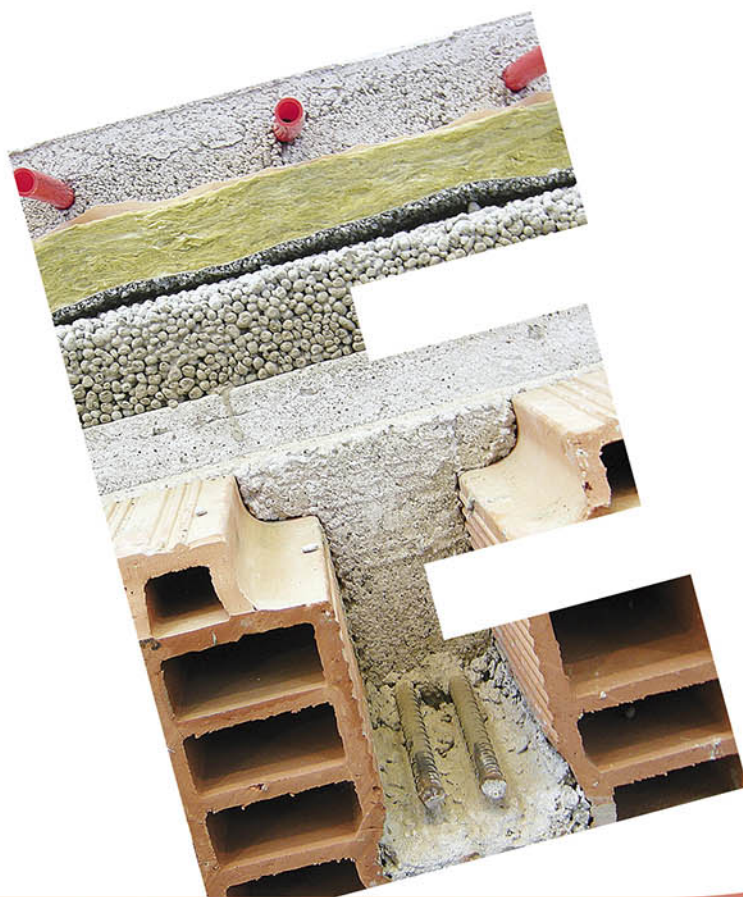


Elena Lucchi

RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Diagnostica e interventi

[Scheda sul sito >](#)



- Involucro opaco e trasparente ✓
- Materiali e componenti edilizi ✓
- Tecniche di riqualificazione energetica ✓
- Riferimenti legislativi e normativi ✓



Elena Lucchi

RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Diagnostica e interventi



Dario Flaccovio Editore

Elena Lucchi

RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Diagnostica e interventi

ISBN 978-88-579-0273-9

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: aprile 2014

Lucchi, Elena <1975->

Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio : diagnostica e interventi / Elena Lucchi. -

Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0273-9

1. Energia – Consumo. 2. Edifici – Impianti tecnici.

696 CDD-22

SBN PAL0267212

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, aprile 2014

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Indice

Premessa

Parte Prima – Riqualificazione energetica degli edifici

1. Legislazione ed efficienza energetica

| | | |
|--|---|----|
| 1.1. Politiche europee in materia di energia e ambiente | » | 3 |
| 1.2. Politiche europee in materia di efficienza energetica dell'edilizia | » | 7 |
| 1.2.1. Direttiva 2002/91/CE | » | 8 |
| 1.2.2. Direttiva 2006/32/CE | » | 9 |
| 1.2.3. Direttiva 2009/28/CE | » | 10 |
| 1.2.4. Direttiva 2010/31/UE | » | 10 |
| 1.2.5. Direttiva 2012/27/UE | » | 11 |
| 1.2.6. Armonizzazione della normativa | » | 12 |
| 1.3. Politiche nazionali in materia di efficienza energetica dell'edilizia | » | 13 |
| 1.3.1. Requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici .. | » | 15 |
| 1.3.2. Certificazione energetica degli edifici | » | 17 |
| 1.3.3. Fonti energetiche rinnovabili | » | 18 |
| 1.4. Detrazioni fiscali | » | 19 |
| 1.5. Protocolli per la riqualificazione energetica | » | 19 |
| 1.5.1. Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)..... | » | 19 |
| 1.5.2. Passivhaus Institut – EnerPHit | » | 20 |
| 1.5.3. CasaClima R..... | » | 21 |

Parte Seconda – Involucro opaco

2. Materiali e componenti edilizi

| | | |
|-----------------------------------|---|----|
| 2.1. Introduzione | » | 25 |
| 2.2. Elementi di supporto | » | 25 |
| 2.2.1. Blocchi in laterizio | » | 25 |
| 2.2.1.1. Mattoni pieni | » | 26 |
| 2.2.1.2. Mattoni semipieni | » | 26 |

| | | | |
|----------|---|---|----|
| 2.2.1.3. | Mattoni forati..... | » | 27 |
| 2.2.1.4. | Murature armate | » | 28 |
| 2.2.1.5. | Laterizio alleggerito..... | » | 28 |
| 2.2.1.6. | Laterizio rettificato | » | 30 |
| 2.2.1.7. | Laterizio termico | » | 31 |
| 2.2.2. | Blocchi prefabbricati in calcestruzzo | » | 32 |
| 2.2.2.1. | Calcestruzzo alleggerito | » | 33 |
| 2.2.2.2. | Calcestruzzo cellulare..... | » | 33 |
| 2.2.3. | Blocchi cassero..... | » | 34 |
| 2.2.4. | Balle di paglia..... | » | 35 |
| 2.2.5. | Solai..... | » | 35 |
| 2.2.5.1. | Solaio gettato in opera..... | » | 36 |
| 2.2.5.2. | Solaio in travetti prefabbricati | » | 36 |
| 2.2.6. | Tegole..... | » | 37 |
| 2.3. | Materiali isolanti | » | 38 |
| 2.3.1. | Isolanti organici di origine naturale | » | 40 |
| 2.3.1.1. | Fibra e lana di legno | » | 41 |
| 2.3.1.2. | Legno mineralizzato | » | 43 |
| 2.3.1.3. | Fibre naturali | » | 44 |
| 2.3.1.4. | Canna palustre | » | 47 |
| 2.3.1.5. | Fibra di cellulosa | » | 48 |
| 2.3.1.6. | Lana di pecora | » | 49 |
| 2.3.1.7. | Sughero..... | » | 49 |
| 2.3.2. | Isolanti organici di origine sintetica | » | 53 |
| 2.3.2.1. | Fibra di poliestere | » | 54 |
| 2.3.2.2. | Polistirene espanso | » | 54 |
| 2.3.2.3. | Poliuretano espanso | » | 55 |
| 2.3.2.4. | Espanzi modificati..... | » | 57 |
| 2.3.2.5. | Resine fenoliche | » | 58 |
| 2.3.3. | Isolanti inorganici di origine naturale | » | 60 |
| 2.3.3.1. | Vermiculite espansa..... | » | 60 |
| 2.3.3.2. | Argilla espansa | » | 61 |
| 2.3.3.3. | Perlite espansa | » | 62 |
| 2.3.3.4. | Pomice naturale | » | 63 |
| 2.3.4. | Isolanti inorganici di origine sintetica..... | » | 64 |
| 2.3.4.1. | Fibra di vetro | » | 64 |
| 2.3.4.2. | Lana di roccia | » | 65 |
| 2.3.4.3. | Vetro cellulare espanso..... | » | 66 |
| 2.3.4.4. | Silicato di calcio | » | 67 |
| 2.3.5. | Isolanti di nuova generazione..... | » | 68 |
| 2.3.5.1. | Vacuum Insulating Panels (VIP)..... | » | 69 |
| 2.3.5.2. | Aerogel | » | 69 |
| 2.3.5.3. | Phase Change Materials (PCM) | » | 70 |
| 2.3.5.4. | Isolanti riflettenti | » | 70 |

| | | | |
|--|---|---|-----|
| 2.3.6. | Comparazione prestazionale | » | 72 |
| 2.4. | Intonaci | » | 75 |
| 2.4.1. | Intonaco tradizionale | » | 76 |
| 2.4.2. | Intonaco ai silicati | » | 77 |
| 2.4.3. | Intonaco termoisolante | » | 78 |
| 2.4.4. | Intonaco traspirante | » | 79 |
| 2.4.5. | Intonaco macro-poroso | » | 80 |
| 2.4.6. | Protettivo silossanico | » | 81 |
| 2.5. | Materiali impermeabilizzanti | » | 82 |
| 2.5.1. | Membrane polimeriche modificate | » | 82 |
| 2.5.1.1. | Membrane termoplastiche | » | 83 |
| 2.5.1.2. | Leghe di poliolefine | » | 84 |
| 2.5.1.3. | Membrane elastoplastiche | » | 84 |
| 2.5.2. | Membrane in bitume polimero | » | 86 |
| 2.5.3. | Membrane termoadesive | » | 88 |
| 2.5.4. | Impermeabilizzanti liquidi | » | 89 |
| 2.5.5. | Termo-membrane a risparmio energetico | » | 90 |
| | | | |
| 3. Requisiti prestazionali dell'involucro opaco | | | |
| 3.1. | Evoluzione dell'involucro edilizio opaco | » | 93 |
| 3.1.1. | Chiusure verticali perimetrali | » | 100 |
| 3.1.2. | Chiusure verticali interne | » | 104 |
| 3.1.3. | Chiusure orizzontali inferiori | » | 104 |
| 3.1.4. | Chiusure orizzontali superiori | » | 107 |
| 3.1.5. | Chiusure orizzontali intermedie | » | 113 |
| 3.1.6. | Ponti termici | » | 113 |
| 3.2. | Prestazioni attese | » | 115 |
| 3.2.1. | Resistenza meccanica | » | 116 |
| 3.2.2. | Tenuta all'acqua | » | 118 |
| 3.2.3. | Resistenza al vento | » | 121 |
| 3.2.4. | Permeabilità all'aria | » | 122 |
| 3.2.5. | Isolamento termico | » | 123 |
| 3.2.6. | Accumulo termico | » | 130 |
| 3.2.7. | Controllo igrometrico | » | 135 |
| 3.2.8. | Isolamento acustico | » | 140 |
| 3.2.8.1. | Isolamento acustico | » | 141 |
| 3.2.8.2. | Assorbimento acustico | » | 143 |
| 3.2.8.3. | Isolamento da impatto | » | 145 |
| 3.2.8.4. | Isolamento dal rumore prodotto dagli impianti | » | 146 |
| 3.2.9. | Stabilità al fuoco | » | 150 |
| 3.2.10. | Sicurezza antintrusione | » | 151 |
| 3.2.11. | Aspetto estetico | » | 151 |
| 3.2.12. | Durabilità | » | 153 |
| 3.3. | Comparazione prestazionale | » | 153 |
| 3.4. | Marchatura CE | » | 153 |

4. Riqualificazione energetica dell'involucro opaco

| | | | |
|----------|--|---|-----|
| 4.1. | Introduzione..... | » | 157 |
| 4.2. | Chiusura verticale..... | » | 157 |
| 4.2.1. | Sistema composito di isolamento a cappotto..... | » | 158 |
| 4.2.1.1. | Criteri progettuali..... | » | 161 |
| 4.2.1.2. | Posa in opera..... | » | 164 |
| 4.2.1.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 165 |
| 4.2.1.4. | Costi..... | » | 165 |
| 4.2.2. | Recupero del sistema di isolamento a cappotto esistente..... | » | 166 |
| 4.2.2.1. | Criteri progettuali..... | » | 169 |
| 4.2.2.2. | Posa in opera..... | » | 170 |
| 4.2.2.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 171 |
| 4.2.2.4. | Costi..... | » | 171 |
| 4.2.3. | Facciata ventilata..... | » | 172 |
| 4.2.3.1. | Criteri progettuali..... | » | 175 |
| 4.2.3.2. | Posa in opera..... | » | 176 |
| 4.2.3.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 178 |
| 4.2.3.4. | Costi..... | » | 178 |
| 4.2.4. | Facciata verde..... | » | 178 |
| 4.2.4.1. | Criteri progettuali..... | » | 182 |
| 4.2.4.2. | Posa in opera..... | » | 185 |
| 4.2.4.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 185 |
| 4.2.4.4. | Costi..... | » | 185 |
| 4.2.5. | Insufflaggio di materiale isolante in intercapedine..... | » | 186 |
| 4.2.5.1. | Criteri progettuali..... | » | 189 |
| 4.2.5.2. | Posa in opera..... | » | 190 |
| 4.2.5.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 191 |
| 4.2.5.4. | Costi..... | » | 191 |
| 4.2.6. | Isolamento dall'interno con lastre coibenti..... | » | 191 |
| 4.2.6.1. | Criteri progettuali..... | » | 196 |
| 4.2.6.2. | Posa in opera..... | » | 198 |
| 4.2.6.3. | Costi..... | » | 199 |
| 4.2.7. | Isolamento dall'interno o dall'esterno con intonaco termoisolante..... | » | 199 |
| 4.2.7.1. | Criteri progettuali..... | » | 203 |
| 4.2.7.2. | Posa in opera..... | » | 203 |
| 4.2.7.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 204 |
| 4.2.7.4. | Costi..... | » | 204 |
| 4.2.8. | Correzione dei ponti termici..... | » | 205 |
| 4.2.8.1. | Criteri progettuali..... | » | 207 |
| 4.2.8.2. | Posa in opera..... | » | 207 |
| 4.2.8.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 208 |
| 4.2.8.4. | Costi..... | » | 208 |
| 4.2.9. | Isolamento del sottofinestra..... | » | 208 |
| 4.2.9.1. | Criteri progettuali..... | » | 211 |
| 4.2.9.2. | Posa in opera..... | » | 212 |

| | |
|---|-------|
| 4.2.9.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 212 |
| 4.2.9.4. Costi..... | » 212 |
| 4.2.10. Isolamento del cassonetto..... | » 213 |
| 4.2.10.1. Criteri progettuali | » 215 |
| 4.2.10.2. Posa in opera..... | » 215 |
| 4.2.10.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 215 |
| 4.2.10.4. Costi..... | » 216 |
| 4.2.11. Isolamento delle spallette delle finestre | » 216 |
| 4.2.11.1. Criteri progettuali | » 218 |
| 4.2.11.2. Posa in opera..... | » 219 |
| 4.2.11.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 219 |
| 4.2.11.4. Costi..... | » 219 |
| 4.3. Chiusura orizzontale inferiore | » 219 |
| 4.3.1. Isolamento a estradosso..... | » 220 |
| 4.3.1.1. Criteri progettuali | » 222 |
| 4.3.1.2. Posa in opera..... | » 224 |
| 4.3.1.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 224 |
| 4.3.1.4. Costi..... | » 224 |
| 4.3.2. Isolamento a intradosso..... | » 225 |
| 4.3.2.1. Criteri progettuali | » 227 |
| 4.3.2.2. Posa in opera..... | » 227 |
| 4.3.2.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 228 |
| 4.3.2.4. Costi..... | » 228 |
| 4.3.3. Rifacimento | » 228 |
| 4.3.3.1. Criteri progettuali | » 231 |
| 4.3.3.2. Posa in opera..... | » 232 |
| 4.3.3.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 233 |
| 4.3.3.4. Costi..... | » 233 |
| 4.4. Chiusura orizzontale superiore di tipo continuo | » 233 |
| 4.4.1. Tetto rovescio..... | » 233 |
| 4.4.1.1. Criteri progettuali | » 236 |
| 4.4.1.2. Posa in opera..... | » 237 |
| 4.4.1.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 238 |
| 4.4.1.4. Costi..... | » 238 |
| 4.4.2. Tetto caldo..... | » 238 |
| 4.4.2.1. Criteri progettuali | » 240 |
| 4.4.2.2. Posa in opera..... | » 241 |
| 4.4.2.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 243 |
| 4.4.2.4. Costi..... | » 243 |
| 4.4.3. Tetto verde..... | » 243 |
| 4.4.3.1. Criteri progettuali | » 246 |
| 4.4.3.2. Posa in opera..... | » 247 |
| 4.4.3.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 248 |
| 4.4.3.4. Costi..... | » 249 |
| 4.5. Chiusura orizzontale superiore di tipo discontinuo | » 249 |

| | | |
|----------|--|-------|
| 4.5.1. | Isolamento a estradosso con isolante sotto-tegola..... | » 249 |
| 4.5.1.1. | Criteri progettuali | » 251 |
| 4.5.1.2. | Posa in opera..... | » 252 |
| 4.5.1.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » 254 |
| 4.5.1.4. | Costi..... | » 254 |
| 4.5.2. | Copertura isolata e ventilata..... | » 254 |
| 4.5.2.1. | Criteri progettuali | » 257 |
| 4.5.2.2. | Posa in opera..... | » 259 |
| 4.5.2.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » 260 |
| 4.5.2.4. | Costi..... | » 260 |
| 4.6. | Chiusura orizzontale intermedia | » 261 |
| 4.6.1. | Isolamento a estradosso..... | » 261 |
| 4.6.1.1. | Criteri progettuali | » 263 |
| 4.6.1.2. | Posa in opera..... | » 263 |
| 4.6.1.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » 263 |
| 4.6.1.4. | Costi..... | » 264 |
| 4.6.2. | Isolamento a intradosso..... | » 264 |
| 4.6.2.1. | Criteri progettuali | » 266 |
| 4.6.2.2. | Posa in opera..... | » 267 |
| 4.6.2.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » 268 |
| 4.6.2.4. | Costi..... | » 268 |

Parte Terza – Involucro trasparente

5. Vetri e sistemi di vetrazione

| | | |
|--------|---|-------|
| 5.1. | Vetri tradizionali | » 271 |
| 5.1.1. | Vetro tirato | » 281 |
| 5.1.2. | Vetro colato | » 282 |
| 5.1.3. | Vetro float..... | » 282 |
| 5.1.4. | Vetro retinato..... | » 284 |
| 5.1.5. | Vetro profilato a U..... | » 286 |
| 5.1.6. | Vetro decorativo..... | » 286 |
| 5.2. | Vetri evoluti | » 290 |
| 5.2.1. | Vetro di sicurezza..... | » 290 |
| 5.2.2. | Vetro basso emissivo..... | » 292 |
| 5.2.3. | Vetro riflettente a controllo solare..... | » 296 |
| 5.2.4. | Vetro selettivo a controllo solare | » 300 |
| 5.2.5. | Vetro antincendio | » 301 |
| 5.2.6. | Vetro fotovoltaico | » 302 |
| 5.2.7. | Vetro autopulente | » 304 |
| 5.2.8. | Vetro luminoso | » 305 |
| 5.2.9. | Vetro a produzione termica | » 306 |
| 5.3. | Materiali ad alte prestazioni termiche..... | » 306 |
| 5.3.1. | Transparent insulating materials | » 306 |

| | | |
|--|---|-------|
| 5.3.1.1. | Aerogel | » 306 |
| 5.3.1.2. | Sistemi geometrici complessi | » 309 |
| 5.3.2. | Vetro sotto-vuoto..... | » 314 |
| 5.4. | Materiali a prestazioni variabili | » 316 |
| 5.4.1. | Materiali cromogenici | » 316 |
| 5.4.1.1. | Vetro fotocromico | » 317 |
| 5.4.1.2. | Vetro termocromico..... | » 318 |
| 5.4.1.3. | Vetro elettrocromico | » 319 |
| 5.4.2. | Reflective hydrides..... | » 320 |
| 5.4.3. | Suspended particle display..... | » 320 |
| 5.4.4. | Vetro a cristalli liquidi..... | » 323 |
| 5.5. | Pellicole plastiche | » 324 |
| 5.5.1. | Pellicola anti-UV..... | » 324 |
| 5.5.2. | Pellicola a controllo solare..... | » 324 |
| 5.5.3. | Pellicola basso emissiva | » 326 |
| 5.5.4. | Pellicola olografica..... | » 326 |
| 5.6. | Materiali plastici | » 327 |
| 5.6.1. | Nanopolimeri..... | » 327 |
| 5.6.2. | Materiali a controllo solare | » 328 |
| 5.6.3. | Materiali prismatici | » 329 |
| | | |
| 6. Telai e componenti aggiuntivi | | |
| 6.1. | Introduzione..... | » 331 |
| 6.2. | Telai in legno | » 331 |
| 6.2.1. | Legno massello..... | » 333 |
| 6.2.2. | Legno lamellare..... | » 335 |
| 6.3. | Telai in PVC | » 338 |
| 6.4. | Telai in metallo | » 340 |
| 6.4.1. | Alluminio | » 341 |
| 6.4.2. | Acciaio | » 342 |
| 6.5. | Telai misti..... | » 344 |
| 6.6. | Comparazione prestazionale..... | » 346 |
| 6.7. | Distanziatori..... | » 346 |
| 6.8. | Intercapedini | » 349 |
| 6.9. | Guarnizioni | » 350 |
| 6.10. | Sigillanti..... | » 351 |
| | | |
| 7. Requisiti prestazionali del sistema finestra | | |
| 7.1. | Evoluzione del sistema finestra | » 353 |
| 7.2. | Tipologie di finestre..... | » 363 |
| 7.3. | Prestazioni attese | » 373 |
| 7.3.1. | Resistenza meccanica..... | » 374 |
| 7.3.1.1. | Classi di resistenza meccanica..... | » 375 |
| 7.3.2. | Tenuta all'acqua | » 377 |
| 7.3.2.1. | Classi di tenuta all'acqua..... | » 383 |

| | | |
|---|---|-------|
| 7.3.3. | Resistenza al vento | » 384 |
| 7.3.3.1. | Classi di resistenza al vento | » 384 |
| 7.3.4. | Permeabilità all'aria | » 386 |
| 7.3.4.1. | Classi di permeabilità all'aria | » 388 |
| 7.3.5. | Resistenza ambientale | » 389 |
| 7.3.6. | Trasmissione luminosa | » 390 |
| 7.3.7. | Isolamento termico | » 392 |
| 7.3.7.1. | Trasmittanza termica di vetri singoli e multipli | » 394 |
| 7.3.7.2. | Trasmittanza termica di finestre singole e doppie | » 398 |
| 7.3.7.2.1. | Finestra singola | » 398 |
| 7.3.7.2.2. | Doppia finestra | » 399 |
| 7.3.7.3. | Finestra con sistema di oscuramento | » 400 |
| 7.3.7.4. | Trasmittanza termica dei telai | » 401 |
| 7.3.8. | Controllo solare | » 402 |
| 7.3.8.1. | Apporti solari su vetri e finestre | » 403 |
| 7.3.9. | Isolamento acustico | » 404 |
| 7.3.9.1. | Classi di isolamento acustico | » 406 |
| 7.3.10. | Resistenza all'effrazione | » 407 |
| 7.3.10.1. | Classi di resistenza all'effrazione | » 410 |
| 7.3.11. | Resistenza al fuoco | » 411 |
| 7.4. | Comparazione prestazionale | » 413 |
| 7.5. | Marcatura CE | » 413 |
| 7.5.1. | Vetri | » 415 |
| 7.5.2. | Finestre | » 418 |
| 7.6. | Impatto ambientale | » 422 |
| 8. Posa e installazione degli infissi | | |
| 8.1. | Normativa tecnica | » 425 |
| 8.2. | Problematiche di posa e installazione | » 428 |
| 8.3. | Posa in opera del serramento | » 437 |
| 8.3.1. | Verifiche preliminari | » 439 |
| 8.3.2. | Fissaggio | » 439 |
| 8.4. | Posizione della finestra nel vano murario | » 440 |
| 8.4.1. | Posizione a filo del muro esterno | » 440 |
| 8.4.2. | Posizione a filo del muro interno | » 446 |
| 8.4.3. | Posizione intermedia | » 448 |
| 8.5. | Sostituzione del serramento | » 459 |
| 8.6. | Verifiche e controlli | » 459 |
| 8.7. | Descrizioni di capitolato | » 460 |
| 9. Riqualficazione energetica dell'involucro trasparente | | |
| 9.1. | Introduzione | » 463 |
| 9.2. | Permeabilità all'aria e tenuta all'acqua | » 464 |
| 9.2.1. | Inserimento di guarnizioni complementari | » 465 |
| 9.2.1.1. | Criteri progettuali | » 467 |

| | | | |
|----------|---|---|-----|
| 9.2.1.2. | Posa in opera..... | » | 468 |
| 9.2.1.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 468 |
| 9.2.1.4. | Costi..... | » | 469 |
| 9.2.2. | Formazione di un giunto aperto | » | 469 |
| 9.2.2.1. | Criteri progettuali | » | 471 |
| 9.2.2.2. | Posa in opera..... | » | 471 |
| 9.2.2.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 472 |
| 9.2.2.4. | Costi..... | » | 472 |
| 9.2.3. | Inserimento di materiale sigillante in battuta | » | 472 |
| 9.2.3.1. | Criteri progettuali | » | 474 |
| 9.2.3.2. | Posa in opera..... | » | 475 |
| 9.2.3.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 475 |
| 9.2.3.4. | Costi | » | 475 |
| 9.3. | Isolamento termico e controllo solare..... | » | 476 |
| 9.3.1. | Recupero e manutenzione del serramento esistente | » | 476 |
| 9.3.1.1. | Criteri progettuali | » | 478 |
| 9.3.1.2. | Posa in opera..... | » | 479 |
| 9.3.1.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 479 |
| 9.3.1.4. | Costi..... | » | 479 |
| 9.3.2. | Inserimento di una pellicola in materiale plastico..... | » | 479 |
| 9.3.2.1. | Criteri progettuali | » | 483 |
| 9.3.2.2. | Posa in opera..... | » | 484 |
| 9.3.2.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 485 |
| 9.3.2.4. | Costi..... | » | 485 |
| 9.3.3. | Sostituzione del vetro | » | 485 |
| 9.3.3.1. | Criteri progettuali | » | 488 |
| 9.3.3.2. | Posa in opera..... | » | 488 |
| 9.3.3.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 490 |
| 9.3.3.4. | Costi..... | » | 490 |
| 9.3.4. | Installazione di un contro-vetro..... | » | 490 |
| 9.3.4.1. | Criteri progettuali | » | 493 |
| 9.3.4.2. | Posa in opera..... | » | 494 |
| 9.3.4.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 495 |
| 9.3.4.4. | Costi..... | » | 495 |
| 9.3.5. | Sostituzione del serramento | » | 495 |
| 9.3.5.1. | Criteri progettuali | » | 499 |
| 9.3.5.2. | Posa in opera..... | » | 500 |
| 9.3.5.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 501 |
| 9.3.5.4. | Costi..... | » | 501 |
| 9.3.6. | Installazione di schermature solari | » | 501 |
| 9.3.6.1. | Criteri progettuali | » | 505 |
| 9.3.6.2. | Posa in opera..... | » | 509 |
| 9.3.6.3. | Benefici di risparmio energetico..... | » | 510 |
| 9.3.6.4. | Costi..... | » | 510 |
| 9.3.7. | Installazione di tende..... | » | 510 |

Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio

| | |
|--|-------|
| 9.3.7.1. Criteri progettuali | » 513 |
| 9.3.7.2. Posa in opera..... | » 514 |
| 9.3.7.3. Benefici di risparmio energetico..... | » 515 |
| 9.3.7.4. Costi..... | » 515 |
| Glossario | » 517 |
| Riferimenti legislativi | » 525 |
| Riferimenti normativi..... | » 525 |
| Bibliografia | » 541 |
| Elenco siti internet | » 547 |

Premessa

Efficienza energetica, comfort microclimatico, sostenibilità ambientale e risparmio economico sono aspetti strettamente correlati nella progettazione e nella gestione del patrimonio edilizio costruito. La qualità energetica, grazie all'attenzione crescente offerta dalle normative europee e nazionali, è diventata un elemento attrattore del settore edilizio in relazione sia alla nuova costruzione sia alla riqualificazione dell'esistente. Un ruolo importante, in questo senso, è stato svolto dalla Direttiva EPDB nelle sue diverse edizioni (2002 e 2010) e dalle leggi che, a cominciare dal D.Lgs. 192/2005, hanno avviato il suo recepimento a livello nazionale. L'applicazione cogente della certificazione energetica ha contribuito ulteriormente a confermare l'interesse verso un'edilizia caratterizzata da elevate prestazioni energetiche, intesa come garanzia per il contenimento dei consumi da fonte fossile e delle emissioni climalteranti. Più recentemente, l'obbligatorietà di costruire edifici a energia quasi zero, oltre alla progressiva diffusione di standard normativi e di protocolli volontari per la riqualificazione ad alta efficienza, ha dimostrato i benefici in termini economici, ambientali e sociali di un recupero consapevole. Grazie a tutte queste misure, negli ultimi anni, si è assistito a una progressiva accelerazione del processo di rinnovamento dell'intera filiera edilizia, dalla progettazione alla realizzazione, proponendo un modello che diffonde una maggiore consapevolezza ambientale e gestionale.

In questo senso, diviene necessario avviare un processo di riqualificazione dell'intero comparto edilizio, attraverso la scelta di tecnologie costruttive e impiantistiche appropriate dal punto di vista dell'integrazione e della compatibilità con il patrimonio esistente. In particolare, l'ottimizzazione energetica può partire proprio dall'involucro edilizio, attuando misure passive che consentano di risparmiare energia e di migliorare il benessere degli abitanti.

L'involucro edilizio ha acquisito un ruolo primario nel processo di qualificazione scenografica e tecnologica dell'architettura. Nei diversi periodi storici, la facciata ha assunto significati e funzioni differenti divenendo, di volta in volta, limite, confine, rivestimento superficiale, soglia, filtro, diaframma, pelle sensibile e strumento di interazione dinamica tra l'edificio e l'ambiente. In passato, predominava una logica progettuale di tipo conservativo e difensivo. Le spese pareti perimetrali in laterizio o in pietra costituivano una barriera fisica ed energetica tra

lo spazio domestico e la città. Le parti opache, dotate di funzioni strutturali, avevano il sopravvento su quelle trasparenti, che dovevano garantire l'illuminazione, l'aerazione e l'igiene dei locali interni. Questa tipologia ha caratterizzato la storia dell'architettura, fino all'avvento dei principi di trasparenza e di dematerializzazione teorizzati dal Movimento Moderno. A partire da questi anni, l'involucro è divenuto sempre più un elemento di connessione dinamica che regola le prestazioni interne in funzione delle condizioni climatiche esterne. In questi ultimi anni, l'evoluzione e l'innovazione hanno portato allo sviluppo di sistemi sempre più performanti, efficienti e integrati con l'edificio.

La corretta riqualificazione energetica rappresenta un primo passo importante verso una progettazione integrata e sostenibile dell'edificio. La riduzione del fabbisogno energetico lascia al progettista una maggiore flessibilità per scelte impiantistiche innovative che faranno sempre più ricorso a fonti rinnovabili, le uniche sulle quali si potrà contare nel lungo periodo. In questo senso, la corretta progettazione ed esecuzione dell'involucro edilizio, in termini energetici, rappresenta un primo passo importante verso una scelta concretamente sostenibile.

La presente pubblicazione nasce dall'esperienza professionale e di ricerca svolta dall'Autrice nell'ultimo decennio presso il Politecnico di Milano, l'Universidad Politècnica de Catalunya di Barcellona e l'Universidad Politècnica de Valencia.

Il testo vuole fornire un supporto pratico e completo per il progettista tecnico che deve decidere come intervenire sul patrimonio edilizio esistente. Il libro restituisce una visione completa e aggiornata delle più moderne tecnologie di riqualificazione energetica dell'involucro edilizio esistente, indicando i materiali, i sistemi, i componenti, le metodologie costruttive, le normative di riferimento e le procedure operative più indicate per ottenere risultati affidabili.

Il libro è suddiviso in tre parti che si riferiscono rispettivamente alla normativa di settore e alla riqualificazione energetica dell'involucro opaco e trasparente. La prima parte approfondisce gli aspetti legislativi e le richieste normative che pongono dei vincoli operativi. In seguito, si affronta nel dettaglio il tema della riqualificazione dell'involucro edilizio, suddiviso nella sua classificazione più tradizionale di parte opaca e trasparente. Esso, infatti, svolge importanti funzioni per garantire la qualità dell'abitare, in quanto governa i flussi energetici nelle diverse stagioni, controlla gli scambi termoisolometrici, garantisce la ventilazione e l'illuminazione naturale e riduce la trasmissione del rumore nell'ambiente interno. In entrambi i casi, l'involucro edilizio è analizzato dal punto di vista di prestazioni attese, strumenti di diagnosi energetica, criteri progettuali, tecniche di riqualificazione, materiali e componenti edilizi utilizzabili, procedure di certificazione ambientale, modalità di corretta esecuzione e sistemi di valutazione economica. Completa l'informazione un ricco corredo grafico e fotografico che illustra nel dettaglio i particolari costruttivi, i materiali, le tecniche di intervento, gli errori di posa e gli esempi concreti di *retrofit* energetico dell'involucro edilizio.

PARTE PRIMA
Riqualificazione energetica degli edifici

1. Legislazione ed efficienza energetica

1.1. Politiche europee in materia di energia e ambiente

Il concetto di sostenibilità ambientale, enunciato per la prima volta dal Rapporto Brundtland (WCED, 1987), nel corso del tempo si è arricchito di significati economici, culturali, politici e sociali. Documento chiave in questo senso è il protocollo di Kyoto (1997), che contiene obiettivi vincolanti e quantificati di contenimento dei gas a effetto serra¹ per ovviare al fenomeno del cambiamento climatico, una delle maggiori sfide che l'umanità dovrà affrontare nei prossimi anni. A partire da questo trattato, le politiche dell'Unione Europea sono state indirizzate verso la promozione di un'economia caratterizzata da bassi consumi energetici, diversificata, competitiva, sostenibile e capace di contrastare gli effetti e le cause dei cambiamenti climatici e del surriscaldamento globale. Per raggiungere questi obiettivi sono state introdotte molteplici azioni comunitarie che prevedono l'adozione di meccanismi flessibili per acquisire crediti di emissioni da altre Nazioni², la sicu-

¹ Il protocollo di Kyoto è un trattato internazionale in materia ambientale stipulato a Kyoto, in Giappone, nel dicembre 1997, durante la Conferenza COP3 della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC). La Comunità Europea ha firmato il protocollo il 29 aprile 1998. Il protocollo è stato ratificato dai Paesi firmatari il 31 maggio 2002 ed è entrato in vigore il 16 febbraio 2005, dopo l'adesione della Russia. Il documento costituisce uno dei più importanti strumenti giuridici internazionali volti a combattere i cambiamenti climatici. Il trattato prevede l'obbligo per i Paesi industrializzati di operare nel periodo 2008-2012 una riduzione e una limitazione delle emissioni di gas a effetto serra, quali biossido di carbonio (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O), idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC) e esafluoro di zolfo (SF₆), in una misura non inferiore al 5,2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990. Gli Stati europei si sono impegnati a limitare le emissioni climalteranti collettive dell'8,0%. In occasione della diciottesima Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP18), tenutasi a Doha (Qatar) tra il 26 novembre e il 7 dicembre 2012, i rappresentanti dei 194 Paesi partecipanti ai negoziati hanno approvato l'estensione del protocollo di Kyoto al 2020.

² I Paesi che hanno ratificato il documento, al fine di raggiungere il loro obiettivo di riduzione, possono avvalersi anche dei cosiddetti *meccanismi flessibili*, ovvero di misure volte alla minimizzazione delle emissioni climalteranti ottenibili a parità di investimento. Il sistema di meccanismi flessibili per l'acquisizione di crediti di emissioni comprende le seguenti misure:

– *Clean Development Mechanism* (CDM): consente alle nazioni industrializzate con un'economia in transizione di realizzare dei progetti sostenibili nei paesi in via di sviluppo, al fine di produrre

rezza e la diversificazione dell'approvvigionamento energetico³, l'efficienza e la riduzione dei consumi nel settore dei trasporti e della mobilità, la responsabilizzazione delle imprese senza comprometterne la competitività, la gestione sostenibile del territorio⁴, il sostegno all'agricoltura e alle attività di ricerca, sensibilizzazione e pianificazione nei settori chiave del risparmio energetico, ovvero nella residenza, nel terziario, nell'industria e nei trasporti⁵.

benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di gas serra e di sviluppo economico e sociale. I Paesi che promuovono gli interventi generano crediti di emissione (CER);

– *Joint Implementation* (JI): consente alle nazioni industrializzate con un'economia in transizione di realizzare progetti per ridurre le emissioni di gas serra in un altro paese appartenente allo stesso gruppo e di utilizzare i crediti derivanti congiuntamente con lo Stato ospite;

– *Emissions Trading* (ET): consente lo scambio di crediti di emissione tra nazioni industrializzate con economia in transizione. Un Paese che ha ridotto le proprie emissioni di gas serra in una quota superiore al proprio obiettivo può cedere i crediti acquisiti a un altro che non è riuscito a rispettare gli impegni ambientali presi.

³ Il Libro Verde della Commissione Europea, *Verso una strategia europea di sicurezza dell'approvvigionamento energetico* (29 novembre 2000) per far fronte al problema della dipendenza energetica dell'Unione Europea da prodotti importati, propone una strategia di sicurezza dell'approvvigionamento destinata a ridurre i rischi legati a questa dipendenza esterna. Le misure da considerare prevedono il controllo della domanda grazie all'incoraggiamento di veri e propri cambiamenti nel comportamento dei consumatori, lo sviluppo delle fonti rinnovabili, il rafforzamento delle scorte strategiche, la diversificazione delle vie di importazione per gli idrocarburi e l'avvio di un'analisi sul contributo a medio termine dell'energia nucleare. Successivamente, con la Direttiva 2006/67/CE del Consiglio, si stabilisce l'obbligo per gli Stati membri di mantenere un livello minimo di scorte di petrolio greggio e/o di prodotti petroliferi equivalenti ad almeno 90 giorni del consumo interno giornaliero medio nel corso dell'anno precedente.

⁴ In quest'ambito, il progetto "Agenda 21" propone un programma completo e integrato di azioni da intraprendere a tutti i livelli di governo e di amministrazione del territorio su tutti i settori in cui la presenza umana produce un impatto ambientale (Conferenza ONU, 1992). L'elemento innovativo riguarda il coinvolgimento più ampio possibile dei portatori di interesse che operano su un determinato territorio. La Carta di Aalborg (approvata nella conferenza europea sulle città sostenibili che si svolse ad Aalborg dal 24 al 27 maggio 1994) avvia l'impegno delle amministrazioni locali ad attuare l'Agenda 21 e a elaborare piani d'azione a lungo termine per uno sviluppo sostenibile.

⁵ Il Libro Verde sull'efficienza energetica *Fare di più con meno* della Commissione Europea (22 giugno 2005) ha avviato un dibattito su modi efficienti di utilizzare l'energia, riconoscendo un potenziale di risparmio di energia primaria entro il 2020 pari al 20% del consumo totale del 1990. Il documento, dopo aver analizzato approfonditamente dei consumi energetici in Europa, sintetizza gli assi per rafforzare il programma di promozione dell'efficienza energetica in tutti i livelli della società. Le misure da intraprendere riguardano l'incentivazione del mercato, lo sviluppo dei servizi energetici, l'esempio dato dal settore pubblico e la diffusione di informazioni e di attività di formazione sulle tecnologie avanzate per migliorare la consapevolezza del risparmio energetico. Il Libro Verde *Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura* (8 marzo 2006), oltre a sottolineare l'importanza di favorire il mix energetico, la sicurezza dell'approvvigionamento, il rafforzamento della competitività dell'industria, lo sviluppo di una rete di fornitori di energia e di una comunità paneuropea dell'energia, vuole portare l'Unione Europea all'avanguardia nella lotta contro il cambiamento climatico. Nell'ambito del sostegno alla ricerca e all'innovazione, il documento lancia il Settimo Programma Quadro che è incentrato in particolare sullo sviluppo di nuove

Gli studi effettuati nell'ambito del Sesto Programma Quadro dell'Unione Europea (2002-2006) hanno dimostrato che per stabilizzare i cambiamenti climatici è necessario ridurre le emissioni climalteranti di circa il 70% rispetto ai livelli del 1990. A partire da queste indagini, sono state avviate una serie di attività di pianificazione strategica a scala comunitaria. In primo luogo, è stato pubblicato il *Piano d'azione per l'efficienza energetica: concretizzare le potenzialità* (2006) che propone delle misure tangibili per migliorare l'efficienza energetica nei settori più energivori, quali il comparto residenziale, gli elettrodomestici, gli impianti elettrici e meccanici, i veicoli, la mobilità lenta e sostenibile e gli usi finali di energia⁶.

Lo studio integrato di consumi energetici e emissioni climalteranti⁷ ha portato all'elaborazione di un piano strategico (Piano SET) per accelerare lo sviluppo e la diffusione di tecnologie a basso tenore di carbonio e per affrontare le problematiche della mitigazione e dell'adattamento climatico⁸. Gli elementi chiave in questo

tecnologie volte a migliorare la produzione e il consumo di energia. Inoltre, la Commissione si impegna a elaborare un piano strategico per le tecnologie energetiche con l'obiettivo di strutturare gli sforzi di ricerca nel settore energetico e di facilitare la corretta applicazione commerciale delle nuove tecnologie.

⁶ Il *Piano d'azione per l'efficienza energetica: concretizzare le potenzialità* è stato pubblicato con la Comunicazione della Commissione del 19 ottobre 2006. Le politiche e le misure contenute si basano sugli studi elaborati nell'ambito dei Libri Verdi dedicati al settore dell'energia (2000; 2005 e 2006) che hanno consentito di raccogliere gli spunti, le opinioni e le analisi necessarie per varare il documento. Secondo questi studi, i più consistenti risparmi energetici possono essere realizzati negli edifici residenziali e commerciali (potenziale di riduzione stimato rispettivamente del 27% e del 30%), nell'industria manifatturiera (25%) e nel settore dei trasporti (26%). Per questa ragione, il piano mira a ridurre del 20% la domanda annua di energia primaria entro il 2020, agendo in modo mirato sul consumo e sull'approvvigionamento (rispetto alle proiezioni sul consumo energetico per il 2020).

⁷ Per la lotta relativa ai cambiamenti climatici si vedano la convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) approvata con decisione 94/69/CE e la Comunicazione della Commissione del 9 febbraio 2005, *Vincere la battaglia contro i cambiamenti climatici*. Le politiche e le ricerche relative al cambiamento climatico sono state sviluppate poi nel Libro Verde *L'adattamento ai cambiamenti climatici in Europa: quali possibilità di intervento per l'Unione Europea* della Commissione Europea (29 giugno 2007), in cui sono esposte le linee di azione per attenuare l'impatto dei cambiamenti climatici e per ridurre le emissioni di gas serra, limitando l'aumento della temperatura media terrestre a 2 °C rispetto ai livelli dell'epoca preindustriale. Secondo questa stima, i settori che risentono maggiormente delle conseguenze legate ai cambiamenti climatici sono l'energia, il consumo energetico, l'agricoltura, la silvicoltura, la pesca, il turismo, la sanità, i servizi finanziari e le assicurazioni.

⁸ Il Piano Strategico è annunciato nella Comunicazione della Commissione del 10 gennaio 2007, *Verso un piano strategico europeo per le tecnologie energetiche* e approvato dal Parlamento europeo e dai capi di Stato e di governo in occasione del Consiglio del marzo 2007. In quest'occasione viene adottato un pacchetto su energia e cambiamenti climatici che prevede di approvare due obiettivi piuttosto ambiziosi entro il 2020: un accordo unilaterale da parte dell'Unione Europea per ridurre di almeno il 20% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990 (o del 30% a condizione che venga concluso un accordo internazionale sui cambiamenti climatici) e un obiettivo vincolante

contesto sono il settore dei trasporti, l'edilizia, la pianificazione territoriale e la sensibilizzazione dei consumatori a favore di comportamenti di razionalizzazione energetica.

In linea con questi documenti, nell'intento di adottare una politica integrata tra le questioni energetiche e ambientali, nel dicembre del 2008 l'Unione Europea ha adottato una strategia integrata in materia di energia e cambiamenti climatici, che fissa obiettivi ambiziosi per il 2020 (*Pacchetto per il clima e l'energia*, 2008), al fine di sviluppare un'economia sostenibile e improntata ai criteri di efficienza energetica⁹. Il piano unisce le misure del *Piano d'azione per l'efficienza energetica* (2006b) con quelle del *Piano strategico per le tecnologie energetiche* (2007c), fissando obiettivi di riduzione delle emissioni climalteranti e dei consumi energetici e di aumento della produzione totale di energia. I settori prioritari per ottenere questo risultato riguardano l'efficienza energetica degli edifici, i trasporti, la pianificazione urbana, la gestione efficiente dell'illuminazione pubblica e privata e le apparecchiature elettriche. È particolarmente significativo il fatto che la Commissione Europea abbia individuato l'efficienza e la competitività energetica come motori di crescita per combattere la crisi economica che interessa l'intero continente¹⁰. Nonostante queste politiche, gli studi europei hanno

di incrementare del 20% la produzione da fonti rinnovabili (compreso un obiettivo del 10% per i biocarburanti). Le proposte concrete per ottenere questi risultati sono presentate con la Comunicazione della Commissione del 22 novembre 2007, *Un piano strategico europeo per le tecnologie energetiche (Piano SET). Verso un futuro a bassa emissione di carbonio*. Il piano comprende misure in materia di pianificazione, attuazione, risorse e cooperazione internazionale in relazione alle tecnologie energetiche da realizzare a breve e a lungo termine. Le politiche da adottare a breve termine comprendono il potenziamento della ricerca sulle tecnologie a basso impatto ambientale, in particolare sui biocarburanti di seconda generazione, sulla cattura, il trasporto e lo stoccaggio del carbonio, sull'integrazione delle fonti rinnovabili nella rete elettrica e sull'efficacia energetica nell'edilizia, nei trasporti e nell'industria. Le politiche a lungo termine devono concentrarsi sulla competitività delle nuove tecnologie per le fonti rinnovabili, lo stoccaggio energetico, la sostenibilità dell'energia di fissione e di fusione e lo sviluppo delle reti trans-europee dell'energia. Un ultimo elemento importante del piano è l'aumento delle risorse finanziarie e umane da dedicare al settore dell'energia. L'Unione Europea, nell'ambito del Settimo Programma Quadro di finanziamento a favore della ricerca e dello sviluppo tecnologico (2007-2013), ha stanziato notevoli sovvenzioni per la ricerca nelle tecnologie energetiche a tasso di carbonio basso o pari a zero. Tra di esse si possono ricordare il sottoprogramma europeo *Energia intelligente per Europa*, che prevede finanziamenti per la ricerca in materia di energia e per la promozione dei risparmi energetici e i finanziamenti della Banca Europea per gli Investimenti (BEI) che sostiene progetti nei Paesi dell'Unione Europea.

⁹ Il Pacchetto per il clima e l'energia è stato approvato con la Decisione della Commissione Promuovere la crescita e l'occupazione rispettando gli impegni in materia di cambiamenti climatici, del 23 gennaio 2008. Il documento presenta il nuovo approccio strategico integrato che propone di combinare le politiche energetiche e di lotta al cambiamento climatico. Al suo interno è definita una serie di nuovi strumenti per conseguire i cosiddetti obiettivi 20/20/20.

¹⁰ La Comunicazione della Commissione del 3 marzo 2010, *Europa 2020: una strategia per una crescita intelligente, sostenibile, inclusiva*, mira a uscire dalla crisi economica e a creare le condizioni per uno sviluppo economico intelligente, sostenibile e solidale. Gli obiettivi riguardano

dimostrato che l'obiettivo del 20/20/20 era ancora molto lontano dal suo raggiungimento. Per questo è stato approvato il *Piano di efficienza energetica 2011*¹¹, che prevede l'adozione di una più rigida politica energetica, oltre che del controllo e coordinamento dell'Unione. A ciascuno Stato viene lasciata la possibilità di definire il programma nazionale.

Infine, il Parlamento Europeo ha approvato un progetto della European Climate Foundation *ROADMAP 2050 guida pratica a un'Europa prosperosa a basse emissioni di carbonio* (2012) che afferma la necessità di sviluppare nuove politiche in materia di energia, trasporti e agricoltura per ridurre le emissioni di CO₂ e migliorare l'*Emissions Trading System* (ETS) al fine di rendere l'economia più competitiva e meno dipendente dalle energie fossili¹².

1.2. Politiche europee in materia di efficienza energetica dell'edilizia

Lo stile di vita dei paesi industrializzati è altamente energivoro e gli edifici contribuiscono in maniera sostanziale: “il riscaldamento e l'illuminazione degli edifici assorbono la maggior parte del consumo di energia (42%, di cui il 70% per il riscaldamento) e producono il 35% delle emissioni complessive di gas serra. Gli edifici e l'ambiente costruito utilizzano la metà dei materiali estratti dalla crosta terrestre e producono ogni anno 450 milioni di tonnellate di rifiuti da costruzione e da demolizione, ossia più di un quarto di tutti i rifiuti prodotti. [...] In Europa la popolazione trascorre quasi il 90% del proprio tempo all'interno degli edifici: una cattiva progettazione degli immobili o il ricorso a metodi di costruzione inadeguati può avere un effetto significativo sulla salute dei loro occupanti e può renderne estremamente costosa la manutenzione, il riscaldamento e il raffreddamento”¹³. Il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio edilizio esistente è una tematica urgente e attuale, sulla quale non è più possibile prescindere. Il traguardo degli obiettivi di risparmio energetico nel settore edilizio richiede una strategia integrata che può essere raggiunta solo con interventi da realizzare congiuntamente sul patrimonio esistente e di nuova costruzione. Studi recenti (Commissione Europea, 2005a; Ecofys, 2005; Eurostat, 2009; Cresme, 2011; Fasano, 2011), infatti, hanno dimostrato che agire imponendo limiti di con-

l'innalzamento del tasso di occupazione, l'aumento degli investimenti in ricerca e sviluppo, il raggiungimento dell'obiettivo 20/20/20 in ambito energetico, la riduzione degli abbandoni scolastici e l'aumento del livello di istruzione.

¹¹ Il piano è parte integrante e della strategia “Europa 2020” (Comunicazione della Commissione dell'8 marzo 2011).

¹² Il documento prevede una riduzione del 80-95% delle emissioni di CO₂ entro il 2050 e per farlo fissa delle tappe di riduzione delle emissioni: 40% entro il 2030, 60% entro il 2040 e 80% al 2050.

¹³ Comunicazione della Commissione delle Comunità Europee al Consiglio, al Parlamento europeo, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle Regioni, Bruxelles, 2004.

sumo energetico solo alle nuove edificazioni non è sufficiente per raggiungere questi obiettivi. Le azioni necessarie, pertanto, non possono prescindere dall'intervento di risanamento energetico dello stock edilizio esistente.

Lo studio di queste potenzialità ha portato alla realizzazione di diverse direttive riguardanti il settore delle costruzioni. Le misure uniscono politiche a scala globale e locale, con l'intento di individuare procedure di diagnosi, metodi di calcolo, normative, modelli di intervento condivisi da applicare a scala comunitaria, nazionale e locale.

1.2.1. Direttiva 2002/91/CE

La Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo sulle prestazioni energetiche degli edifici (*Energy Performance of Buildings Directive*, EPBD) pone ordine su tutte le questioni legate alla valutazione del rendimento energetico degli edifici, sottolineando la necessità di definire metodologie armonizzate per la stima dei consumi energetici, che siano caratterizzate da differenze locali, inerenti gli aspetti tecno-morfologici dell'immobile, le condizioni climatiche e microclimatiche, la destinazione d'uso, l'accessibilità e l'efficacia sotto il profilo dei costi. Le disposizioni interne prevedono le seguenti misure:

- obbligatorietà della certificazione energetica degli immobili in caso di costruzione, ristrutturazione o compravendita;
- necessità di introduzione di una metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici;
- applicazione graduale di requisiti minimi di prestazione energetica differenziati per gli interventi di nuova costruzione e per la ristrutturazione edilizia;
- ispezione periodica degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva.

Secondo tale visione, la certificazione deve essere basata su una metodologia di calcolo del rendimento energetico armonizzata a livello nazionale. Tale procedura deve essere trasparente e confrontabile di analisi della qualità energetica degli edifici in condizioni standard di utilizzo. Lo strumento consente di valutare e confrontare il rendimento energetico degli immobili su una scala di range prestabiliti (classi energetiche). Nelle nuove costruzioni l'obbligatorietà della certificazione energetica nasce dall'esigenza di incrementare le prestazioni del comparto edilizio europeo, mentre negli edifici esistenti nasce dalla necessità di riquilificare in chiave energetica l'edilizia tradizionale.

L'introduzione di requisiti minimi di rendimento energetico degli edifici, ovvero di prestazioni termofisiche minime per i diversi componenti dell'involucro edilizio e dell'impianto, può essere differente (a discrezione delle adozioni a livello nazionale) per gli edifici di nuova costruzione ed esistenti in base all'uso, al clima locale e all'età dell'immobile (art. 1). La definizione dei requisiti si concentra

sull'involucro edilizio proprio per sottolineare l'importanza delle misure passive nella riduzione dei consumi e nell'innalzamento delle condizioni di comfort. Tali requisiti devono essere rivisti con scadenza regolare per considerare i progressi della diagnostica e della tecnologia (almeno ogni 5 anni).

Le prescrizioni legislative possono non essere applicate ad alcune categorie di fabbricati tra cui gli edifici monumentali, i luoghi di culto, i monumenti protetti come patrimonio designato o in virtù dello speciale valore architettonico o storico, nei casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe "un'alterazione inaccettabile del loro carattere e aspetto" (art. 4). Tutti gli altri edifici esistenti, invece, sono interamente sottoposti ai dettami della direttiva in modo differenziato in base alle dimensioni¹⁴. Il miglioramento può interessare anche solo alcune parti dell'edificio¹⁵ ma, così facendo, si perdono i benefici che possono derivare da un intervento complessivo e integrato. La Direttiva 2002/91/CE è stata sostituita con la 2010/31/CE (paragrafo 1.2.4).

1.2.2. Direttiva 2006/32/CE

La Direttiva 2006/32/CE, *L'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici*, mira a raggiungere l'obiettivo di risparmio energetico rafforzando il miglioramento, sotto il profilo costi/benefici, dell'efficienza degli usi finali dell'energia. Gli Stati membri devono mirare a conseguire un obiettivo nazionale indicativo globale di risparmio energetico, pari al 9% entro il 2015 tramite servizi energetici e ad altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica, tra cui:

- promozione dell'offerta di servizi energetici e incentivazione della domanda;
- valorizzazione del ruolo svolto dal settore pubblico che deve comunicare efficientemente a cittadini e imprese le azioni intraprese, pubblicare orientamenti in materia di efficienza energetica e risparmio energetico come possibile criterio di valutazione in sede di aggiudicazione di appalti pubblici e affidare a

¹⁴ Gli edifici esistenti "di grande metratura", con una superficie superiore a 1.000 m² che subiscono "ristrutturazioni importanti" devono migliorare il rendimento energetico "al fine di soddisfare i requisiti minimi per quanto tecnicamente, funzionalmente ed economicamente fattibile" (art.6). I requisiti possono essere fissati per l'edificio nel complesso o per i componenti ristrutturati. Per "ristrutturazione importante" si intende un intervento per cui "il costo totale della ristrutturazione connesso con le murature esterne e/o gli impianti energetici [...] è superiore al 25% del valore dell'edificio [...] o quando una quota superiore al 25% delle murature esterne dell'edificio viene ristrutturata" (art. 1).

¹⁵ "Tuttavia, il miglioramento del rendimento energetico globale di un edificio esistente non implica necessariamente una completa ristrutturazione dell'edificio e potrebbe invece limitarsi alle parti che sono più specificamente pertinenti ai fini del rendimento energetico dell'edificio e che rispondono al criterio costi/efficienza" (art. 14).

uno o più organismi la responsabilità amministrativa, gestionale ed esecutiva dell'integrazione degli obblighi di miglioramento dell'efficienza energetica (autorità per l'energia);

- realizzazione di sistemi di diagnosi energetica efficaci volti a individuare eventuali misure di miglioramento dell'efficienza energetica nel settore civile, commerciale e industriale.

Si sottolinea il ruolo esemplare che deve essere svolto dagli enti pubblici per la riqualificazione energetica. A questo scopo si impone loro di effettuare l'analisi energetica in caso di interventi di riqualificazione sul patrimonio esistente. La diagnosi è definita come una "procedura sistematica volta a fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo di un edificio, di un gruppo di edifici, di un'attività, di un impianto industriale o di un servizio pubblico o privato, a individuare e a quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e a riferire in merito ai risultati" (art. 1). Come per la certificazione, non è definita una procedura valida a livello europeo, ma viene lasciata la libertà ai diversi Stati di stabilire regole e metodi conformi con la legislazione nazionale, le procedure di certificazione energetica e le tecniche costruttive locali. La Direttiva 2006/32/CE è stata sostituita con la 2011/27/CE (paragrafo 1.2.5).

1.2.3. Direttiva 2009/28/CE

La Direttiva 2009/28/CE stabilisce un quadro comune per la produzione e la promozione energetica da fonti rinnovabili, fissando obiettivi nazionali obbligatori per ogni Nazione. Nello specifico, obbliga anche i diversi Stati membri ad adottare un piano nazionale per le energie rinnovabili.

1.2.4. Direttiva 2010/31/UE

La Direttiva 2010/31/CE sulla prestazione energetica degli edifici¹⁶ fissa obiettivi ancora più ambiziosi di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni climalteranti. Il documento mantiene inalterati gli obiettivi e i principi fondamentali della direttiva 2002/91/CE ma, per raggiungere lo scenario 20/20/20, amplia il raggio di applicazione e conferisce un ruolo primario al settore pubblico, che deve formare e sensibilizzare i cittadini dando il "buon esempio" di intervento. Le disposizioni interne prevedono le seguenti misure:

- autosufficienza energetica per le nuove costruzioni realizzate dopo il 31 di-

¹⁶ La Direttiva 2010/31/CE sulla prestazione energetica in edilizia è stata emanata dal Parlamento Europeo e da Consiglio il 19 maggio 2010 e ha abrogato la Direttiva 2002/91/CE. La direttiva è entrata in vigore il 9 luglio 2010.

- cembre 2020, tramite approvvigionamento da fonti rinnovabili (*Zero Energy Buildings* o *Near Zero Energy Buildings*¹⁷);
- obbligatorietà della certificazione energetica degli immobili in caso di costruzione, ristrutturazione, compravendita o locazione;
 - applicazione graduale di requisiti minimi di prestazione energetica differenziati per gli interventi di nuova costruzione e per la ristrutturazione edilizia;
 - ispezione periodica degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva.

Le misure proposte prevedono una forte accelerazione del processo di miglioramento energetico e sono diversificate per la nuova costruzione¹⁸ e il recupero del patrimonio esistente. In quest'ultimo caso, gli edifici tutelati e gli immobili adibiti a luoghi di culto e allo svolgimento di attività religiose possono essere esclusi dalle disposizioni di adeguamento energetico quando il raggiungimento degli standard legislativi implica un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto¹⁹. Anche in questo caso, gli Stati membri devono fissare dei requisiti minimi di prestazione energetica per il patrimonio edilizio esistente che, come nella Direttiva 2002/91/CE, si applicano all'edificio, all'unità immobiliare oggetto di ristrutturazione o agli elementi edilizi ristrutturati. Infine, viene ampliato il campo di applicazione di questi requisiti a tutti gli edifici sottoposti a ristrutturazioni importanti. L'obbligo di recepimento della nuova direttiva è stato fissato entro il 9 luglio 2012, anche se non sono ancora stati pubblicati gli strumenti attuativi nazionali.

1.2.5. Direttiva 2012/27/UE

La Direttiva 2012/27/UE rafforza ulteriormente gli obiettivi di efficienza energetica e di riduzione delle emissioni di gas serra previsti per il 2050, stabilendo un progressivo aumento del tasso delle ristrutturazioni immobiliari, specialmente nel settore pubblico²⁰. La direttiva sostituisce la 2006/32/CE e, sostanzialmen-

¹⁷ Gli edifici pubblici di nuova costruzione devono soddisfare questo requisito entro il 31 dicembre 2018.

¹⁸ In base a quanto previsto, le costruzioni realizzate dopo il 31 dicembre 2020 dovranno garantire l'autosufficienza energetica tramite l'approvvigionamento da fonti rinnovabili. Agli edifici pubblici, considerati come luoghi simbolici per la diffusione di una cultura della salvaguardia ambientale e per l'uso razionale delle risorse, si richiede che il target di "edifici a zero energia" venga raggiunto entro il 31 dicembre 2018. Per gli edifici di nuova costruzione è necessario valutare la fattibilità tecnica, ambientale ed economica di sistemi alternativi ad alta efficienza come fonti rinnovabili, cogenerazione, teleriscaldamento, tele-raffrescamento urbano o collettivo e pompe di calore.

¹⁹ "Gli Stati membri possono decidere di non fissare o di non applicare i requisiti minimi [...] negli edifici ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro particolare valore architettonico o storico, nella misura in cui il rispetto di determinati requisiti minimi di prestazione energetica implichi un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto e negli edifici adibiti a luoghi di culto e allo svolgimento di attività religiose" (art. 2).

²⁰ La Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sull'efficienza energetica è stata emanata il 25 ottobre 2012.



Figura 2.4
Protezione e isolamento dei ferri di armatura verticali



Figura 2.5. Isolamento dei ferri di armatura verticali

Da un punto di vista meccanico, la perdita di resistenza non crea problemi rilevanti. Infatti, un mattone pieno non alleggerito ha una resistenza a rottura per compressione pari a $300-400 \text{ kg/cm}^2$ ma, contemporaneamente, è difficile ottenere murature in mattoni pieni dotate di un carico di rottura per compressione superiore a 80 kg/cm^2 . Il blocco alleggerito, invece, ha una resistenza media a compressione pari a circa 100 kg/cm^2 . Sulla base di questo valore di resistenza è abbastanza semplice stimare la resistenza a compressione dell'intero muro che risulta pari a circa 50 kg/cm^2 .

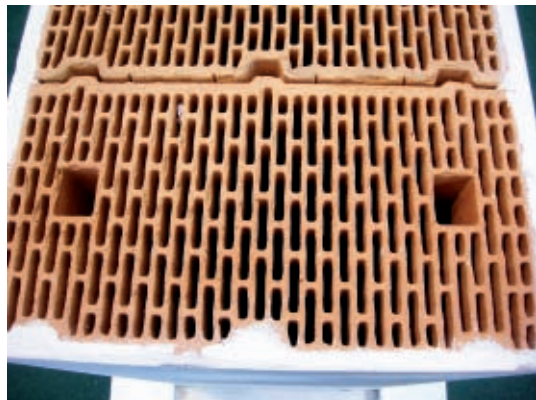


Figura 2.6
Blocchi in laterizio alleggerito

2.2.1.6. Laterizio rettificato

Il laterizio rettificato è un blocco in laterizio, generalmente a pasta porizzata, che ha subito un'ulteriore lavorazione post-cottura di rettifica delle facce, con un ordine di precisione dimensionale di ± 1 mm. Il processo avviene per consentire la posa a colla, anziché a malta (figura 2.7). A differenza dei blocchi che richiedono circa 1 cm di malta, i blocchi rettificati richiedono solo la presenza di 1 mm di collante, risparmiando il 90% della malta rispetto ai sistemi tradizionali.

Il giunto di malta presente nei laterizi tradizionali e alleggeriti ha una resistenza termica che può essere anche quattro volte superiore a quella del laterizio. Si forma così una situazione di ponte termico diffusa che abbassa notevolmente le proprietà termiche della parete. Nei laterizi rettificati, l'assenza di malta minimizza i ponti termici. Inoltre, anche il giunto verticale è sostituito dal semplice contatto piano tra un blocco e l'altro o da un sistema d'incastri che ostacolano la formazione di ponti termici. La muratura è dotata di caratteristiche omogenee e costanti su tutta la superficie. I blocchi di circa 30 centimetri hanno una trasmittanza termica di circa 0,5-0,6 W/m²K. Il guadagno totale stimato supera del 20% l'isolamento termico di una normale muratura a posa tradizionale di pari spessore.

I tempi di posa sono ridotti fino al 50% rispetto agli altri sistemi, con risparmi economici, gestionali ed esecutivi. Alcune aziende propongono anche un pre-assemblaggio in stabilimento delle intere porzioni murarie che costituiscono l'edificio. In cantiere è necessario effettuare il montaggio dei muri con una tec-



Figura 2.7
Blocchi
in laterizio
rettificato

nica simile a quella dei prefabbricati industriali. I tempi di costruzione vengono ulteriormente ridotti.

2.2.1.7. Laterizio termico

Molte aziende producono blocchi definiti *termici*, ovvero dotati di particolare capacità di isolamento termico delle costruzioni. Con questa terminologia ci si riferisce a blocchi a pasta semplice o porizzati, a posa tradizionale o con colle speciali. I sistemi sono accomunati da una particolare geometria dei fori e dell'intero blocco, che spesso presenta incastri maschio-femmina al giunto verticale per rompere il ponte termico. La trasmittanza varia da 0,54 a 0,44 W/m²K in relazione allo spessore.

Sono in produzione anche blocchi a taglio termico con l'integrazione del materiale isolante tra le due parti in laterizio, di cui una dotata di resistenza meccanica e l'altra di funzioni di rivestimento. Il materiale isolante può essere in sughero, polistirene espanso, lana di legno o fibra vegetale (figura 2.8).



Figura 2.8
Blocchi in laterizio termico

Un'ultima tipologia è costituita da blocchi compositi: si tratta di elementi porizzati in laterizio con isolamento termico integrato all'interno dei fori. Il materiale isolante può essere in sughero, lana di roccia, polistirene, perlite espansa, grafite o fibra vegetale (figure 2.9 e 2.10).

In tabella 2.1 è riportato uno schema delle tipologie di supporto murario in laterizio utilizzabili nelle pareti verticali.



Figura 2.9
Parete in blocchi compositi in laterizio
e materiale isolante



Figura 2.10
Dettaglio dell'isolamento in lana di roccia
inserito in blocchi compositi di laterizio

2.2.2. Blocchi prefabbricati in calcestruzzo

Analogamente a quanto accade nel laterizio, anche la produzione di blocchi di calcestruzzo ha avuto una grande innovazione negli ultimi decenni. I blocchi possono essere distinti in:

- calcestruzzo alleggerito;
- calcestruzzo cellulare.

Tabella 2.1. Tipologie di supporti murari in laterizio utilizzabili nelle pareti verticali. Materiale: laterizio

| Tipologia | Caratteristiche |
|-------------------|---|
| Mattoni pieni | Elementi di laterizio privi di fori o dotati di una foratura inferiore al 15% dell'area complessiva |
| Mattoni semipieni | Elementi in laterizio forato che devono essere posti in opera con i fori ortogonali al piano di posa. La percentuale di foratura varia tra 15-45% in relazione al tipo di laterizio |

| | |
|-----------------------|---|
| Mattoni forati | Elementi in laterizio leggero da porre in opera con i fori disposti orizzontalmente paralleli al piano di posa. L'area complessiva dei fori può arrivare fino al 70-75% dell'area totale della sezione di estrusione |
| Murature armate | Murature portanti in laterizio pensate per sopportare le sollecitazioni meccaniche tipiche delle zone sismiche, attraverso l'inserimento di ferri di armatura verticali e orizzontali |
| Laterizio alleggerito | Prodotti ottenuti mediante il processo di "porizzazione" che prevede la miscela dell'argilla con un materiale combustibile come carbone, polvere di legno, sfere di polistirolo espanso, farine fossili, farine di cellulosa o sansa esausta. Il materiale brucia completamente durante il processo di cottura, lasciando degli alveoli non comunicanti nell'impasto in laterizio, che migliorano le caratteristiche di isolamento termoacustico del blocco |
| Laterizio rettificato | Blocco in laterizio, generalmente a pasta porizzata, che ha subito un'ulteriore lavorazione post-cottura di rettifica delle facce di posa, con un ordine di precisione dimensionale di ± 1 mm. Il processo avviene per consentire la posa a colla, anziché a malta |
| Laterizio termico | Blocco a pasta semplice o porizzata di laterizio dotato di una particolare geometria dei fori che spesso presenta incastrì maschio-femmina al giunto verticale per rompere il ponte termico prodotto dalla malta |
| Laterizio composito | Blocco forato costituito da laterizio e da materiale isolante che riempie le forature esistenti |

2.2.2.1. Calcestruzzo alleggerito

I blocchi prefabbricati di calcestruzzo alleggerito sono costituiti da una miscela di calcestruzzo e prodotti minerali o sintetici, che ne migliorano le prestazioni energetiche e ne semplificano la posa in opera. I materiali maggiormente utilizzati sono l'argilla e il polistirene, entrambi espansi e resi in forma granulare. Una versione di dimensioni maggiori rispetto ai blocchi, invece, è costituita da una miscela di sabbia, acqua e polistirene che conferiscono alla massa leggerezza e isolamento termico. La produzione avviene inserendo la miscela in appositi stampi dove, mediante vibro-compressione, viene formato un materiale omogeneo e resistente. La conduttività termica degli elementi varia in funzione della massa volumica, raggiungendo valori compresi tra 0,15-0,30 W/mK con massa volumica fino a 1000 kg/m³ e tra 0,30-0,70 W/mK con massa volumica fino a 1700 kg/m³. Per garantire i requisiti minimi di isolamento termico previsti dalla legislazione attualmente in vigore, è necessario utilizzare spessori superiori a 45 centimetri oppure abbinare un ulteriore strato isolante di almeno 5 centimetri.

2.2.2.2. Calcestruzzo cellulare

Il calcestruzzo cellulare è un materiale interamente minerale prodotto a partire da una miscela di sabbia ad alto tenore di silice, acqua, cemento, calce e ossido di alluminio (figura 2.11). La miscela viene amalgamata in apposite vasche metalliche a bassa temperatura (20 °C), dove la reazione tra gli ossidi di calcio e di alluminio porta alla formazione di un gas che fa espandere il materiale, conferendogli la tradizionale struttura porosa. Dopo l'indurimento i blocchi

sono tagliati e formati in autoclave (da qui il nome *calcestruzzo cellulare autoclavato*). Il materiale è caratterizzato da un elevato numero di macro-pori a celle chiuse, che lo rendono leggero, resistente, isolante, permeabile all'acqua e durevole. La conducibilità termica è compresa tra 0,08-0,2 W/mK in relazione alla densità e al processo di produzione e il valore è costante nelle due direzioni di posa. La permeabilità all'acqua, invece, è molto elevata e per questa ragione i blocchi devono essere protetti quando sono esposti all'esterno o in ambienti umidi.



Figura 2.11
Calcestruzzo cellulare

In tabella 2.2 è riportato uno schema delle tipologie di supporto murario in calcestruzzo utilizzabili nelle pareti verticali.

Tabella 2.2. Tipologie di supporti murari in calcestruzzo utilizzabili nelle pareti verticali. Materiale: calcestruzzo

| Titolo | Caratteristiche |
|------------------------------------|---|
| Calcestruzzo alleggerito | Materiale costituito da una miscela di calcestruzzo e prodotti minerali o sintetici, come sabbia, acqua e polistirene |
| Calcestruzzo cellulare autoclavato | Materiale di natura minerale composto da silice, ossido di alluminio, ossido di calcio e acqua |

2.2.3. Blocchi cassero

I blocchi cassero sono elementi costruttivi a perdere di recente produzione, pen-

sati per rispondere alle normative in materia di efficienza energetica, anti-simica e acustica. Sono ottenuti da una miscela di cemento e di materiale isolante di vario genere, come fibre di legno o polistirene espanso. In molti casi, inoltre, le cavità sono riempite con isolante termico, come polistirene, argilla o fibra minerale. Il tipo di lavorazione conferisce un'elevata porosità e garantisce la buona traspirabilità della parete. I blocchi, a eccezione della prima fila che richiede malta per aumentarne la resistenza meccanica, sono posati a secco per velocizzare i tempi di costruzione e per eliminare completamente i ponti termici dovuti ai giunti di collegamento. Le cavità interne sono riempite con un getto di calcestruzzo e armate.

2.2.4. Balle di paglia

La paglia, nel corso del tempo, ha trovato un largo impiego nella realizzazione di adobe, ovvero di pareti realizzate in terra cruda, dove l'aggiunta di paglia conferiva ottime proprietà di resistenza a flessione e di isolamento termico. È un prodotto naturale rinnovabile annualmente, la cui produzione, in molti Paesi, è superiore alla richiesta. Per questa ragione, è reperibile a un costo molto basso (si può stimare che rispetto a un muro in mattoni costi circa sette volte meno). In edilizia viene utilizzata sotto forma di balle di medie dimensioni che, grazie alla presenza di aria, migliorano le prestazioni di isolamento termoacustico ($\lambda = 0,09 \text{ W/mK}$) e di inerzia termica. A titolo esemplificativo la trasmittanza termica di una parete di spessore 45 cm è pari a $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$. La paglia non emette sostanze inquinanti e nocive, è traspirante al vapore acqueo e ha un'alta resistenza a compressione. La massima resa si ottiene accoppiandola con intonaci a base di argilla e pitture naturali. I muri intonacati presentano addirittura un minor rischio di incendio rispetto ai muri tradizionali in legno, in quanto l'aria contenuta non è sufficiente per favorire il processo di combustione. Infine si può considerare anche la facilità di posa in opera, che non richiede manodopera particolarmente specializzata.

2.2.5. Solai

I materiali utilizzati nelle strutture orizzontali dei solai che separano i diversi piani di un edificio e come supporto alle coperture sono costituiti da elementi di forma parallelepipedica che devono essere posati in opera con i fori orizzontali. I sistemi hanno una percentuale di foratura compresa tra 60-75% e possono essere utilizzati come mattoni di alleggerimento o come elementi collaboranti

con la struttura. Lo spessore del blocco costituisce un dato importante di scelta perché è legato ai limiti massimi di luce libera tra i muri o le travi di appoggio del solaio, oltre i quali le sollecitazioni meccaniche sulle nervature in calcestruzzo armato tendono a superare le norme di sicurezza. Un altro importante elemento di scelta è la larghezza del blocco, che definisce la distanza fra le nervature. I materiali utilizzati nelle solette possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- elementi per solaio gettato in opera;
- elementi per solaio in travetti prefabbricati ed elementi interposti;
- elementi per solaio in pannelli prefabbricati.

2.2.5.1. Solaio gettato in opera

Il solaio gettato in opera è realizzato in laterocemento ed è costituito da un sistema di nervature di travetti paralleli in calcestruzzo armato (prefabbricati o meno) con funzione strutturale, alternati a elementi in laterizio che formano il piano su cui gettare la caldana di calcestruzzo armato di completamento. Il solaio si allestisce interamente in opera, usando elementi modulari in laterizio come i fondelli e i forati (o pignatte). I primi costituiscono il fondo del travetto in calcestruzzo e funzionano da cassero a perdere. In essi sono inseriti i ferri d'armatura opportunamente dimensionati. Le pignatte, invece, si appoggiano tra un travetto e l'altro fino a formare un piano su cui è stesa una rete elettrosaldata, dopodiché viene gettato il calcestruzzo. Trasmittanze tipiche di solai così composti sono di 1,4-1,75-1,96 W/m²K.

2.2.5.2. Solaio in travetti prefabbricati

La naturale evoluzione dei solai in laterocemento è rappresentata dai solai in travetti prefabbricati, in cui i travetti sono gettati in stabilimento e portati a piede d'opera, pronti per essere assemblati con le pignatte. In produzione esistono anche sistemi più complessi che includono in un unico elemento due pignatte e tre travetti già gettati. Un esempio di questo tipo è il solaio Predalle, costituito da una lastra di circa 5 centimetri in calcestruzzo armato e da prismi di polistirolo al posto delle pignatte, con funzione alleggerente e coibente (figura 2.12). Tra un prisma e l'altro è lasciato lo spazio per gettare il travetto portante in calcestruzzo, ma proprio questo forma un consistente sistema di ponti termici diffusi per l'intera superficie. Le trasmittanze termiche sono dell'ordine di 1,45-1,72-2,06 W/m²K.

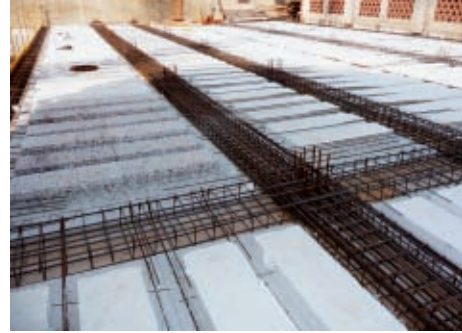


Figura 2.12
Solaio in travetti prefabbricati

2.2.6. Tegole

L'efficienza energetica di una copertura è connessa al comportamento igrometrico del laterizio di rivestimento, un materiale igroscopico capace di adsorbire parte del vapore acqueo contenuto nell'aria. L'acqua, dotata di conducibilità termica elevata, tende a inficiare le proprietà termofisiche dei materiali. Nelle coperture, la necessità di limitare le problematiche igroscopiche ha portato a sviluppare due tipi di strategie di controllo, basate su principi tra loro contrapposti. La prima sfrutta le tecnologie della ventilazione sottomanto come mezzo di dissipazione per ridurre l'accumulo igroscopico a carico dei materiali, mentre la seconda si affida all'impiego di barriere e di freni al vapore e all'aria, al fine di limitare gli scambi diffusivi e convettivi che possono portare alla condensazione superficiale o interstiziale dei sistemi non ventilati. Le coperture, normalmente, sono realizzate con laterizio a tegole curve (o coppi) (figura 2.13) o piane che, secondo la loro conformazione, acquisiscono diverse denominazioni (*portoghese, olandese, marsigliese e romana*). La differenza sostanziale tra le due categorie riguarda la forma e il tipo di giunzione tra gli elementi. Le tegole curve rappresentano la soluzione ideale per edifici con alto valore storico-architettonico e si adattano perfettamente anche alle coperture più complesse grazie alla morfologia degli elementi che consente un'ampia tolleranza di sovrapposizione longitudinale e trasversale. La tenuta agli agenti atmosferici dei coppi è affidata alla semplice sovrapposizione degli elementi. La messa in opera a doppio strato (per file convesse inferiormente e concave superiormente) consente la circolazione dell'aria nel sottotegola, smorzando gli effetti negativi legati al vento. Le tegole piane sono costituite da elementi piani incastrati tra loro su tre lati. Questa caratteristica garantisce una buona resistenza meccanica, agli agenti atmosferici e all'acqua. Grazie alle dimensioni ridotte possono adattarsi anche a forme complesse di copertura. In tabella 2.3 sono schematizzate le caratteristiche dei diversi sistemi di rivestimento della copertura.

Tabella 2.3. Tipologie di rivestimento delle coperture

| Tipologia | | Rivestimento |
|----------------------|--------------------|--|
| Tegole curve o coppi | | Elementi di laterizio a forma curva prodotti con la tecnica dello stampaggio o per estrusione del laterizio |
| Tegole piane | Tegola portoghese | Elemento piano in laterizio costituito da una parte piana che garantisce una buona superficie di deflusso e scorrimento dell'acqua piovana e da una parte convessa che conferisce un'adeguata resistenza meccanica all'elemento, oltre al caratteristico effetto estetico a onda |
| | Tegola marsigliese | Elemento piano in laterizio con forma leggermente arcuata |
| | Tegola olandese | Elemento piano in laterizio costituito da una parte convessa ad arco ribassato |
| | Tegola romana | Elemento piano in laterizio a forma di embrice |



Figura 2.13
Copertura realizzata
con laterizio a tegole curve

2.3. Materiali isolanti

Un materiale isolante è caratterizzato da una ridotta capacità di condurre i flussi di calore al suo interno. Questa proprietà per i materiali omogenei è definita dalla “conduttività termica” (λ)¹ e per quelli non omogenei dalla conduttanza

¹ La conduttività termica è definita come la quantità di calore che in regime stazionario passa attraverso una superficie di materiale omogeneo di dimensioni di 1 m² e di spessore di 1 m, quando tra le due facce opposte e parallele vi è una differenza di temperatura di 1K. La sua unità di misura è il W/mK. I valori di riferimento per i materiali da costruzione sono contenuti nelle norme UNI 10351:1994 e UNI EN ISO 10456:2008. La prima norma fornisce una banca dati di valori “standard” da utilizzare nei calcoli rispettivamente relativi ai principali materiali utilizzati in edilizia e alle pareti in muratura. Per ovviare alle inesattezze che potrebbero derivare dal non considerare la posa in opera e le condizioni termiche e igrometriche a cui il materiale è sottoposto, la norma propone di utilizzare un coefficiente correttivo (m). La seconda norma definisce una serie di regole per determinare i valori che devono essere dichiarati dal produttore (*declared values*) e i valori reali di progetto (*design values* – ovvero il valore in specifiche condizioni interne o esterne che possano essere considerate come tipiche della posa in opera e dell’uso di un materiale), considerando l’influenza della temperatura e del contenuto di umidità sulle caratteristiche termiche finali. La norma

Figura 2.28
Poliuretano rigido

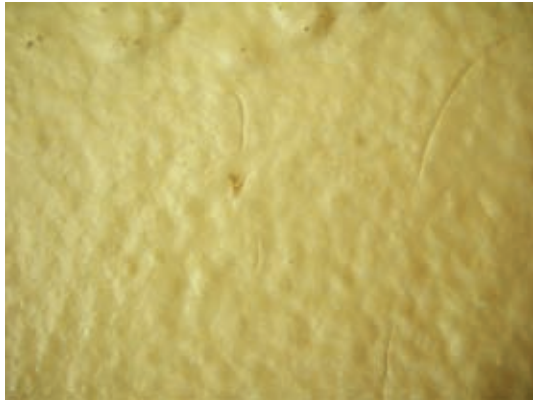


Figura 2.29
Polietilene espanso



Figura 2.30
Resina fenolica



In tabella 2.6 è riportato uno schema riassuntivo che confronta le caratteristiche termofisiche dei materiali isolanti inorganici di origine naturale.

Tabella 2.6. Caratteristiche termofisiche dei materiali isolanti inorganici di origine naturale

| Materiali | Densità (kg/m ³) | Conduttività termica (W/mk) | Calore specifico (J/kgK) | Traspirabilità | Classe di resistenza al fuoco |
|--|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|
| Fibra di poliestere | 10-150 | 0,034-0,050 | 240 | 3,11-3,34 | B |
| Polistirene espanso sinterizzato – EPS | 10-30 | 0,033-0,039 | 1340 | 20-100 | E |
| Polistirene espanso estruso – XPS | 25-40 | 0,029-0,035 | 1450 | 80-200 | E |
| Poliuretano espanso rigido – PUR | 20-50 | 0,020-0,045 | 1400-1500 | 30-200 | B-F |
| Polietilene espanso – PE | 30 | 0,035-0,040 | 1200 | 2.200 | B |
| Polipropilene espanso | 30-35 | 0,035-0,045 | 1200 | 2.000-2.200 | B |
| Resine fenoliche | 35-80 | 0,041-0,046 | 1300 | 32-80 | B-C-E |

2.3.3. Isolanti inorganici di origine naturale

I materiali isolanti inorganici naturale possono essere di tipo fibroso e poroso. Si dividono nei seguenti materiali:

- vermiculite;
- argilla espansa;
- perlite espansa;
- pomice naturale.

Il primo ha una natura fibrosa mentre gli altri hanno una struttura porosa.

2.3.3.1. Vermiculite espansa

La vermiculite è un materiale inorganico naturale fibroso. Deriva dall'espansione di una roccia di origine vulcanica appartenente al gruppo dei fillosilicati, costituita da ossidi di silice, magnesio, alluminio e calcio, a cui viene aggiunta dell'acqua. La roccia frantumata viene essiccata in forni rotanti a temperatura controllata (< 82 °C). Il superamento di questo livello termico, infatti, comporta la disidratazione dell'acqua di cristallizzazione, che deve essere conservata per la fase successiva di espansione. Una volta depurata dalle scorie di argilla e di magnesio, la roccia viene macinata e sottoposta a un ulteriore trattamento termico ad alta temperatura (1000 °C), affinché l'evaporazione dell'acqua porti alla formazione di un granulato micro-alveolare con un volume espanso di 15-20 volte rispetto a quello iniziale. È un prodotto granulare, leggero, chimicamente inerte, immarcescibile e inattaccabile dagli agenti organici) e altamente traspirabile. Negli ambienti dove è

presente un'elevata umidità, però, deve essere trattato con sostanze che ne garantiscono l'idrofobia, come il bitume diluito. Data la sua origine minerale, è incombustibile, sopporta temperature fino a 1100 °C e non emette fumi tossici in caso di incendio. Se trattato con un rivestimento bituminoso diventa infiammabile ed emette gas tossici. Per quanto riguarda gli effetti sulla salute, la natura inerte garantisce l'assenza di emissioni nocive. Anche in questo caso, i rischi si presentano nei pannelli trattati con bitume, che possono liberare idrocarburi policiclici e aromatici e solventi (soprattutto a temperature superiori a 80 °C). La radioattività, grazie all'origine vulcanica, è trascurabile. Il prodotto nasce dall'utilizzo di rocce ricavate da siti di estrazione presenti in Sudafrica, Cina e Stati Uniti. Per questa ragione, nella valutazione della sostenibilità del prodotto bisogna analizzare bene le distanze tra il luogo di reperimento e la posa in opera del materiale. Inoltre, gran parte dell'energia viene assorbita nella fase di produzione a causa delle elevate temperature di fusione richieste. Il materiale non è soggetto a marcatura CE. Si può trovare in commercio sotto forma di granuli sfusi, che sono utilizzati per l'isolamento di intercapedini, sottotetti e sottofondi e per la produzione di calcestruzzi leggeri. Possono anche essere prodotti pannelli con l'aggiunta di bitume, silicati e resine sintetiche, da utilizzare quando sia richiesta un'elevata resistenza termica.

2.3.3.2. Argilla espansa

L'argilla espansa è un materiale dalla struttura cellulare costituito da granuli sferici dalla struttura vetrificata, che deriva dalla lavorazione di una roccia sedimentaria incoerente eruttiva. È composta da argilla, allumina e acqua di cristallizzazione. L'argilla estratta dalle cave viene fatta stagionare all'aperto per circa un anno, al fine di ottenere la disgregazione dei feldspati e delle miche e l'assorbimento dei sali solubili. La roccia viene frantumata, omogenizzata e inumidita, fino a ottenere la caratteristica forma granulare. In seguito viene portata ad alta temperatura (1200 °C) per liberare le sostanze organiche presenti sotto forma di gas, far evaporare l'acqua di cristallizzazione e portare all'ossidazione degli ossidi metallici. Questo processo porta alla dilatazione dei granuli. L'aumento di volume genera una struttura vetrificata, micro-porosa e a cella chiusa.

Il materiale è molto leggero, microporoso, indeformabile, incombustibile, dotato di elevata resistenza meccanica, ai cicli di gelo e disgelo, agli agenti chimici e batterici e alla radiazione ultravioletta. Ha ottime caratteristiche in termini di igroscopicità, che lo rendono idoneo per impiego in ambienti umidi. La struttura porosa garantisce medio-basse caratteristiche di resistenza termica e acustica. Per quanto riguarda gli effetti sulla salute, la natura inerte garantisce l'assenza di emissioni nocive. La radioattività, grazie all'origine vulcanica, è trascurabile (figura 2.31). Il prodotto ha un impatto energetico positivo sull'ambiente, grazie all'utilizzo di materie prime facilmente reperibili nelle zone pianeggianti e collinari. I costi am-

bientali maggiori si hanno nella fase di produzione a causa dell'elevata quantità di energia necessaria per raggiungere le temperature di fusione richieste. Il materiale inoltre può essere riciclato e riutilizzato con i medesimi impieghi precedenti. Lo smaltimento avviene in discarica.

Si può trovare in commercio sotto forma di materiale sfuso, con una granulometria di dimensioni variabili. Le sfere con diametro maggiore (8-16 mm) sono utilizzate per l'isolamento di intercapedini, sottotetti non praticabili, sottofondi di pavimenti e contro-terra mentre quelle con diametro inferiore (0-3 mm) sono impiegate nella preparazione di calcestruzzi leggeri e intonaci isolanti.

2.3.3.3. Perlite espansa

La perlite espansa è un materiale di origine minerale che deriva dalla lavorazione di una roccia vulcanica effusiva (riolite perlitica), caratterizzata da una struttura cellulare microporosa. La roccia frantumata viene portata ad alta temperatura (1000 °C), affinché l'evaporazione dell'acqua generi un granulato micro-alveolare dotato di un volume espanso pari a 20 volte quello iniziale. Il materiale successivamente viene macinato con fibre di cellulosa, legato con amido e pressato negli stampi. In alcuni casi può essere impermeabilizzato con resine sintetiche o emulsioni bituminose per aumentarne le prestazioni.

Si tratta di un prodotto granulare, leggero, poroso, immarcescibile, inattaccabile da agenti chimici, fisici e organici, incombustibile (quando non è trattato con rivestimenti bituminosi o resinosi) e altamente traspirabile. Negli ambienti dove è presente un'elevata umidità, però, deve essere trattato con sostanze che ne garantiscano l'idrofobia. La struttura porosa garantisce medie caratteristiche di resistenza termica e acustica. Per quanto riguarda gli effetti sulla salute, la natura inerte garantisce l'assenza di emissioni nocive. I rischi si presentano nei pannelli trattati con bitume, che possono liberare idrocarburi policiclici e aromatici e solventi (soprattutto a temperature superiori a 80 °C). La radioattività, grazie all'origine vulcanica, è trascurabile.

Il prodotto nasce dall'utilizzo di rocce ricavate da siti di estrazione presenti in Europa meridionale e negli Stati Uniti. Per questa ragione, nella valutazione della sostenibilità del prodotto bisogna analizzare bene le distanze tra il luogo di reperimento e la posa in opera. Inoltre, gran parte dell'energia è assorbita nella fase di produzione a causa delle elevate temperature di fusione richieste.

Il materiale viene commercializzato sciolto ed è utilizzato per l'isolamento di intercapedini, sottofondi, massetti, coperture non praticabili e canne fumarie e per la produzione di malte e intonaci termoisolanti. Se impastato con altre malte e calcestruzzi è utilizzato per la coibenza di pareti perimetrali e solette. Esistono anche pannelli prodotti con granuli di perlite espansa agglomerati con fibre e leganti bituminosi, utilizzati principalmente per l'isolamento di coperture.

2.3.3.4. Pomice naturale

La pomice è un materiale naturale inorganico che deriva da una roccia vulcanica effusiva con struttura alveolare, composta prevalentemente da silice e ossidi di alluminio, potassio, sodio, titanio, ferro, manganese e calcio. Il prodotto finale si estrae dalle cave a cielo aperto e viene frantumato in granulometrie che variano tra 0-15 mm.

La struttura porosa e alveolare conferisce al materiale buone proprietà termoisolanti e fonoassorbenti. È incombustibile, non solubile in acqua, chimicamente inerte, imputrescibile, immarcescibile, inattaccabile da muffe e agenti biologici e non emette fumi tossici in caso di incendio. Per quanto riguarda gli effetti sulla salute, la natura inerte garantisce l'assenza di emissioni nocive (figura 2.32). La radioattività, grazie all'origine vulcanica, è trascurabile.

Le cave di pomice sono piuttosto limitate e non rinnovabili. I consumi energetici, di contro, sono piuttosto bassi nelle fasi di produzione, utilizzo e riciclo. La pomice può essere riciclata e riutilizzata con i medesimi impieghi precedenti. Lo smaltimento avviene in discarica. Non è soggetto a marcatura CE.

La perle di dimensioni minori (0-6 mm) sono utilizzate per la produzione di malte isolanti e intonaci mentre quelle di diametro maggiore (8-15 mm) sono indicate per il confezionamento di calcestruzzi leggeri da utilizzare per la produzione di casseri prefabbricati, magroni e sottofondi e per l'isolamento in intercapedine.

In tabella 2.7 è riportato un specchietto riassuntivo che confronta le caratteristiche termofisiche dei materiali isolanti inorganici di origine naturale.

Tabella 2.7. Caratteristiche termofisiche dei materiali isolanti inorganici di origine naturale

| Materiale | Densità (kg/m ³) | Conduttività termica (W/mK) | Calore specifico (J/kgK) | Traspirabilità | Classe di resistenza al fuoco |
|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|
| Vermiculite espansa sfusa | 60-120 | 0,046-0,077 | 800-1000 | 3-4 | A1 |
| Vermiculite espansa impastata con legante idraulico | 380-600 | 0,084-0,095 | 800-1000 | 3-4 | A1 |
| Argilla espansa sfusa | 250-500 | 0,080-0,11 | 900-1100 | 2-8 | A1 |
| Argilla espansa impastata con legante idraulico | 600-1400 | 0,16-0,31 | 900-1100 | 2-8 | A1 |
| Perlite espansa sfusa | 70-240 | 0,044-0,060 | 900-1000 | 1-8 | A1 |
| Perlite espansa impastata con legante idraulico | 400-500 | 0,094-0,15 | 900-1000 | 1-8 | A1 |
| Pomice naturale sfusa | 300-750 | 0,075-0,019 | 1000 | 2-4 | A1 |
| Pomice naturale impastata con legante idraulico | 800-1600 | 0,16-0,21 | 1000 | 2-4 | A1 |



Figura 2.31
Argilla espansa



Figura 2.32
Pomice naturale

2.3.4. Isolanti inorganici di origine sintetica

I materiali isolanti inorganici sintetici hanno un'origine minerale e possono essere di tipo fibroso, cellulare e poroso. La categoria comprende i seguenti materiali:

- fibra di vetro;
- lana di roccia;
- vetro cellulare espanso;
- silicato di calcio.

I primi due hanno una natura fibrosa, il terzo cellulare e l'ultimo porosa.

2.3.4.1. Fibra di vetro

La fibra di vetro è un isolante fibroso di origine minerale, formato dagli stessi

materiali utilizzati per la produzione del vetro *float*, dosati in modo differente: sabbia quarzifica, vetro riciclato, silicati, soda e pietre calcaree. La miscela viene mescolata in una vasca riscaldata elettricamente e poi fusa in un forno ad alta temperatura (1500 °C). Successivamente il vetro fuso viene filato in fibre di piccola dimensione e apprettato con resine sintetiche che ne migliorano la stabilità dimensionale e la resistenza meccanica e al fuoco.

Il materiale ha un'elevata stabilità alla deformazione quando viene sottoposto ad elevate variazioni di temperatura (500 °C) e di umidità relativa, è imputrescibile, resistente al fuoco, ininfiammabile, chimicamente inerte, resiste all'attacco biologico, all'attacco chimico di solventi organici, soluzioni acide e alcaline, alle radiazioni ultraviolette e all'invecchiamento. È un buon isolante acustico, grazie alla natura fibrosa, e le proprietà di coibenza termica sono direttamente proporzionali alla densità (10-150 kg/m³). Bisogna però considerare che il materiale non possiede alcuna capacità igroscopica. Per questa ragione, le prestazioni termiche si riducono notevolmente in presenza di condensa interstiziale poiché l'umidità satura i pori, fino a fare degradare il materiale. Per quanto riguarda gli effetti sulla salute, dopo i sospetti di cancerogenicità, per poter essere dichiarato innocuo per la salute è richiesta una composizione specifica della fibra di vetro (figura 2.33). Alcuni rischi sono legati alla posa e alla manipolazione dei prodotti a causa dell'abrasione meccanica dovuta alla ruvidità delle fibre. La radioattività, grazie all'origine vulcanica, è trascurabile.

Il prodotto, grazie all'utilizzo di materia prima riciclata (contiene il 50-80% di vetro riciclato) ha un impatto energetico positivo sull'ambiente. Inoltre può essere reinserito nel ciclo di produzione, a condizione che sia in buono stato di conservazione e con una minima presenza di impurità. Lo smaltimento può avvenire in discarica.

Il materiale viene commercializzato sotto forma di pannelli, feltri, rotoli, coppelle e fibre sfuse. I prodotti possono essere semplici oppure compositi, ovvero accoppiati con fogli di alluminio, carta kraft o bitume per aumentarne le prestazioni di resistenza meccanica, acustica o al fuoco. Attualmente, sono in commercio anche feltri trapuntati costituiti da fibre apprettate con olio minerale e fissate per trapuntatura su vari tipi di supporto. I pannelli flessibili sono utilizzati per l'isolamento di pareti perimetrali, coperture e solette.

2.3.4.2. Lana di roccia

La fibra di roccia è un isolante fibroso di natura minerale prodotto partendo da rocce di origine vulcanica o sedimentaria (diabase, dolomite e basalto) che vengono mescolate con *carbon coke*, bricchette, laterizi o scorie d'altoforno. L'aggiunta di questi materiali serve per raggiungere temperature così elevate (*coke*) oppure per migliorarne le prestazioni (bricchette). La produzione avviene parten-

do dalla fusione della miscela ad alta temperatura (1600 °C). Il composto viene poi filato e trattato con leganti organici, come olio di lino e resina fenolica, che lo rendono stabile e idrofobo.

Il materiale, per la sua particolare natura inerte, non assorbe acqua e umidità mantenendo inalterate le sue caratteristiche nel tempo, resiste ad alte temperature (700 °C), è impermeabile, imputrescibile, ininfiammabile, chimicamente inerte, dotato di elevata resistenza meccanica, all'attacco biologico e chimico, alle radiazioni ultraviolette e alla decomposizione. Come la lana di vetro, grazie alla natura fibrosa, è un buon isolante acustico. Le proprietà di coibenza termica, invece, sono direttamente proporzionali alla densità delle fibre (15-200 kg/m³). Le caratteristiche traspiranti fanno sì che la resistenza termica si riduca notevolmente in presenza di condensa interstiziale (figura 2.34). Per quanto riguarda gli effetti sulla salute, anche in questo caso è necessario disporre di una composizione specifica per poter dichiarare innocuo il materiale. Alcuni rischi sono legati alla posa in opera e alla manipolazione dei prodotti a causa dell'abrasione meccanica dovuta alla ruvidità delle fibre.

Il materiale è commercializzato sotto forma di pannelli rigidi, feltri e fibre sfuse di tipo semplice o accoppiato con fogli di alluminio o carta kraft. I materiali utilizzati nei controsoffitti o nelle contropareti, invece, sono rivestiti con uno strato protettivo in tessuto, gesso o altri materiali, che dona una particolare caratterizzazione estetica al manufatto. Normalmente, i pannelli flessibili sono inseriti in un'orditura modulare di legno o di metallo nella quale possono essere presenti anche gli impianti di illuminazione. Esistono anche conglomerati in fibre minerali e composti organici, quali collanti, amidi e cellulosa, con decori superficiali o strati di vernice utilizzati nell'architettura d'interni.

La lana di roccia è particolarmente adatta nella realizzazione di cappotti, pareti perimetrali e interne, coperture piane e inclinate.

2.3.4.3. *Vetro cellulare espanso*

Il vetro cellulare espanso deriva dalla lavorazione del vetro e, pertanto, è composto da una miscela di sabbia quarzifica, vetro riciclato, silicati, bicarbonato di sodio e di calcio. La miscela viene fusa in un forno ad alta temperatura (1000-1400 °C), raffreddata, sminuzzata e macinata in polvere. Successivamente, viene aggiunto il carbonio come agente schiumogeno. Poi si procede a una nuova cottura ad alta temperatura (1000 °C) e, grazie all'ossidazione del carbonio, la miscela si espande fino a raggiungere un volume di circa 15 volte rispetto a quello iniziale. Il prodotto finito è composto da cellule di ridotta dimensione, ermeticamente chiuse e indipendenti.

La struttura cellulare conferisce proprietà di buon isolamento termico, di stabilità dimensionale alle alte temperatura (400 °C), agli agenti chimici (a eccezione delle sostanze debolmente alcaline e all'acido fluoridrico) e biologici, di imputresci-

3. Requisiti prestazionali dell'involucro opaco

3.1. Evoluzione dell'involucro edilizio opaco

Il comportamento energetico di un edificio è legato principalmente al funzionamento dell'involucro edilizio (pareti, copertura, pavimentazione, finestre, porte, ecc.) che, da sempre, rappresenta un elemento dinamico capace di integrare aspetti di tipo termico, igrometrico, luminoso, aerobiologico e igienico. In questo capitolo si tratterà l'evoluzione storica dell'involucro opaco (pareti, copertura, solette, pavimentazione) e più avanti (capitolo 7) di quello trasparente (finestre, porte).

In passato, fino all'affermarsi dei principi architettonici del Movimento Moderno, la facciata costituiva una "maschera introversa" basata su una logica progettuale di tipo conservativo e difensivo nell'intento di garantire il riparo dall'acqua, dalle intemperie e dalla variabilità delle condizioni climatiche. Le costruzioni sin dall'antichità nascevano da un profondo conoscenza dell'ambiente naturale, che consentiva di ottimizzare le potenzialità offerte dal territorio in termini di caratteristiche climatiche e di risorse rinnovabili di provenienza locale. La regolazione delle condizioni interne nasceva da un approfondito studio della posizione dell'edificio rispetto alle variabili ambientali (rilievi, presenza di acqua e di vegetazione, ecc.), climatiche (esposizione al sole e al vento, grado di umidità, precipitazioni, temperatura, ecc.) e agli assi cardinali, della natura del terreno e delle caratteristiche dei materiali costruttivi locali.

Le caratteristiche dell'involucro opaco, ma anche la disposizione urbana e la forma degli edifici, differiscono molto in relazione alle specificità climatiche locali. Nei climi freddi (Europa centrale e settentrionale, Nord America, ecc.) l'involucro deve contribuire a conservare il calore prodotto all'interno dell'edificio e, per questo, deve essere molto chiuso, compatto e con bassi valori di trasmittanza termica¹ (figura 3.1). Pertanto, anche in zone territorialmente distanti sono state

¹ Questi obiettivi sono ottenuti anche con forme compatte, volumi ridotti da riscaldare, zone filtro orientate verso nord, fronti settentrionali riparati dalla morfologia naturale dei terreni, interrimento parziale dei locali, materiali edili con caratteristiche di isolamento termico, finestre di ridotte dimensioni a nord, presenza di tende e scuri lignei sulle aperture e contenimento delle infiltrazioni d'aria attraverso i giunti.

sviluppate tecniche costruttive mirate a massimizzare la prestazione energetica delle pareti, utilizzando i materiali di provenienza locale, come legno, terra impastata con paglia e rami, mattoni crudi o cotti (figura 3.2), sassi, muratura mista (figura 3.3), pietra (figura 3.4), ecc. Tutti questi materiali, a eccezione del legno e della paglia, non hanno buona capacità di trattenere il calore, ma ne favoriscono la dispersione. Per migliorarne le prestazioni complessive si preferì ricorrere a spessori rilevanti e all'inserimento di intercapedini d'aria che miglioravano significativamente l'isolamento termico del componente² (si pensi ad esempio alle pareti miste in sassi o in pietra a secco dell'Europa Centrale, alle pareti doppie del Nord Europa con un'intercapedine riempita di terra e paglia, ai vespai areati oppure alle solette in legno con uno strato di ventilazione). Inoltre, nelle pareti con ridotte caratteristiche isolanti (ad esempio in pietrame e in sassi), i locali interni usati con frequenza, dove era ubicato il focolare, erano rivestiti con legno per trattenere il calore e per isolare in modo uniforme l'ambiente interno (figura 3.5). Nei climi più freddi, addirittura, le pareti venivano rivestite all'esterno con legno di colore scuro per favorire l'accumulo solare (figura 3.6) oppure i vuoti venivano riempiti con muschio per aumentare il potere isolante e per limitare le infiltrazioni di aria.

Nei climi caldi, le soluzioni sono differenti in relazione alla piovosità e al livello di umidità relativa. Nelle regioni aride o semi aride (isole greche, coste dell'Africa settentrionale, Spagna e Italia meridionale, per esempio), l'involucro deve contribuire a mitigare il surriscaldamento interno, la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante delle pareti³. Per questo, sono utilizzate pareti massive (spessori di 50-100 centimetri) in materiali di provenienza locale caratterizzati da buone caratteristiche di sfasamento e attenuazione termica, come mattoni in pietra calcarea (figura 3.7), terra cruda (figura 3.7) o cotta (figura 3.9), tufo, ecc. (figura 3.10). Le pareti all'esterno sono intonacate con malte a base di calce o gesso (figura 3.11) o mattonelle dai colori chiarissimi (figura 3.12) che, oltre a riflettere il calore del sole, garantiscono un'azione disinfettante, battericida e fungicida. Nelle pareti, per favorire la ventilazione naturale incrociata e il raffrescamento notturno, potevano anche essere fatti dei fori aggiuntivi rispetto alle aperture.

² Le proprietà di isolamento termico sono determinate dalla presenza di bassi valori di conducibilità termica o di conduttività termica (λ), definita dal rapporto, in condizioni stazionarie, tra il flusso di calore che attraversa il materiale e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore. In altri termini, misura l'attitudine di un materiale alla trasmissione del calore e un basso valore di conducibilità consente di avere una propagazione del calore con una velocità ridotta.

³ Questi obiettivi sono ottenuti anche mediante la scelta di forme aperte e a corte che aumentano gli scambi radiativi tra l'edificio e l'ambiente esterno, l'ombreggiamento delle pareti, l'inerzia termica delle strutture, la colorazione di pareti e coperture. Viene inoltre aumentata l'umidità relativa interna grazie alla presenza di vegetazione e di acqua nei patii e sono favoriti gli scambi convettivi ed evaporativi tra edificio e ambiente con lo sfruttamento della ventilazione naturale e del raffrescamento passivo.



Figura 3.1
Involucro opaco in pietra di tipo massivo
(Bolzano, Italia; foto di Alberto Pizzi)



Figura 3.2
Parete mista in sassi e mattoni cotti
(Sagunto, Spagna)



Figura 3.3
Parete mista in sassi e pietra
di grande spessore (Renon, Italia)



Figura 3.4
Parete in pietra di grande spessore (Renon, Italia)



Figura 3.5
Rivestimento esterno di pareti in legno
per trattenere il più possibile il calore
prodotto all'interno dell'ambiente
e per isolare in modo uniforme le pareti
in pietra (Compatsch, Italia; foto di Evy Lai)



Figura 3.6
Utilizzo del legno di colore scuro
per migliorare l'accumulo di calore della
parete (Compatsch, Italia; foto di Evy Lai)

Figura 3.7
Città sotterranee con pareti ricavate direttamente dalla roccia e dal terreno per sfruttarne i benefici di inerzia termica e raffrescamento passivo (Cappadocia, Turchia; foto di Elena Ciucci)



Figura 3.8
Città con pareti massive che si sviluppano direttamente a partire dalla roccia per ottenere i benefici di inerzia termica e di raffrescamento diurno (Ronda, Spagna)



Figura 3.9
Strade strette, orientate rispetto alla direzione prevalente dei venti e costeggiate da una cortina continua di edifici con pareti intonacate di colore chiaro (Ronda, Spagna)



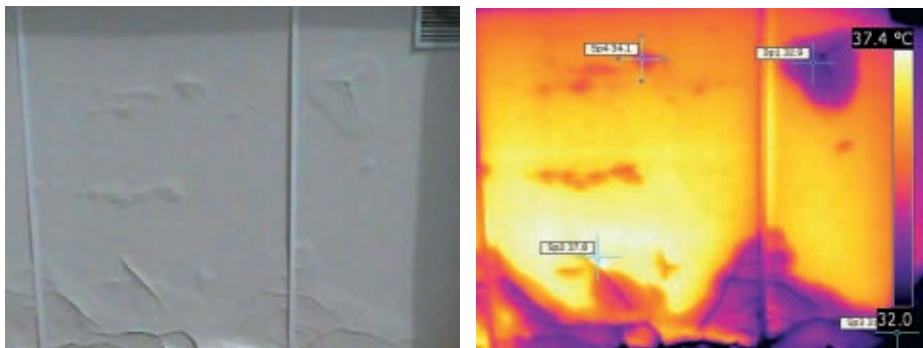


Figura 3.28. Distacco dello strato di finitura realizzato con materiale polimerico (immagini nel visibile e termogramma)

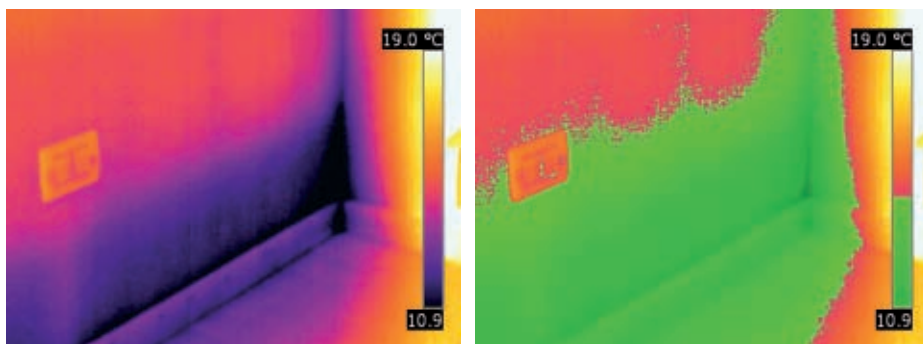


Figura 3.29. Presenza di umidità da risalita capillare (termogramma)

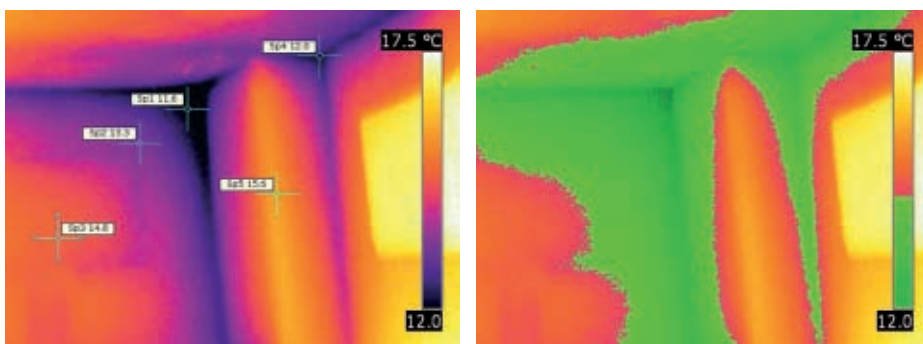


Figura 3.30. Presenza di umidità interstiziale (termogramma)



Figura 3.31
Germinazione biologica

3.2.3. Resistenza al vento

L'involucro opaco deve dimostrare di resistere alle raffiche di vento dimostrando di mantenere una deformazione ammissibile, di conservare le sue proprietà e di salvaguardare la sicurezza degli utenti. L'involucro, in pratica, non deve subire sfondamenti o deformazioni permanenti anche se viene sottoposto a carichi mobili e variabili nel corso del tempo al fine di simulare le raffiche di vento e di sottoporre l'edificio a forti pressioni e depressioni. Interessa principalmente gli strati portanti e di protezione dell'involucro edilizio.

La resistenza al vento deve essere verificata attraverso apposite prove che comprendono:

- procedure di calcolo per verificare la deformazione massima ammissibile (le prove sono valide quando l'errore di determinazione è contenuto entro il 5%);
- prove di laboratorio che consistono nella misurazione della differenza di pressione quando la superficie è sottoposta a sovra-pressione e a depressione mediante cassoni di aria compressa o cuscini d'aria (ISO 7895:1996, *Facades Made of Components – Tests for Resistance to Positive and Negative Static Pressure Generated by Wind*, in revisione).

3.2.4. Permeabilità all'aria

La permeabilità all'aria dell'involucro opaco indica la capacità dell'elemento e dei suoi strati funzionali di impedire una dispersione eccessiva di calore per ventilazione dovuta ai flussi d'aria che attraversano la superficie e, al contempo, di garantire idonei ricambi d'aria (figure 3.32 e 3.33). Interessa principalmente gli strati di tenuta all'aria, barriera al vapore, finitura interna ed esterna di tipo continuo.

La permeabilità all'aria deve essere verificata attraverso apposite prove che comprendono:

- prove di laboratorio realizzate su un campione rappresentativo della varietà degli elementi o dei giunti che compongono il sistema di involucro. Il campione deve essere posto nelle condizioni d'uso reale;
- prove in opera che creano una depressione sulla porzione di parete interessata alla prova (norma UNI EN 1026:2001, *Finestre e porte. Permeabilità all'aria. Metodo di prova*).

Figura 3.32
Permeabilità all'aria di una giunzione
tra due pareti verticali
verificata tramite il blower door test
(termogramma)

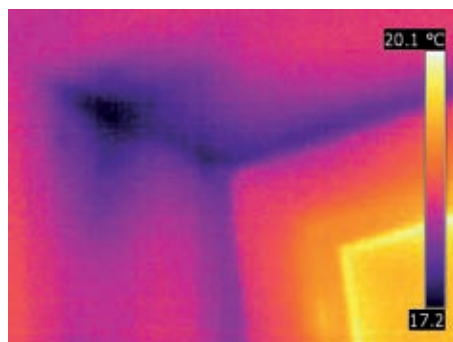
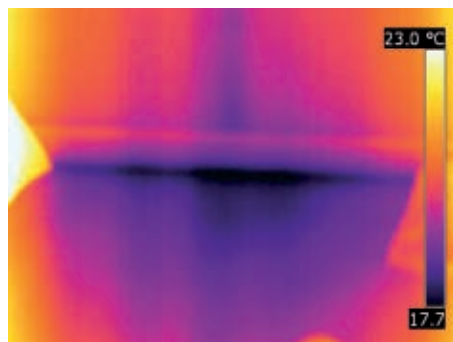


Figura 3.33
Permeabilità all'aria del contatto
tra il basamento e la parete
verificata tramite il blower door test
(termogramma)



3.2.5. Isolamento termico

Gli elementi che costituiscono l'involucro edilizio sono interessati da un flusso di calore che concorre a determinare le perdite per trasmissione dell'edificio. L'involucro edilizio opaco costituisce la superficie disperdente più ampia dell'edificio e, pertanto, si caratterizza per dispersioni termiche molto elevate. È difficile quantificare con esattezza questa quota, poiché il peso in percentuale nel bilancio energetico dipende dalla geometria dell'edificio, dalla zona climatica di riferimento, dal peso delle parti opache su quelle trasparenti, dalle prestazioni dei singoli componenti, dalle differenze di temperatura tra i locali, ecc. (figura 3.34).

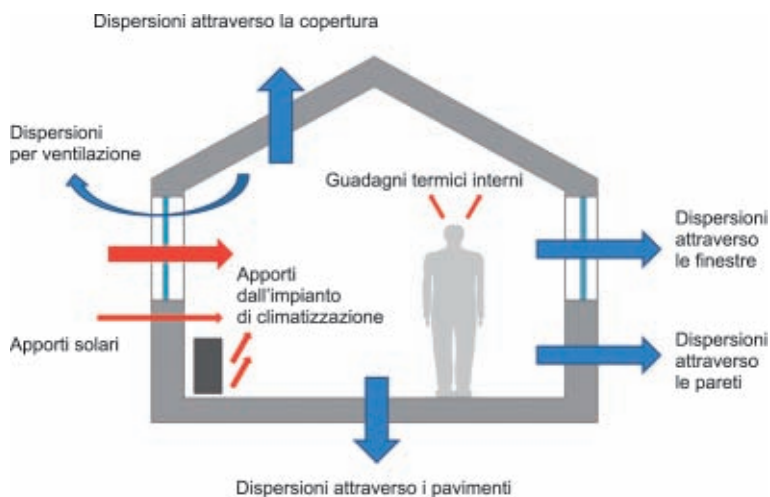


Figura 3.34. Schema del bilancio energetico di un edificio

Il flusso di calore che attraversa un elemento edilizio (Q_t) in condizioni stazionarie è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra ambiente esterno e interno, alla dimensione della superficie disperdente e alle proprietà termofisiche dell'elemento:

$$Q_t = A \cdot U \cdot \Delta\theta \quad (3.1)$$

dove

Q_t = flusso di calore che attraversa l'elemento costruttivo in condizioni stazionarie (W)

A = superficie disperdente (m^2)

U = trasmittanza termica dell'elemento (W/m^2K)

$\Delta\theta = \theta_i - \theta_e$ = differenza tra la temperatura interna ed esterna dell'elemento (K).

Le dispersioni termiche per trasmissione, dunque, sono direttamente proporzionali a:

- dimensioni della superficie disperdente;
- proprietà di trasmittanza termica di ciascuna superficie disperdente;
- differenza di temperatura tra due ambienti.

Le dispersioni termiche, dunque, vengono annullate o ridotte in presenza di differenze di temperatura nulle o contenute, come ad esempio in locali contigui posti alla stessa temperatura (due locali riscaldati o meno, un locale riscaldato e l'altro interno ma non riscaldato, ecc.).

Il parametro principale per determinare le dispersioni per trasmissione di un componente edilizio in regime stazionario è la trasmittanza termica (U), che indica la capacità che ha l'elemento di scambiare calore per conduzione, irraggiamento e convezione con l'ambiente circostante. Pertanto, tanto più è alto questo valore, tanto peggiori saranno la resistenza al passaggio di calore (R) e le proprietà di isolamento termico.

La normativa italiana sulla diagnosi energetica (norma UNI TS 11300:2008) individua quattro modalità per quantificare il valore di trasmittanza termica⁸ degli elementi costruttivi opachi:

- determinazione semplificata, da utilizzare solo per valutazioni energetiche di edifici esistenti quando non è possibile effettuare un calcolo rigoroso sulla base di dati derivanti da ispezioni o da altre fonti (norma UNI TS 11300:2008);
- abaco delle strutture murarie, che fornisce indicazioni sulle principali strutture murarie e sulla loro diffusione sul territorio nazionale e può essere utilizzato per edifici esistenti quando non è possibile effettuare una determinazione rigorosa di calcolo (norma UNI TS 11300:2008);
- calcolo analitico, da utilizzare per edifici esistenti e di nuova costruzione nei casi in cui la stratigrafia della struttura sia conosciuta o dove sia possibile svolgere indagini più approfondite per stabilire i materiali che compongono la muratura;
- misura *in situ*, da utilizzare per edifici esistenti e di nuova costruzione nei casi in cui la stratigrafia della struttura non è nota e dove non è possibile realizzare indagini diagnostiche di tipo distruttivo per approfondire le caratteristiche termofisiche dell'elemento costruttivo.

Nel primo caso, i valori di trasmittanza termica sono definiti per alcune stratigrafie costruttive tipiche che sono differenziate in base allo spessore, al componente e al tipo di materiali presenti (tabella 3.7).

⁸ La trasmittanza termica (U) in regime stazionario è definita come la quantità di calore che passa attraverso una superficie di 1 metro quadro in un'unità di tempo pari a 1 secondo, quando tra le due facce vi è una differenza di temperatura di 1 K. È inversamente proporzionale alla resistenza termica (R) che indica la capacità di resistere al passaggio di calore.

Tabella 3.7a. Determinazione semplificata dei valori di trasmittanza termica dei componenti opachi in edifici esistenti (fonte: norma UNI TS 11300-1:2008 (Appendice A). Chiusure verticali opache)

| Spessore (m) | Trasmittanza termica (W/m ² K) | | | | |
|--------------|---|--|--------------------------------------|--|---|
| | Muratura di pietrame intonacata | Muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce | Muratura di mattoni semipieni o tufo | Pannello prefabbricato in calcestruzzo non isolato | Parete a cassa vuota con mattoni forati |
| 0,15 | - | 2,59 | 2,19 | 3,59 | - |
| 0,20 | - | 2,28 | 1,96 | 3,28 | - |
| 0,25 | - | 2,01 | 1,76 | 3,02 | 1,20 |
| 0,30 | 2,99 | 1,77 | 1,57 | 2,80 | 1,15 |
| 0,35 | 2,76 | 1,56 | 1,41 | 2,61 | 1,10 |
| 0,40 | 2,57 | 1,39 | 1,26 | 2,44 | 1,10 |
| 0,45 | 2,40 | 1,25 | 1,14 | - | 1,10 |
| 0,50 | 2,25 | 1,14 | 1,04 | - | 1,10 |
| 0,55 | 2,11 | 1,07 | 0,96 | - | - |
| 0,60 | 2,00 | 1,04 | 0,90 | - | - |

Tabella 3.7b. Determinazione semplificata dei valori di trasmittanza termica dei componenti opachi in edifici esistenti (fonte: norma UNI TS 11300-1:2008 (Appendice A). Chiusure verticali opache verso ambienti interni)

| Spessore (m) | Trasmittanza termica (W/m ² K) | | | |
|--------------|--|---|-----------------------------------|---|
| | Muratura di mattoni pieni intonacata sulle due facce | Muratura di mattoni forati intonacata sulle due facce | Parete in calcestruzzo intonacata | Parete a cassa vuota con mattoni forati |
| 0,15 | 2,10 | 1,65 | 2,61 | - |
| 0,20 | 1,89 | 1,35 | 2,42 | - |
| 0,25 | 1,70 | 1,15 | 2,26 | 1,11 |
| 0,30 | 1,53 | 1,00 | 2,11 | 0,99 |
| 0,35 | 1,37 | 0,88 | 1,99 | 0,98 |

Tabella 3.7c. Determinazione semplificata dei valori di trasmittanza termica dei componenti opachi in edifici esistenti (fonte: norma UNI TS 11300-1:2008 (Appendice A). Coperture piane e a falde)

| Spessore (m) | Trasmittanza termica (W/m ² K) | | |
|--------------|---|----------------------------|----------------|
| | Soletta piana in laterocemento | Tetto a falda in laterizio | Tetto in legno |
| 0,20 | 1,85 | 2,20 | 1,8 |
| 0,25 | 1,70 | 2,10 | |
| 0,30 | 1,50 | 1,80 | |
| 0,35 | 1,35 | 1,60 | |

Tabella 3.7d. Determinazione semplificata dei valori di trasmittanza termica dei componenti opachi in edifici esistenti (fonte: norma UNI TS 11300-1:2008 (Appendice A). Solai sotto ambienti non climatizzati)

| Spessore (m) | Trasmittanza termica (W/m ² K) | |
|--------------|---|---|
| | Soletta in laterocemento | Solaio prefabbricato in calcestruzzo tipo Predalles |
| 0,20 | 1,70 | 2,15 |
| 0,25 | 1,60 | 2,00 |
| 0,30 | 1,40 | 1,85 |
| 0,35 | 1,30 | 1,75 |

benefici (ad esempio, la trasmittanza di un vetro di spessore 5 mm è $U_g = 5,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ mentre quella di un vetro di spessore 10 mm è $U_g = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$).

$$U_g = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{0,01}{1} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Le dispersioni maggiori del vetro riguardano la convezione e l'irraggiamento. Le prime si manifestano tra il vetro e gli strati d'aria a contatto con la lastra. Per aumentare le prestazioni del materiale è stato modificato il valore di conducibilità termica del sistema di vetrage: nei climi freddi sono state realizzate dapprima doppie finestre in cui la camera d'aria interna alle due finestre migliora il valore di trasmittanza finale del sistema.

La presenza di un'intercapedine apporta un beneficio termico fino a uno spessore di 3 centimetri, quando l'aria è considerata immobile e priva di scambi termici per convezione. La presenza di intercapedini di dimensioni superiori, al contrario, inficia la prestazione finale del sistema. Per questa ragione, le doppie finestre sono state sostituite con un vetrocamera caratterizzato da un'intercapedine contenente aria o gas a bassa conducibilità (argon, kripton e xenon) che modificano notevolmente l'isolamento termico del componente vetrato (paragrafo 2.8). In questo caso, la trasmittanza di un doppio vetro di 5 mm con un'intercapedine d'aria di 10 mm ($C_a = 7,56 \text{ W/m}^2\text{K}$) si calcola nel modo seguente:

$$U_g = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{0,005}{1} + \frac{1}{7,56} + \frac{0,005}{1} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} = 3,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Le dispersioni per irraggiamento sono dovute all'emissività normale del materiale, che indica la capacità di rilasciare energia sotto forma di radiazione infrarossa quando è colpito dai raggi solari. Il valore dell'emissività dipende dalle caratteristiche superficiali del materiale ed è stabilito in rapporto a quello di un corpo nero, ovvero di una superficie ideale che emette energia per adduzione con un'emissività pari a 1,00. Il vetro sodo-calcico ha un'emissività normale piuttosto alta, che si attesta su 0,89. Pertanto, è opaco alle radiazioni dotate di elevata lunghezza d'onda, ma quando la superficie è irraggiata emette bene il calore verso l'esterno. Negli ultimi 10-15 anni, per ridurre le dissipazioni per irraggiamento sono stati realizzati vetri con inseriti materiali a bassa emissività nella pasta vetrosa o rivestimenti caratterizzati da valori di emissività compresi tra 0,01÷0,2, che riflettono verso l'interno una parte del flusso di calore irraggiato. Il confronto tra i valori di trasmittanza termica di diversi sistemi di vetrage mostra le notevoli differenze prestazionali (figura 5.1).

Dal punto di vista spettrofotometrico (norma EN 410:1998), la radiazione visibile che colpisce un materiale trasparente viene in parte riflessa, trasmessa e assorbita (figura 5.2). Il comportamento del vetro nei confronti dei raggi solari è quantifi-

cato dai coefficienti luminosi di trasmissione (t_l), riflessione (r_l) e assorbimento (a_l). In generale, si può dire che la somma di questi termini è pari all'energia totale incidente sul vetro ($t_l + r_l + a_l = 1$).

Il coefficiente di trasmissione luminosa (t_l) indica il rapporto tra il flusso luminoso trasmesso e quello totale incidente sul vetro. In pratica, indica la percentuale di radiazione visibile che un vetro lascia passare all'interno del locale. Pertanto:

$$\tau_v = \frac{G_t}{G} \quad (5.2)$$

dove

τ_v = coefficiente di trasmissione luminosa (%)

G_t = flusso luminoso trasmesso dal vetro (lm)

G = flusso luminoso totale incidente sul vetro (lm).

Il valore è influenzato dal colore e dallo spessore del materiale, oltre che dalla presenza di rivestimenti superficiali. Si indica in percentuale e influenza direttamente la trasparenza del vetro: tanto più è elevato, tanto più il materiale lascia passare la radiazione visibile. Valori di buona trasparenza si hanno quando il coefficiente di trasmissione luminosa è compreso tra 0,75÷0,85.

Le caratteristiche di trasparenza devono essere scelte in base alla destinazione d'uso dell'edificio, alla zona climatica di riferimento, all'orientamento della facciata e all'inclinazione del vetro (orizzontale o verticale). In linea di massima, sulle facciate verticali è opportuno avere vetri dotati di coefficienti di trasmissione luminosa elevati (0,80÷0,85), mentre su quelle orizzontali più contenuti (0,60÷0,70). I valori di trasmissione luminosa sono molto diversi nei sistemi di vetrazione (figura 5.3).

La conoscenza del coefficiente di trasmissione luminosa di un vetro permette di comprendere il valore approssimativo del livello di illuminamento interno al locale, una volta noto l'illuminamento ambientale. Il calcolo è possibile conoscendo il fattore di luce diurna (FLD) che indica il rapporto tra l'illuminamento interno in un dato punto e l'illuminamento esterno misurato su un piano orizzontale. Pertanto, il calcolo del fattore di luce diurna è dato dalla seguente relazione:

$$FDL = \frac{E_i}{E_e} \quad (5.3)$$

dove

FDL = fattore di luce diurna (%)

E_e = livello di illuminamento esterno (lux)

E_i = livello di illuminamento interno (lux).

Il valore è costante indipendentemente dall'ora del giorno e dal periodo dell'anno. Quindi, se il livello di illuminamento esterno è di 5000 lux e il fattore di luce diurna in prossimità della finestra è pari a 0,10, il livello di illuminamento interno sarà pari a 500 lux.

Il coefficiente di riflessione luminosa (ρ_v) indica il rapporto tra il flusso luminoso riflesso e quello totale incidente. Pertanto:

$$\rho_v = \frac{G_r}{G} \quad (5.4)$$

dove

ρ_v = coefficiente di riflessione luminosa (%)

G_r = flusso luminoso riflesso dal vetro (lm)

G = flusso luminoso totale incidente sul vetro (lm).

Il valore si indica in percentuale e identifica la quantità di luce che viene riflessa da un vetro verso l'esterno. Il valore dipende dal colore, dalle caratteristiche di *texture* e dal rivestimento superficiale del materiale.

Il coefficiente di assorbimento luminoso (α_v) indica il rapporto tra il flusso luminoso assorbito e quello totale incidente. Pertanto:

$$\alpha_v = \frac{G_a}{G} \quad (5.5)$$

dove

α_v = coefficiente di assorbimento luminoso (%)

G_a = flusso luminoso assorbito dal vetro (lm)

G = flusso luminoso totale incidente sul vetro (lm).

Anche in questo caso, si indica in percentuale e identifica la quantità di luce che viene assorbita dal vetro. Il valore dipende dallo spessore e dal colore del materiale.

I tracciati di questi tre rapporti per l'insieme delle lunghezze d'onda della radiazione solare costituiscono le curve spettrali del vetro. La somma di questi valori definisce il flusso luminoso totale incidente sul vetro ($\tau_v + \rho_v + \alpha_v = 1$).

Dal punto di vista energetico, la radiazione infrarossa che colpisce un materiale trasparente viene in parte riflessa, trasmessa e assorbita. Il comportamento energetico del vetro nei confronti dei raggi solari è quantificato dai coefficienti energetici di trasmissione (τ_e), riflessione (ρ_e) e assorbimento (α_e), che sono definiti rispettivamente dal rapporto tra il calore trasmesso, riflesso e assorbito e il calore totale incidente su un materiale trasparente. Pertanto, il calcolo dei fattori energetici è dato dalle seguenti relazioni:

$$\tau_e = \frac{I_t}{I} \quad (5.6)$$

$$\rho_e = \frac{I_r}{I} \quad (5.7)$$

$$\alpha_e = \frac{I_a}{I} \quad (5.8)$$

dove

- τ_e = coefficiente di trasmissione energetica (%)
- ρ_e = coefficiente di riflessione energetica (%)
- α_e = coefficiente di assorbimento energetico (%)
- I_t = flusso energetico trasmesso dal vetro (W)
- I_r = flusso energetico riflesso dal vetro (W)
- I_a = flusso energetico assorbito dal vetro (W)
- I = flusso energetico totale incidente sul vetro (W).

In corrispondenza di una particolare incidenza della radiazione solare, questi rapporti dipendono dal colore e dallo spessore del vetro e dalla natura del deposito applicato. La somma di questi valori definisce l'energia totale incidente sul vetro ($\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1$).

Il comportamento energetico dei materiali trasparenti è definito dal fattore solare (g) che individua il rapporto tra l'energia totale trasmessa nel locale in cui si trova la vetrata e l'energia solare incidente sul vetro (norma EN 410:1998). L'energia totale, a sua volta, è costituita dalla somma dell'energia solare introdotta per trasmissione diretta e dell'energia ceduta dal vetro all'ambiente interno, in seguito al suo riscaldamento per assorbimento energetico (figura 5.4). La grandezza è definita anche come *Total Solar Energy Transmittance* (TSET) e *Solar Heating Gain Coefficient* (SHGC). Il fattore solare è determinato da:

$$g = \frac{I_t + cI_a}{I} = \tau_e + c\alpha_e \quad (5.9)$$

dove

- g = fattore solare (%)
- I_t = flusso energetico introdotto per trasmissione (W)
- I_a = flusso energetico assorbito e ceduto dal vetro all'ambiente interno (W)
- I = flusso energetico totale incidente sul vetro (W)
- τ_e = coefficiente di trasmissione energetica (%)
- α_e = coefficiente di assorbimento energetico (%)

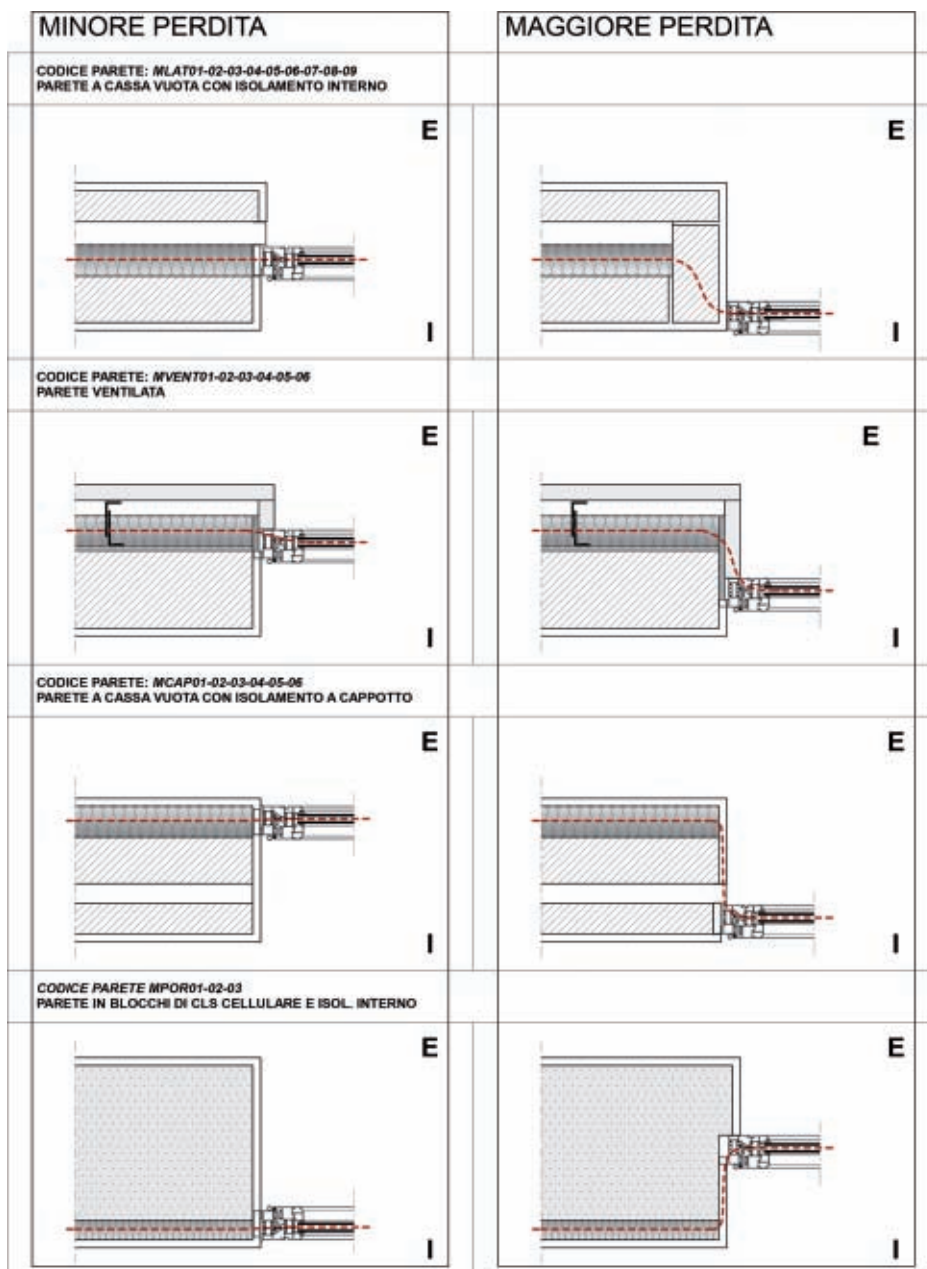


Figura 8.10. Confronto tra diverse posizioni della finestra del vano murario: le perdite di calore sono proporzionali all'inclinazione della curva dell'isoterma (disegno di Arianna Palano)

isolante intermedio, poiché è la zona più fredda: l'isoterma di 10 °C, in genere, si trova proprio lungo il punto di giunzione interno del telaio al muro. Pertanto, quando l'umidità relativa e le temperature interne raggiungono determinati valori, si originano muffe e fenomeni di marcescenza o friabilità nel collegamento tra la spalletta e il telaio. Inoltre, in questa posizione il serramento è eccessivamente esposto alle azioni degli agenti atmosferici e delle intemperie in quanto non è protetto dal vano murario e dal falso telaio. Ciò comporta un maggiore rischio di deperimento o danneggiamento. Inoltre, in assenza di battuta, la tenuta è affidata esclusivamente al sigillante che, con il passare del tempo, si depolimerizza e porta al degrado dell'infisso. Al contrario, garantisce un'ottima tenuta all'aria e all'acqua. L'applicazione più diffusa riguarda l'edilizia scolastica, sportiva o industriale, con il piano di affaccio posto sopra il cono visivo degli utenti.

La posa del serramento sul filo esterno del vano murario è particolarmente utile nel sistema "a cappotto" (figura 8.11). Per garantire la continuità dell'isolamento termico e per semplificare le attività di posa, è corretto posizionare il serramento sul filo esterno della facciata. La curva delle linee isoterme a 10 °C è molto attenuata, poiché si garantisce l'isolamento costante della parete opaca e trasparente. Al contrario, con il serramento posizionato al centro del vano murario, si crea un brusco sbalzo termico che aumenta progressivamente quando viene inserito all'interno, fino a diventare inaccettabile per l'efficienza energetica del sistema.

In questi casi, la tolleranza dimensionale della finestra nel vano murario deve essere molto ridotta, per impedire le infiltrazioni d'aria, che diminuiscono la prestazione termoacustica dell'involucro, e quelle di acqua, che portano al degrado del materiale coibente, del controtelaio, del telaio e degli elementi di giunzione tra vetro e infisso. Per massimizzare l'efficienza energetica è possibile utilizzare le finestre monoblocco o i controtelai integrati. Le prime sono delle strutture autoportanti prodotte in fabbrica in un unico elemento comprendente cassonetto, spalletto e sottobanca. La posa in opera è molto semplice in quanto è sufficiente ancorarle al vano murario, opportunamente distanziate dalla parete con profili a L di spessore pari all'isolamento a cappotto. È fondamentale controllare l'esattezza di questa distanza per garantire la tolleranza dimensionale, l'assenza di infiltrazioni d'aria e la continuità estetica, funzionale e termica tra i diversi elementi tecnici. In questo modo tutte le spallette del foro murario sono coibentate e, pertanto, non è necessario far risvoltare il cappotto termico nella mazzetta. Infine, devono essere sigillate tutte le discontinuità tra finestra e parete, in modo da garantire la risoluzione di tutti i possibili ponti termici. I controtelai integrati sono strutture ottenute dall'abbinamento di spallette termoisolanti e cassonetto termico, scelti tra i differenti modelli di un

medesimo produttore in funzione delle specifiche esigenze progettuali (figura 8.12). Possono comprendere anche una traversa inferiore per il taglio termico del davanzale. Generalmente, l'assemblaggio viene effettuato dal produttore o dal rivenditore e arrivano in cantiere già pronti per essere installati nel vano finestra. A volte però, l'assemblaggio e la sagomatura possono avvenire in cantiere. Il sistema consente una maggiore capacità di adattamento a particolari situazioni costruttive, ma richiede una maggior cura nella scelta e nel montaggio dei singoli elementi.

La posa in opera delle finestre all'interno di un "sistema a cappotto" comporta una serie di accorgimenti (figura 8.13). In primo luogo, prima della rasatura, è opportuno apporre delle armature diagonali sugli angoli (almeno 20×40 centimetri) affogate con un rasante a 45° (figura 8.14). Inoltre, per ridurre il pericolo di cavillatura, è necessario inserire delle strisce di armatura negli angoli interni degli intradossi delle finestre (figura 8.15). Analogamente, la posa in opera di un davanzale prevede una serie di accorgimenti per eliminare il ponte termico che si crea con la finestra e il vano murario. Nei davanzali gettati in opera è necessario inserire delle guarnizioni che impediscono le infiltrazioni d'aria (figura 8.16) mentre nei davanzali pre-montati deve essere inserita un'armatura supplementare per aumentare la resistenza meccanica (figura 8.17).

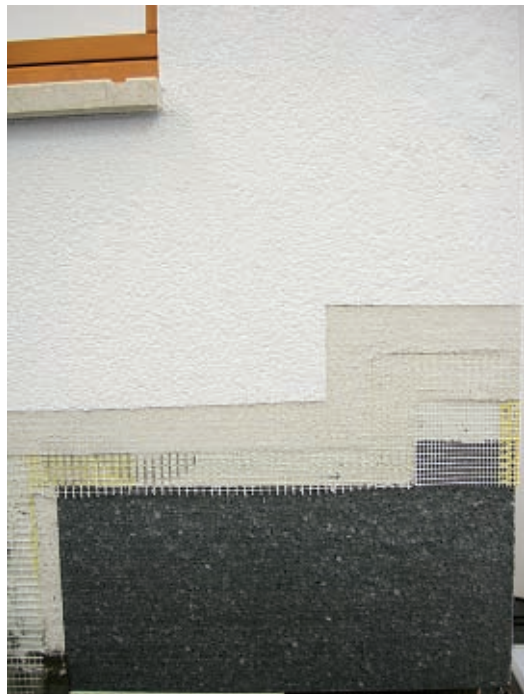


Figura 8.11

La posa del serramento sul filo esterno del vano murario è particolarmente importante per garantire la continuità dell'isolamento termico e per semplificare le attività di posa in presenza di un "sistema cappotto"



Figura 8.12
Posa in opera di un serramento in una parete in muratura: per evitare la formazione di ponti termici è stato inserito uno strato di isolante in fibra di legno tra il vano murario e il telaio ligneo della finestra. L'isolante è poi nastrato per evitare infiltrazioni d'acqua

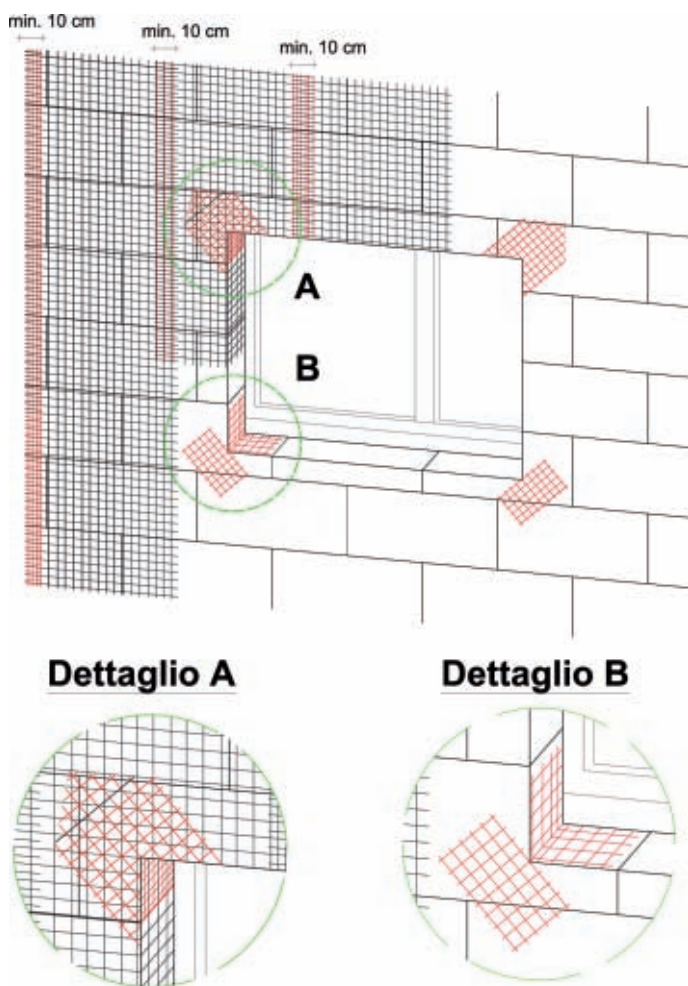


Figura 8.13. Nella posa in opera delle finestre nei "sistemi a cappotto" è opportuno apporre delle armature diagonali sugli angoli prima della rasatura (disegno © Baumit)



Figura 8.14
Inserimento di armature diagonali sugli angoli

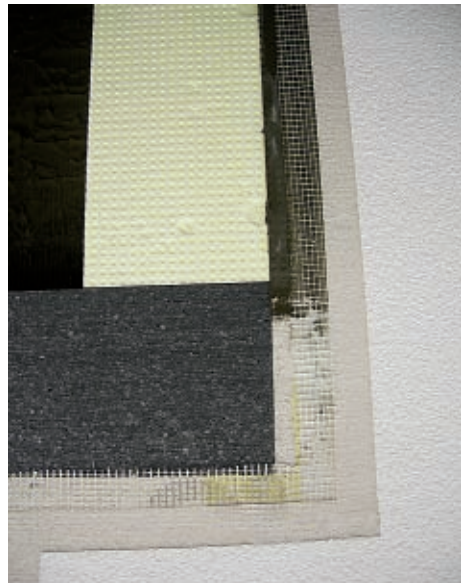


Figura 8.15
Inserimento di strisce di armatura negli
angoli interni degli intradossi delle finestre
per ridurre il pericolo di cavillatura



Figura 8.16
Inserimento di guarnizioni nei davanzali gettati
in opera per impedire le infiltrazioni d'aria

Glossario

Abbagliamento diretto – Abbagliamento provocato da sorgenti luminose dirette. La sua entità dipende dalla luminanza dello sfondo e dalla dimensione delle superfici illuminanti che rientrano nel campo visivo. L'abbagliamento diretto può essere limitato mantenendo la luminanza media degli apparecchi inferiore rispetto alle curve limite all'interno dell'angolazione critica (45° - 85°).

Abbagliamento riflesso – Abbagliamento provocato da una riflessione speculare degli oggetti illuminanti su superfici riflettenti. I riflessi luminosi riducono la capacità visiva e la percezione dei contrasti tra sfondo e immagine.

Abbagliamento – Disturbo causato da luminanze eccessive o da differenze eccessive di luminanze nel campo visivo.

Acuità visiva o acutezza visiva – Capacità dell'occhio di separare oggetti vicini e di cogliere i dettagli. È direttamente proporzionale al livello medio di luminanza nell'ambiente e di contrasto nel campo visivo. Le condizioni visive ottimali si hanno con luminanze superiori a 100 cd/m^2 e con differenze di contrasto maggiori del 90%.

Ambiente climatizzato – Vano o spazio chiuso che, ai fini del calcolo, è considerato riscaldato o raffrescato a determinate temperature di regolazione.

Area climatizzata – Area del pavimento degli ambienti climatizzati, comprendente l'area di tutti i piani se più di uno, esclusi piani interrati o altri ambienti non abitabili. Ai fini del calcolo degli apporti termici interni, è intesa al netto delle pareti perimetrali e di tutti i divisori verticali.

Attestato di certificazione energetica o di rendimento energetico dell'edificio – È il documento redatto nel rispetto delle norme contenute nel presente decreto, attestante la prestazione energetica ed eventualmente alcuni parametri energetici caratteristici dell'edificio.

Bilancio energetico – Somma algebrica tra le dispersioni termiche e gli apporti solari passivi. Le dispersioni termiche individuano il flusso di calore dell'ambiente interno che è dissipato in quello esterno a causa del gradiente termico. Gli apporti solari passivi, o apporti energetici, rappresentano il flusso di calore esterno portato dalle radiazioni solari all'interno degli ambienti.

Capacità termica – Proprietà di un materiale di immagazzinare calore. Tale capacità è legata alla massa ed esprime la quantità di calore necessaria per aumentare di un grado la temperatura di un'unità di volume o di peso del materiale.

Certificazione energetica – Procedura che permette di produrre un'attestazione della prestazione energetica dell'edificio mediante uno o più descrittori di fabbisogno energetico calcolati secondo metodologie normalizzate.

Clima – Caratterizzazione media dei parametri fisici dell'atmosfera terrestre in una determinata area geografica e per un periodo di tempo di riferimento (pari ad almeno un decennio) con dati meteorologici. I parametri fisici caratterizzanti sono: temperatura, radiazione solare, velocità e direzione del vento, pressione, umidità relativa e piovosità.

Coefficiente di assorbimento energetico (a_e) – Indica il rapporto tra l'energia assorbita e quella totale incidente sul vetro: $a_e = \frac{I_a}{I}$. In pratica, indica la percentuale di energia assorbita dal vetro.

Coefficiente di assorbimento luminoso (a_l) – Indica il rapporto tra il flusso luminoso assorbito e quello totale incidente sul vetro: $t_l = \frac{G_a}{G}$. In pratica, indica la percentuale di radiazione visibile assorbita dal vetro.

Coefficiente di riflessione energetica (r_e) – Indica il rapporto tra l'energia riflessa e quella totale incidente sul vetro: $r_e = \frac{T_r}{I}$. In pratica, indica la percentuale di energia che un vetro riflette verso l'esterno del locale.

Coefficiente di riflessione luminosa (r_l) – Indica il rapporto tra il flusso luminoso riflesso e quello totale incidente sul vetro: $t_l = \frac{G_r}{G}$. In pratica, indica la percentuale di radiazione visibile che un vetro riflette verso l'esterno del locale.

Coefficiente di trasmissione energetica (t_e) – Indica il rapporto tra l'energia trasmessa e quella totale incidente sul vetro: $t_e = \frac{I_t}{I}$. In pratica, indica la percentuale di energia che un vetro lascia passare all'interno del locale.

Coefficiente di trasmissione luminosa (t_l) – Indica il rapporto tra il flusso luminoso trasmesso e quello totale incidente sul vetro: $t_l = \frac{G_t}{G}$. In pratica, indica la percentuale di radiazione visibile che un vetro lascia passare all'interno del locale.

Compito visivo – Attività visiva svolta in un determinato luogo.

Conduzione – Trasferimento di calore che avviene tra due corpi a contatto diretto. La velocità di trasmissione dipende dalla conducibilità termica dei materiali coinvolti.

Convezione – Trasferimento di calore tra fluidi, gas o liquidi, che avviene con trasporto di materia, ovvero con movimento di molecole.

Diagnosi energetica (o audit energetico) – Procedura sistematica volta a fornire una adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività o di un impianto industriale o di servizi pubblici o privati, a individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e riferire in merito ai risultati.

Edificio – Sistema costituito dalle strutture edilizie esterne che delimitano uno spazio di volume definito, dalle strutture interne che ripartiscono detto volume e da tutti gli impianti e dispositivi tecnologici che si trovano stabilmente al suo interno; la superficie esterna che delimita un edificio può confinare con tutti o alcuni di questi elementi: l'ambiente esterno, il terreno, altri edifici; il termine può riferirsi a un intero edificio ovvero a parti di edificio progettate o ristrutturate per essere utilizzate come unità immobiliari a sé stanti.

Efficienza energetica – Rapporto tra i risultati in termini di rendimento, servizi, merci o energia, da intendersi come prestazione fornita, e l'immissione di energia.

Energia – Attitudine di un sistema a compiere lavoro (J o kWh). È potenza nel tempo.

Fabbisogno di energia termica (utile) – Quantità di calore che deve essere fornita o sottratta a un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo.

Fabbisogno ideale di energia termica (utile) – Fabbisogno di energia termica riferito a condizioni di temperatura dell'aria uniforme in tutto l'ambiente climatizzato.

Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale (EP_i) – Prestazione energetica del sistema edificio-impianto per il solo riscaldamento.