

Ao8



Placido Munafò  
Francesca Stazi

## **Degrado da condensa**

Le cause e i possibili interventi





Aracne editrice

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

Copyright © MMXX  
Giacchino Onorati editore S.r.l. — unipersonale

[www.giacchinoonoratieditore.it](http://www.giacchinoonoratieditore.it)  
[info@giacchinoonoratieditore.it](mailto:info@giacchinoonoratieditore.it)

via Vittorio Veneto, 20  
00020 Canterano (RM)  
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-3470-2

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: luglio 2020

# Indice

- 7 Capitolo I  
*La comprensione del fenomeno della condensa*
- 15 Capitolo II  
*I casi di studio*
- 19 Capitolo III  
*Metodi e strumenti*
- 55 Capitolo IV  
*Risultati di un caso di studio*
- 79 Capitolo V  
*Analisi comparativa dei casi di studio e diagnosi*
- 95 Capitolo VI  
*Interventi*
- 105 *Conclusioni*
- 109 *Appendice. Il libretto dell'utente*
- 117 *Ringraziamenti*
- 119 *Bibliografia*



## La comprensione del fenomeno della condensa

### 1.1. La nascita di un nuovo problema

La condensa ha avuto un'incidenza significativamente crescente dagli anni '70 ad oggi, con conseguenze negative sulla salute degli occupanti e sulla durabilità dei componenti edili e si manifesta con la formazione di muffe sulle superfici e di umidità negli strati interni dell'involucro esterno (pareti, solai di copertura). Le ragioni di questa maggior diffusione rispetto al passato possono essere individuate nell'adozione di nuove soluzioni tecnico-costruttive ed impiantistiche che hanno modificato il bilancio energetico e igrometrico degli edifici e in errori costruttivi, spesso riconducibili ad un non corretto uso di queste nuove tecnologie. Inoltre i mutati profili di occupazione e un'errata gestione degli impianti hanno contribuito all'aumento dei livelli di umidità dando luogo, in alcuni casi, ad una disomogeneità delle temperature degli ambienti interni alle abitazioni.

Riguardo alle nuove tecnologie oggi presenti nel mercato, basti pensare ad esempio ai nuovi serramenti caratterizzati da prestazioni di tenuta all'aria e di isolamento termico molto più performanti rispetto al passato. Oltre a ridurre drasticamente le infiltrazioni d'aria, grazie all'impiego di vetri camera a bassa conducibilità termica permettono di diminuire notevolmente le dispersioni di calore. Questi nuovi serramenti non forniscono il ricambio d'aria naturale che in passato avveniva per infiltrazione, in modo tuttavia incontrollato e molto spesso inopportuno, ad esempio in fase invernale in presenza di basse temperature esterne e di vento.

Riguardo alle componenti opache, l'adozione di nuovi sistemi costruttivi basati sull'uso di materiali leggeri, componenti posati a secco e isolamenti termici di notevole spessore, hanno mutato il bilancio energetico e igrometrico tra parete finestrata e opaca, contribuendo a modificare il

comportamento dell'involucro edilizio esterno rispetto al vapore in attraversamento. In particolare i sistemi costruttivi a secco e senza l'uso di malte generano nuovi rischi per la formazione di condensa dovuti al passaggio di elevate quantità di vapore nei giunti. L'uso di elementi costruttivi ad alta resistenza igrometrica, come i pannelli in calcestruzzo, o di isolanti termici sintetici e di grande spessore, ha ridotto fortemente la capacità di assorbimento e trasmissione di vapore attraverso le chiusure verticali.

Un fattore determinante è stato infine la mutata incidenza del comportamento degli occupanti nel controllo energetico e igrometrico dell'abitazione. Spessori sempre più elevati di isolamento termico, hanno infatti diminuito drasticamente le perdite di calore per trasmissione attraverso l'involucro, e la gestione dell'apertura delle finestre da parte dell'utenza (e di conseguenza del ricambio d'aria degli ambienti) ha assunto via via maggior peso, diventando un fattore principale nel bilancio energetico. La tendenza alla conservazione del calore da parte degli utenti ha determinato la riduzione del ricambio d'aria, aumentando notevolmente il rischio di condensa. Inoltre pregiudizi dell'utenza nei confronti dei sistemi di ventilazione meccanica (in grado di garantire adeguati ricambi d'aria) connessi al costo di gestione e di manutenzione, ne hanno limitato la diffusione.

È importante evidenziare che le modalità di gestione da parte dell'utenza degli impianti di ultima generazione a riscaldamento intermittente e "a zona" (cioè differenziato per ambienti), possono portare, in alcune fasce orarie, alla riduzione delle temperature di alcuni ambienti dell'abitazione con conseguente riduzione delle temperature superficiali delle pareti esterne in corrispondenza delle zone con minore resistenza termica.

## 1.2. Il principio fisico

È noto che la capacità dell'aria di contenere vapore, varia in base alla sua temperatura. Maggiore è la temperatura dell'aria e maggiore è la quantità di vapore che può contenere.

Se l'aria contenente una certa quantità di vapore viene raffreddata al di sotto di un particolare valore di temperatura (temperatura di rugiada),



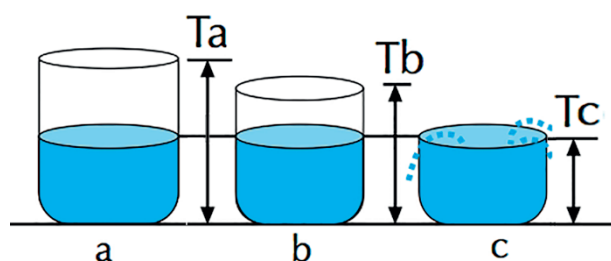
la quantità d'acqua in eccesso condensa sotto forma di minute goccioline (effetto nebbia) (Figura 1).

Per ogni temperatura (ad esempio  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$  in Figura 1) esiste, dunque, una quantità massima di vapore che può essere contenuta nell'aria. In tali condizioni limite l'aria viene definita "satura" ed ogni incremento successivo di vapore comporta un rilascio dello stesso sotto forma di condensa.

L'umidità relativa (U.R.) è la percentuale di vapore contenuto nell'aria in rapporto alla massima quantità in essa contenibile a una data temperatura. L'U.R. del 100% indica che l'aria ad una data temperatura contiene la quantità massima possibile di vapore acqueo.

Ad esempio: 1kg di aria alla temperatura a bulbo secco pari a  $20^{\circ}\text{C}$  può al massimo contenere 14,7 g di vapore d'acqua (condizioni di saturazione, UR 100%, caso  $T_c$  in Figura 1). Se, a parità di quantità di vapore, viene incrementata la temperatura, passando a  $T_b$ , l'aria non sarà più satura aumentando la sua capacità di contenere vapore acqueo. L'umidità relativa UR è dunque scesa, ad esempio, all'80%.

Il vapore contenuto nell'aria, ad una certa temperatura, ha una pressione definita pressione parziale PR, inferiore a quella che si avrebbe in condizione di saturazione PS. Il rapporto  $PR/PS = \text{U.R.} (\%)$  rappresenta l'umidità relativa.

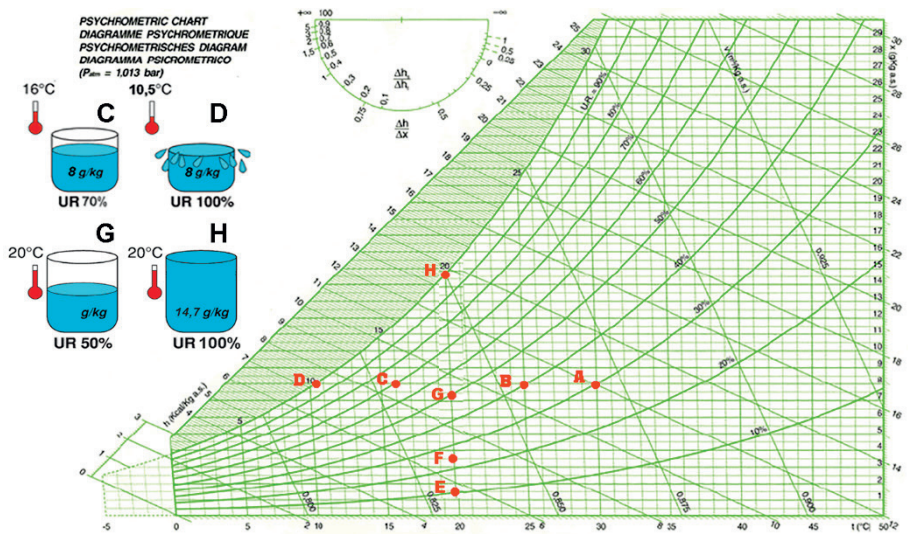


**Figura 1.** L'aria si può paragonare ad un bicchiere d'acqua. Così come un bicchiere più alto può contenere più acqua, aria più calda può contenere più vapore acqueo. L'abbassamento della temperatura a parità di umidità assoluta (stessi g/kg di vapore) corrisponde ad una riduzione della capacità contenitiva del bicchiere. Caso a — UR al 50%; caso b — UR 80%; caso c — UR 100% (saturazione del volume).

### 1.3. Cosa avviene in un'abitazione: condensa superficiale e interstiziale

Durante la stagione invernale, per effetto della differenza di temperatura ( $T_i > T_e$ ), la pressione parziale di vapore interna è maggiore rispetto a quella esterna. Tale differenziale determina una migrazione (diffusione) del vapore verso l'esterno attraverso l'involucro, con una portata che dipende dalla permeabilità al vapore dei materiali che lo costituiscono. La condensa superficiale si forma quando il vapore d'acqua contenuto nell'aria viene a contatto con una superficie a temperatura uguale o inferiore alla temperatura di rugiada. In tali condizioni il vapore raggiunge le condizioni di saturazione e subisce il passaggio di fase a liquido. Nell'intervallo di temperature normalmente riscontrate nelle abitazioni in fase invernale, con umidità relative superiori all'80%, si ha la crescita di funghi e muffe su parti estese della superficie interna dell'involucro, con conseguenze sulla salubrità dell'aria.

La condensa interstiziale si verifica quando il vapore, a seguito della migrazione attraverso gli strati di un elemento costruttivo (pareti, coperture, ecc.) incontra superfici a temperatura uguale o inferiore a quella di rugiada. Questo può avvenire in corrispondenza dell'interfaccia tra due strati o all'interno di uno strato. Il diagramma di Carrier (anche detto diagramma



psicrometrico) viene usato per determinare le proprietà di una miscela acqua-aria a pressione costante e per rappresentare le trasformazioni dell'aria umida. In ascissa viene riportata la temperatura ( $T$  in  $^{\circ}\text{C}$ ), in ordinata l'umidità specifica ( $X$  in grammi di vapore acqueo per kg di aria secca). Le curve indicano livelli di umidità relativa, crescenti dal basso verso l'alto, fino all'ultima curva (UR 100%) detta linea di saturazione, che separa la zona delle nebbie dalla zona costituita da aria insatura. A partire da ogni punto ( $T$ ,  $X$ ) è inoltre possibile determinare la temperatura di rugiada  $T_r$  tracciando l'orizzontale dal punto fino a incontrare la linea di saturazione.

Il rischio di condensa dipende, in definitiva, da quattro fattori:

- (i) La temperatura dell'aria interna. Una diminuzione di tale temperatura (e il conseguente valore di temperatura delle superfici murarie), riduce la capacità dell'aria a contatto con l'involucro esterno di contenere vapore, raggiungendo livelli di saturazione in corrispondenza di quel punto. In Figura 2 i punti A, B, C, e D rappresentano la variazione dell'umidità relativa al variare della temperatura per una miscela di fissata quantità di vapore acqueo. Per tutte le condizioni, A, B, C, D, la temperatura di rugiada è circa  $10,5^{\circ}\text{C}$ , ma solo nel punto D la temperatura ha raggiunto il valore limite.
- (ii) I grammi di vapore generati. In un ambiente a seguito della presenza di occupanti e delle loro attività viene generato vapore. Su tale parametro difficilmente si può intervenire. In Figura 2 i punti E, F, G, e H rappresentano l'aumento dei grammi di vapore per una fissata temperatura. Tale variazione provoca un aumento dell'umidità relativa, fino a valori critici in H.
- (iii) Il livello di ventilazione. La miscelazione dell'aria interna con l'aria esterna, caratterizzata da contenuti di vapore più bassi comporta una riduzione dell'umidità relativa. Infatti essendo l'aria esterna generalmente a temperatura molto più bassa di quella interna (capacità del "bicchiere" molto ridotta), anche se fosse in condizioni di saturazione (UR 100%), conterebbe una quantità in grammi di vapore molto inferiore.
- (iv) Errori di progettazione e costruttivi. A causa di soluzioni errate o tecnologie usate in modo improprio, si creano in corrispondenza di alcune superfici interne o ambienti dell'abitazione, delle zone con temperature molto ridotte, favorendo i fenomeni di condensa.

#### **1.4. I casi critici**

La condensa può essere un fenomeno occasionale e di breve durata o persistere per periodi lunghi, portando alla formazione di muffe e ad un decadimento progressivo delle prestazioni termo-fisiche dei materiali, influenzando di conseguenza le condizioni ambientali interne anche in edifici di recente costruzione.

Le patologie da condensa sono sempre da ricondurre a basse temperature dovute ad errori costruttivi ma si manifestano maggiormente in ambienti in cui le attività umane comportano elevate quantità di vapore nell'aria. È raro osservare la condensa in ambienti pubblici come scuole o uffici, dove la produzione di vapore è significativamente più bassa rispetto, ad esempio, a quella delle residenze, sia per il tipo di attività svolte difficilmente connesse all'uso d'acqua, che per il ridotto tempo di occupazione. Il fenomeno è invece rilevante in alcuni alloggi di edilizia popolare, caratterizzati da elevata densità di occupazione e abitudini di vita legate a produzioni significative di vapore. Inoltre la situazione è resa ancora più critica dalla tendenza degli occupanti ad un uso limitato sia dell'impianto di riscaldamento che della ventilazione naturale, per economia sui consumi energetici.

#### **1.5. Obiettivi del presente lavoro**

Il presente lavoro riporta i risultati di una ricerca sperimentale e numerica su edifici di edilizia popolare dell'Erap di Ancona di diverse tipologie, in cui si è riscontrata la presenza di fenomeni di degrado da condensa. In particolare sono stati studiati tre edifici multipiano con struttura portante in c.a. realizzati dopo gli anni '90, e un edificio in muratura portante, risalente agli anni '30, di recente ristrutturazione.

Misurazioni in situ e analisi numeriche hanno permesso di individuare le cause di degrado e verificare l'efficacia di soluzioni alternative di retrofit, anche in relazione al comportamento degli occupanti.

Lo studio è stato articolato nelle seguenti fasi: analisi di laboratorio su campioni di materiale prelevati dai casi di studio per verificare le proprietà termofisiche e la presenza di processi di degrado chimico/fisico; monitoraggio in opera delle condizioni ambientali e dei livelli di comfort

termico; analisi igrometriche in regime stazionario e dinamico per verificare il rischio di germinazione delle spore (formazione di “muffa”); analisi energetiche in regime semi-stazionario e dinamico per valutare i consumi energetici e i livelli di comfort al variare delle modalità d’uso degli appartamenti da parte degli utenti e al fine di verificare l’efficacia di interventi di retrofit energetico alternativi; analisi costi — benefici.



# I casi di studio

### 2.1. Premessa

L'Ente Regionale per l'Abitazione Pubblica (Erap) delle Marche ha segnalato la presenza, all'interno del suo patrimonio edilizio, di diversi edifici affetti da patologie da condensa. Al fine di individuare linee guida efficaci per la risoluzione del problema sono stati individuati tra di essi quattro casi-tipo, rappresentativi dell'intero campione. I casi di studio selezionati sono localizzati nelle città di Ancona, Jesi e Fabriano.

La Tabella 1 ne riporta le caratteristiche, raggruppate in quattro livelli:

- *Caratteristiche generali*: localizzazione, anno di costruzione, normativa vigente all'epoca relativi agli standard energetici, tipologia edilizia, numero di piani, numero e superficie degli appartamenti di cui è composto l'immobile, zona climatica, rapporto S/V tra superficie disperdente e volume riscaldato;
- *Involucro edilizio*: informazioni riguardanti l'involucro edilizio e la tipologia di struttura portante;
- *Ventilazione e riscaldamento*: informazioni sulla modalità di ricambio dell'aria e tipologia di impianto di riscaldamento.
- *Interventi subiti*: anno in cui sono stati effettuati eventuali interventi sul caso di studio e tipo di interventi.

Sono state individuate varie unità immobiliari all'interno di ogni caso di studio per effettuare dei confronti e per una migliore interpretazione dei dati.

Tabella 1. Caratteristiche dei casi di studio.

Codice	A	B	C	D
Luogo	Ancona	Jesi	Fabriano	Ancona
Anno costruz.	2004	2002	1991	1930
Norma isolam.	L.10/91+Decr.	L.10/91+Decr.	L.373/76+Decr.	–
Tipologia	Schiera	Pluripiano	Pluripiano	Isolato
n° piani	2	6	4	2
n° alloggi	12	21	9	4
n. totale utenti	51	76	63	13
Superficie (mq)	1178	1735	648	244
ZONA CLIM.	D	D	E	D
S/V	1,10	0,75	0,85	1,03
Tipo struttura	C.a.	C.a.	C.a.	Muratura
Primo solaio	Contro terra	Su garage	Su garage	Contro terra
Tipo parete	Cassetta	Cassetta	Cassetta	Muratura
Tipo vetro	4–9–4	3–9–4	4–8–4	5–12–5
Tipo copertura	Piano	Falde	Piano	Falde
Ventilazione	Naturale	Naturale	Naturale	Naturale
Tipo impianto	Autonomo	Autonomo	Autonomo	Autonomo
Anno interv.	2012	–	1999	1997
Tipo interv.	Esalazione cucine	Nessuno	Adeg.sismico	Solai, infissi

## 2.2. Presentazione di un caso di studio (edificio A)

Al fine di spiegare nel dettaglio i metodi adottati e i risultati ottenuti, nel presente lavoro si presentano dettagliatamente solo le caratteristiche e i risultati relativi al caso di studio A, mentre per gli altri casi si riportano solo dati e osservazioni di sintesi e confronto.

Il caso di studio A è un edificio multifamiliare situato ad Ancona in via Sacripanti 2/A ed è composto da 12 appartamenti con superficie variabile da circa 81 a 96 m<sup>2</sup>. Il complesso è stato realizzato nel 2004. La struttura portante è in cemento armato, i solai sono in latero-cemento e le mura-ture di tamponamento sono a cassetta, con finitura esterna in parte ad intonaco e in parte in laterizio faccia a vista.

Gli appartamenti del caso di studio A (Figura 3) sono stati suddivisi in tre tipologie: “lato sud” con superficie di circa 81 m<sup>2</sup> (Appartamenti A2, A4, A6, A8); “lato nord” con superficie di 96m<sup>2</sup> (Appartamenti A1, A3, A5, A7) e “lato est” con superficie varia (Appartamenti A9, A10, A11, A12).



Il presente studio è stato focalizzato sulle tipologie lato sud e lato nord con l'obiettivo di individuare, all'interno della stessa tipologia, appartamenti con uguale esposizione, analoga tamponatura esterna e differente tipologia di utenza. Gli appartamenti studiati si sviluppano su due piani e il tipo di occupazione è molto varia. L'appartamento A1 (nord) è senza utenti da mesi. L'appartamento A3, (nord) è stato scelto per confronto con l'appartamento A1 in quanto presenta stessa geometria ma è occupato da 5 utenti, 2 adulti e 3 minori. L'appartamento A5 (nord) è disabitato. In questo caso, le analisi hanno interessato solo il prelievo di campioni di materiale. L'appartamento A7 (nord) è occupato da 4 persone, 3 adulti e 1 minore. L'appartamento A2 (sud) è abitato da 3 adulti. L'appartamento A4 (sud) ospita 5 occupanti, 2 adulti e 3 minori. L'appartamento A6, (sud) è abitato da 6 utenti, 2 adulti e 4 minori. L'appartamento A8 (sud) è abitato da 4 utenti, 1 adulto e 3 minori.

Le stratigrafie degli elementi costruttivi per l'edificio A sono riportate in Tabella 2 e in Figura 4. Le pareti M1 interessano il lato sud, compreso il blocco scale; le pareti M2 sono principalmente sul lato esposto a nord.



Figura 3. Appartamenti del caso di studio A.

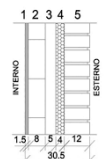
**Tabella 2.** Parametri dell'involucro. Spessore (s); Trasmittanza termica (U); i valori U<sub>lim</sub> sono stati ricavati dall'Appendice B del DM 26/6/2015 (zona climatica D). \*Valori misurati in opera.

Nome Elem.	Isolante (spessore)	s (m)	U <sub>th</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	U <sub>lim</sub> (W/m <sup>2</sup> K)
M1	XPS (4cm)	0,305	0,506 (0,57)*	0,36
M2	SP (3,5 cm)	0,325	0,353 (0,45)*	0,36
S1	XPS (3,5 cm)	0,350	0,602	0,36
S2	EPS (4 cm)	0,350	0,609	0,36
S3	ASSENTE	0,345	1,529	0,8
S4	XPS (5cm)	0,390	0,606	0,28
S5	XPS (3,5 cm)	0,400	0,474	0,28
S6	ASSENTE	0,515	1,248	0,36

In Tabella 2 vengono elencati i parametri termici degli elementi costruttivi dell'involucro esterno. I valori di trasmittanza stazionaria sono superiori rispetto a quelli richiesti dalle normative vigenti (d.m. 26/6/15).

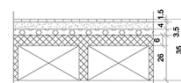
**M1 MURATURA FACCIA VISTA IN OPERA**

- 1 - Intonaco di calce e gesso 1,5cm
- 2 - Blocchi in laterizio 8,0cm
- 3 - Intercapedine d'aria non ventilata 5,0cm
- 4 - Polistirene espanso estruso (XPS) 4,0cm
- 5 - Mattoni pieni faccia a vista 12,0cm



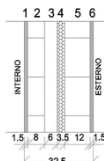
**S1 PAVIMENTO SU VESPAIO DEBOLMENTE VENTILATO**

- 1 Piastrelle di ceramica
- 2 Malta cementizia magra di sottofondo
- 3 Polistirene espanso estruso da 35kg/mc con pelle
- 4 Soletta mista da 20cm in laterizio + 6cm nervature in cemento armato



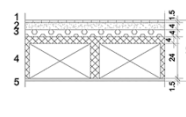
**M2 MURATURA INTONACATA IN OPERA**

- 1 - Intonaco di calce e gesso 1,0cm
- 2 - Blocchi in laterizio 8,0cm
- 3 - Intercapedine d'aria non ventilata 6,0cm
- 4 - Isolante termico in schiuma poliuretanicca 3,5cm
- 5 - Blocchi in laterizio 12,0cm
- 6 - Intonaco di cemento, sabbia e calce 1,5cm



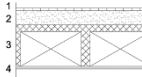
**S2 SOLAIO SU PORTICO**

- 1 Piastrelle di ceramica
- 2 Malta cementizia magra di sottofondo
- 3 Polistirene espanso in lastre stampate per termocompressione da 30 kg/mc
- 4 Soletta mista da 20cm in laterizio + 4cm nervature in cemento armato
- 5 Intonaco di calce e gesso



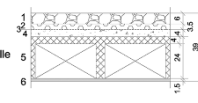
**S3 SOLAIO TRA AMBIENTI ABITATI**

- 1 Piastrelle di ceramica
- 2 Malta cementizia magra di sottofondo
- 3 Soletta mista da 20cm in laterizio + 4cm nervature in cemento armato
- 4 Intonaco di calce e gesso



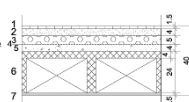
**S5 COPERTURA NON PRATICABILE**

- 1 Ghiaia lavata
- 2 Polistirene espanso estruso da 35kg/mc con pelle
- 3 Asfalto (per impermeabilizzazione) 0,5cm
- 4 Cfs di sabbia e ghiaia 2200 per pareti interne
- 5 Soletta mista da 20cm in laterizio + 4cm nervature in cemento armato
- 6 Intonaco di calce e gesso



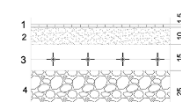
**S4 COPERTURA PRATICABILE**

- 1 Piastrelle di ceramica
- 2 Malta cementizia magra di sottofondo
- 3 Polistirene espanso estruso da 35kg/mc con pelle
- 4 Asfalto (per impermeabilizzazione) 0,5cm
- 5 Cfs di sabbia e ghiaia 2200 per pareti interne
- 6 Soletta mista da 20cm in laterizio + 4cm nervature in cemento armato
- 7 Intonaco di calce e gesso



**S6 SOLETTA SU VESPAIO**

- 1 Piastrelle di ceramica
- 2 Malta cementizia magra di sottofondo
- 3 Soletta con rete elettrosaldata ø6/20x20"
- 4 Vespaio 25 cm



**Figura 4.** Stratigrafie di pareti e solai.

## Metodi e strumenti

Nel presente capitolo vengono descritte le prove effettuate, i riferimenti normativi e gli strumenti utilizzati.

Il lavoro ha previsto le seguenti fasi:

— *Analisi in situ*

Gli edifici sono stati sottoposti ad indagini sperimentali in situ con tecniche diagnostiche non distruttive. L'analisi termografica ha permesso di individuare la presenza di punti di infiltrazione d'acqua e ponti termici. Per tutti i casi di studio è stata misurata la trasmittanza termica delle pareti perimetrali ed è stata confrontata con il suo valore teorico in condizioni non invecchiate. Sono stati misurati i parametri termo-igrometrici ambientali, i livelli di comfort e la permeabilità all'aria dell'involucro esterno in appartamenti rappresentativi.

— *Analisi in laboratorio*

Sono stati estratti campioni di materiale dalle pareti perimetrali tramite carotaggio. I campioni sono stati analizzati in laboratorio per misurare le proprietà termo-fisiche. I campioni di isolamento termico sono stati confrontati con analoghi campioni di materiale nuovo, per valutare eventuali degradi subiti nel tempo e gli effetti sulla conducibilità termica, adsorbimento igroscopico e densità apparente.

— *Verifiche analitiche*

Per tutti gli appartamenti studiati è stata valutata la prestazione igrometrica dei pacchetti funzionali dell'involucro esterno attraverso l'analisi stazionaria (verifica di Glaser) ed è stato verificato il rischio di germinazione delle spore tramite simulazioni igrometriche

dinamiche prendendo in considerazione le condizioni ambientali rilevate durante il monitoraggio in opera.

Inoltre sono state effettuate delle simulazioni termiche in regime semi-stazionario e dinamico su alcuni appartamenti per verificare consumi energetici, temperature ambientali interne e i livelli di comfort termico a seguito di interventi di retrofit alternativi. I costi dell'investimento iniziale, di manutenzione e quelli connessi ai consumi di riscaldamento, sono stati utili per il calcolo dei costi globali degli interventi.

### 3.1. Analisi in situ

#### 3.1.1. *Analisi termografica*<sup>1</sup>

La termografia è una tecnica diagnostica non distruttiva che sfrutta il principio fisico secondo il quale qualsiasi corpo con temperatura superiore allo zero assoluto ( $-273,14^{\circ}\text{C}$ ) emette energia sotto forma di radiazione infrarossa. La termo camera, convertendo l'energia emessa da un corpo in un segnale digitale, fornisce la mappatura termica dell'oggetto attraverso una gradualità di colori proporzionali alle temperature superficiali rilevate. In questo modo possono essere facilmente evidenziate eventuali discontinuità termiche causate dalla presenza di difetti esecutivi o danneggiamenti. I principali parametri fisici che influenzano la corretta misurazione della temperatura di un oggetto sono l'emissività e la temperatura ambientale. L'emissività è la capacità che ha un corpo di emettere radiazioni elettromagnetiche e dipende da caratteristiche superficiali, dal materiale e dalla temperatura. Il valore di emissività è compreso nell'intervallo  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  e rappresenta la misura di quanto il comportamento di una superficie è approssimabile a quello di un corpo nero ( $\varepsilon = 1$ ). I corpi reali non raggiungono mai l'emissività del corpo nero perché essi non solo emettono ma riflettono ed eventualmente trasmettono le radiazioni ( $\varepsilon + \rho + \tau = 1$ ). Quest'ultimo contributo è spesso trascurabile ( $\varepsilon + \rho \approx 1$ ). In generale le superfici opache non metalliche riflettono poco ed hanno emissività elevata ( $\varepsilon$  intorno a 0,8). Se in un ambiente sono presenti superfici altamente

1. Prova condotta a cura del Prof. Ing. Costanzo Di Perna.