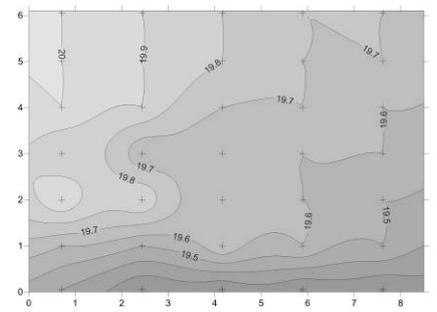
SEZ.A



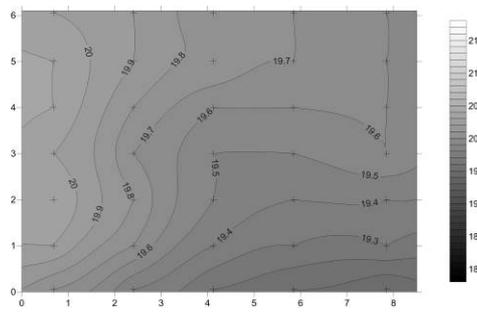
SEZ.B



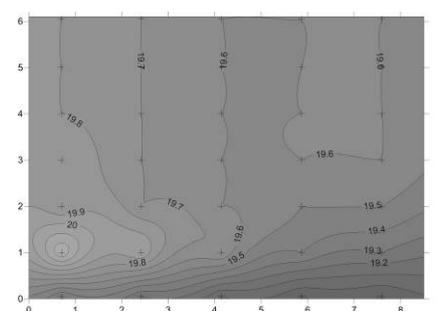
SEZ.C



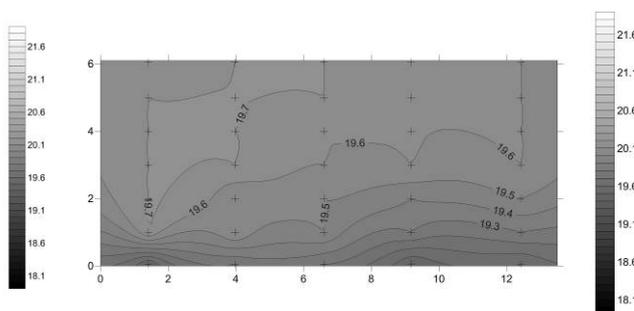
SEZ.D



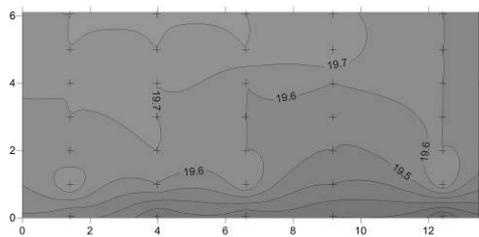
SEZ.E



SEZ.F



SEZ.G



SEZ.H

