

Stefano Agnoli - Michele Zinzi



Scheda sul sito >

INVOLUCRO TRASPARENTE ED EFFICIENZA ENERGETICA

TECNOLOGIE, PRESTAZIONI E CONTROLLO AMBIENTALE

Tecnologia del vetro - Schermature solari
Materiali trasparenti innovativi - Telai
Metodi di calcolo e di misura
Sistemi trasparenti e prestazioni energetiche degli edifici

Stefano Agnoli Michele Zinzi

INVOLUCRO TRASPARENTE ED EFFICIENZA ENERGETICA

Tecnologie, prestazioni e controllo ambientale



Dario Flaccovio Editore

Stefano Agnoli – Michele Zinzi

INVOLUCRO TRASPARENTE ED EFFICIENZA ENERGETICA

Tecnologie, prestazioni e controllo ambientale

ISBN 978-88-579-0201-2

© 2013 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: ottobre 2013

Agnoli, Stefano <1972->

Involucro trasparente ed efficienza energetica : tecnologie, prestazioni e controllo ambientale / Stefano Agnoli, Michele Zinzi. - Palermo : D. Flaccovio, 2013.

ISBN 978-88-579-0201-2

1. Rivestimenti murali – Impiego [di] Materiali trasparenti – Risparmio energetico.

I. Zinzi, Michele <1968->.

720.472 CDD-22

SBN PAL0260947

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana “Alberto Bombace”

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, ottobre 2013

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 Generalità

1. Aspetti preliminari

1.1. Il ruolo dell'involucro trasparente negli edifici	»	3
1.2. Il problema energetico ambientale.....	»	9
1.3. Il quadro legislativo nazionale.....	»	12
1.4. Il mercato dei serramenti e dell'involucro trasparente	»	15

2. Cenni di fisica dell'edificio

2.1. Introduzione	»	19
2.2. La trasmissione del calore e la trasmittanza termica	»	20
2.2.1. Il calore.....	»	20
2.2.2. La trasmissione del calore per conduzione	»	21
2.2.3. La trasmissione del calore per convezione.....	»	23
2.2.4. La trasmissione del calore per irraggiamento	»	25
2.2.5. La trasmissione del calore attraverso un componente in regime stazionario	»	28
2.2.6. La trasmissione del calore attraverso una parete con intercapedine..	»	30
2.3. La radiazione solare e le grandezze ottiche	»	32
2.3.1. Natura e caratteristiche della radiazione solare.....	»	32
2.3.2. I materiali e la radiazione solare	»	34
2.3.3. Le proprietà ottiche e solari dei materiali trasparenti.....	»	37
2.4. La trasmissione dell'aria (ventilazione, infiltrazioni, permeabilità).....	»	40
2.4.1. Ventilazione naturale.....	»	40
2.4.2. Infiltrazioni e permeabilità	»	43
2.4.3. Ricambi d'aria nel bilancio termico dell'edificio.....	»	44
2.5. I componenti trasparenti nel bilancio termico degli edifici	»	45

2.6.	I componenti trasparenti e l'illuminazione naturale degli edifici	»	50
2.6.1.	Il calcolo del fattore di luce diurna.....	»	51
2.6.2.	Il calcolo dei consumi per illuminazione artificiale	»	52

PARTE SECONDA

Tecnologie

3. Tecnologia del vetro

3.1.	Produzione e trasformazione	»	57
3.1.1.	Produzione.....	»	57
3.1.1.1.	Il rivestimento.....	»	61
3.1.2.	Trasformazione.....	»	63
3.2.	Le diverse tipologie di vetro – prestazioni meccaniche e sicurezza.....	»	66
3.2.1.	Il vetro temprato	»	67
3.2.2.	Il vetro indurito.....	»	72
3.2.3.	Il vetro stratificato	»	73
3.3.	Le caratteristiche energetiche del vetro float	»	75
3.4.	I vetri rivestiti	»	78
3.4.1.	Il vetro a controllo solare	»	79
3.4.2.	Il vetro bassoemissivo	»	81
3.4.3.	Il vetro a filtro solare	»	83
3.5.	Il distanziatore	»	85
3.6.	La vetrata isolante.....	»	87
3.6.1.	Le prestazioni termiche della vetrata isolante.....	»	88
3.6.1.1.	La riduzione degli scambi termici conduttivi e convettivi	»	92
3.6.1.2.	La riduzione degli scambi termici radiativi.....	»	95
3.6.1.3.	L'influenza dei trattamenti superficiali sugli apporti solari e luminosi	»	96
3.6.1.4.	Considerazioni	»	99

4. Le schermature solari

4.1.	Introduzione.....	»	101
4.2.	Classificazione delle schermature solari.....	»	102
4.2.1.	Funzione dei materiali per le schermature solari	»	102
4.2.2.	Gestione delle schermature solari	»	103
4.2.3.	Struttura e geometria delle schermature solari.....	»	105
4.2.4.	Posizione rispetto alla superficie trasparente	»	109
4.2.5.	I materiali per le schermature solari.....	»	112
4.3.	Le caratteristiche termo-fisiche delle schermature solari	»	114
4.3.1.	Le caratteristiche dei materiali	»	114
4.3.2.	Le caratteristiche dei componenti assemblati.....	»	116

5. Materiali trasparenti innovativi

5.1. Introduzione.....	» 123
5.2. I materiali trasparenti isolanti.....	» 124
5.3. Aerogel.....	» 131
5.4. Pellicole in intercapedine.....	» 136
5.5. Vetrare evacuate.....	» 138
5.6. I vetri elettrocromici e altri materiali cromogenici.....	» 141
5.6.1. I vetri elettrocromici.....	» 143
5.6.2. Altri materiali cromogenici.....	» 148
5.6.3. I dispositivi a cristalli e particelle sospese.....	» 151
5.7. Le pellicole trasparenti.....	» 155
5.8. I tessuti semitrasparenti e ETFE.....	» 157
5.8.1. L'ETFE.....	» 159
5.9. I materiali a cambiamento di fase.....	» 161
5.10. PV integrato e solar cells.....	» 163
5.10.1. Sistemi filtranti (<i>light through</i>).....	» 166
5.10.2. Sistemi trasparenti (<i>see through</i>).....	» 168
5.10.3. Sistemi trasparenti organici (<i>dye sensitised solar cells</i>).....	» 169
5.10.4. Sistemi speciali.....	» 170
5.11. Schermature solari integrate nei componenti trasparenti.....	» 171
5.12. I sistemi prismatici.....	» 177
5.13. Facciate ventilate.....	» 180
5.13.1. Facciata ventilata con sviluppo su più piani.....	» 182
5.13.2. Facciata ventilata con interruzione su ogni piano.....	» 183
5.13.3. La doppia finestra.....	» 185
5.13.4. Considerazioni generali.....	» 185
5.14. Elementi trasparenti in materiale plastico.....	» 186

6. Telai

6.1. Caratteristiche dei serramenti.....	» 189
6.2. Profili in alluminio.....	» 190
6.2.1. Le prestazioni termiche dei telai metallici.....	» 191
6.3. Profili in PVC.....	» 195
6.3.1. Le prestazioni termiche dei telai in PVC.....	» 196
6.4. Profili in legno.....	» 198
6.4.1. Caratteristiche e prestazioni termiche degli infissi in legno.....	» 199
6.5. Telai composti.....	» 202

PARTE TERZA

Calcolo e misura delle proprietà dell'involucro trasparente

7. La marcatura CE e i marchi di qualità volontari

7.1. Generalità.....	» 207
----------------------	-------

7.2.	La Direttiva 89/106/CE.....	» 208
7.3.	Il nuovo Regolamento 305/11/CE	» 208
7.4.	Le norme armonizzate	» 210
7.5.	Il cascading delle prove ITT	» 211
7.6.	La marcatura CE delle vetrate isolanti (norma UNI EN 1279-5).....	» 212
7.7.	La marcatura CE dei serramenti (norma UNI EN 14351-1).....	» 214
7.8.	La marcatura CE di tende e chiusure oscuranti esterne (norme UNI EN 13561 – UNI EN 13659).....	» 215
7.9.	Il marchio CE.....	» 216
7.10.	Marchi di qualità volontaria – il marchio UNI per le vetrate isolanti	» 216

8. Determinazione della trasmittanza termica del serramento e dei suoi componenti

8.1.	Introduzione.....	» 219
8.2.	Metodi di calcolo e di misura per la determinazione delle prestazioni termiche dei serramenti.....	» 220
8.3.	Metodi di calcolo	» 221
8.3.1.	Calcolo della trasmittanza termica della vetrata isolante – la norma UNI EN 673	» 222
8.3.2.	Calcolo della trasmittanza termica dei serramenti (UNI EN ISO 10077-1).....	» 225
8.3.2.1.	Telai in alluminio	» 230
8.3.2.2.	Telai in PVC	» 233
8.3.2.3.	Telai in legno	» 233
8.3.2.4.	Il contributo dei sistemi oscuranti	» 234
8.3.3.	Esempio di calcolo	» 236
8.3.4.	Calcolo della trasmittanza termica dei serramenti (UNI EN ISO 10077-2).....	» 240
8.3.5.	Estendibilità dei valori di trasmittanza termica (UNI EN 14351-1)	» 242
8.4.	Metodi di misura.....	» 243
8.4.1.	Misura della trasmittanza termica delle vetrate isolanti (UNI EN 674).....	» 244
8.4.2.	Misura della trasmittanza termica delle vetrate isolanti (UNI EN 675).....	» 246
8.4.3.	Misura della trasmittanza termica con il metodo della camera calda (UNI EN ISO 12567-1 – UNI EN 12412-2).....	» 247

9. Determinazione delle caratteristiche ottiche e solari della vetrata isolante e delle schermature solari

9.1.	Introduzione.....	» 251
9.2.	Il calcolo delle proprietà solari e luminose della vetrata isolante (UNI EN 410-2011).....	» 251

9.3. Il calcolo delle proprietà solari e luminose della vetrata isolante con schermature solari (UNI EN 13363:2006).....	» 258
9.3.1. Il metodo semplificato.....	» 258
9.3.2. Il metodo dettagliato.....	» 261
9.3.3. Cenni sul metodo dettagliato definito dalla ISO 15099:2003	» 264
9.4. La determinazione delle proprietà solari e luminose dei materiali di base	» 266
9.5. La determinazione delle proprietà solari e luminose di sistemi complessi	» 268
9.5.1. Misura delle proprietà ottiche con sfera integratrice di grandi dimensioni	» 268
9.5.2. Misura del fattore solare con metodo calorimetrico.....	» 270

10. La classificazione e la misura della permeabilità all'aria dei serramenti

10.1. Introduzione.....	» 273
10.2. La misura della permeabilità all'aria dei serramenti	» 276
10.3. Classificazione dei serramenti per la permeabilità all'aria	» 277

11. Strumenti per la progettazione e la verifica dei sistemi trasparenti e dei serramenti

11.1. Introduzione.....	» 281
11.2. WINSHELTER.....	» 281
11.2.1. Generalità	» 281
11.2.2. Il modulo per il calcolo delle proprietà di sistemi trasparenti con schermature solari.....	» 282
11.2.3. Il modulo per il calcolo della trasmittanza termica	» 283
11.2.4. Database	» 284
11.2.5. Interfaccia di calcolo	» 284
11.3. WIS.....	» 286
11.3.1. Generalità	» 286
11.3.2. Funzionalità	» 287
11.3.4. Database	» 287
11.3.5. Interfaccia.....	» 288
11.4. Optics.....	» 290
11.4.1. Funzionalità.....	» 290
11.4.2. Database	» 291
11.4.3. Interfaccia.....	» 292
11.5. Window.....	» 293
11.5.1. Funzionalità	» 293
11.5.2. Database	» 294
11.5.3. Interfaccia.....	» 294

PARTE QUARTA

L'influenza dell'involucro trasparente sulle prestazioni degli edifici

12. Il bilancio energetico del serramento e dei componenti trasparenti

12.1. Il bilancio energetico del serramento	» 299
12.2. Procedura operativa per un'analisi del bilancio energetico del serramento	» 301
12.3. Applicazione del bilancio energetico per alcuni componenti vetrati.....	» 302
12.3.1. L'influenza dell'orientamento	» 303
12.3.2. Il bilancio energetico estivo e invernale	» 304
12.3.3. La durata della stagione di climatizzazione estiva	» 305
12.3.4. L'influenza dell'ombreggiamento	» 306
12.3.5. Risultati per diverse zone climatiche	» 308
12.4. Considerazioni su potenzialità e limiti dell'approccio	» 310

13. Impatto delle superfici trasparenti sulle prestazioni energetiche degli edifici residenziali

13.1. Introduzione	» 313
13.2. Metodologia	» 313
13.2.1. Descrizione geometrica degli ambienti	» 315
13.3. Il software ENERGYPLUS per la simulazione energetica degli edifici	» 318
13.4. Risultati	» 319
13.4.1. Fabbisogni energetici per il riscaldamento (<i>heating</i>)	» 320
13.4.2. Fabbisogni energetici per la climatizzazione (<i>heating-cooling</i>)	» 326
13.5. Conclusioni	» 331

14. Impatto dei sistemi trasparenti complessi sulle prestazioni energetiche degli edifici appartenenti al settore terziario

14.1. Introduzione	» 333
14.2. Casi studio	» 334
14.2.1. Descrizione geometrica dell'ambiente e condizioni al contorno ...	» 334
14.3. L'influenza dei sistemi trasparenti complessi sui consumi di energia elettrica per l'illuminazione artificiale negli uffici	» 336
14.3.1. Il software DaySim per la simulazione dei consumi elettrici annui per l'illuminazione degli edifici	» 336
14.3.2. Ipotesi di calcolo	» 338
14.3.3. Analisi	» 340
14.4. L'influenza dei sistemi trasparenti complessi sui fabbisogni di energia per il raffrescamento negli uffici.....	» 351
14.4.1. Caratteristiche dell'involucro e dei sistemi trasparenti	» 351
14.4.1.1. Pareti opache	» 352
14.4.1.2. Il serramento	» 352

14.4.1.3. Caratteristiche e geometria delle lamelle dei sistemi schermanti.....	» 354
14.4.2. Gestione dei sistemi di controllo.....	» 355
14.4.3. Ipotesi di calcolo e condizioni al contorno.....	» 356
14.4.4. Analisi dei risultati.....	» 359
14.4.4.1. La prestazione in funzione delle tipologie di vetro studiate.....	» 359
14.4.4.2. La prestazione in funzione delle caratteristiche energetiche delle lamelle.....	» 362
14.4.4.3. La prestazione in funzione della posizione dei sistemi schermanti.....	» 365
14.4.4.4. La prestazione in funzione del tipo di controllo sui sistemi schermanti.....	» 365
14.4.5. Conclusioni.....	» 366
14.5. Allegati.....	» 368

15. L'influenza dei sistemi trasparenti complessi sulla distribuzione della luce naturale – comfort visivo

15.1. Introduzione.....	» 375
15.2. Il software Radiance per la simulazione illuminotecnica degli edifici.....	» 376
15.3. Ipotesi di calcolo.....	» 377
15.4. Limiti della simulazione.....	» 378
15.5. Analisi dei risultati.....	» 379
15.5.1. Esposizione est.....	» 379
15.5.2. Esposizione sud.....	» 388
15.6. Conclusioni.....	» 390
Bibliografia.....	» 393
Riferimenti normativi.....	» 395

Premessa

La sempre maggiore attenzione delle politiche energetiche comunitarie e nazionali verso i temi del risparmio e dell'efficienza energetica degli edifici ha portato a un'evoluzione nel modo di progettare imponendo a tutti gli operatori del settore di acquisire una conoscenza approfondita sui nuovi materiali da costruzione e sui relativi livelli prestazionali, oltreché sui metodi di calcolo e di valutazione necessari per determinare l'impatto che l'applicazione di tali prodotti ha sull'involucro edilizio.

Il tema è di grande rilievo nell'architettura moderna, caratterizzata da un utilizzo sempre maggiore di superfici vetrate. L'involucro trasparente ha un ruolo fondamentale nel definire la qualità architettonica di un manufatto ma le caratteristiche intrinseche dei materiali utilizzati non sempre si traducono nei migliori risultati in termini di efficienza energetica e sostenibilità dell'edificio.

Oggi il mercato delle costruzioni mette a disposizione componenti e sistemi in grado di soddisfare le diverse esigenze di una committenza sempre più attenta ed informata su tali temi. La continua ricerca verso il miglioramento delle prestazioni dei componenti edilizi, e dei sistemi trasparenti in particolare, ha infatti notevolmente migliorato le performance dei sistemi convenzionali in termini di: isolamento termico, controllo della radiazione solare, ottimizzazione dello sfruttamento della luce naturale. Nuove soluzioni applicate ai telai dei serramenti, alle schermature solari e, soprattutto, alla tecnologia del vetro piano modificano in modo opportuno le caratteristiche ottiche e termiche dei sistemi tradizionali. Il miglioramento delle proprietà termofisiche dei prodotti disponibili per il moderno involucro trasparente consente di migliorare i livelli di comfort indoor e di ridurre i consumi energetici relativi all'uso degli impianti di climatizzazione, durante le stagioni invernale ed estiva, e di illuminazione artificiale.

In questo scenario diventa quindi fondamentale la capacità, da parte del professionista, di controllare tutte le variabili che concorrono alla definizione di un edificio ad elevate prestazioni prevedendo, con un elevato grado di attendibilità, il comportamento dell'intero involucro edilizio in funzione dei componenti trasparenti scelti; solo in questo modo infatti sarà possibile individuare quali

tra essi sia il più idoneo al raggiungimento degli obiettivi progettuali prefissati. Il libro, nel rappresentare un valido supporto tecnico al quale fare riferimento, ha come obiettivo quello di fornire alle figure professionali che si occupano di progettazione energetica di edifici ad elevata complessità, caratterizzati dalla presenza di superfici trasparenti ad alte prestazioni, gli strumenti necessari per approfondire la propria conoscenza sulle tecnologie attualmente esistenti, in modo da comprenderne il funzionamento e potersi così orientare verso il prodotto più idoneo a rispondere alle esigenze richieste dalla committenza. Una lettura approfondita del testo, inoltre, consente di acquisire familiarità con i metodi di calcolo, semplificati e dettagliati, e di misura per determinare le prestazioni di un componente trasparente, di progettarlo secondo i livelli prestazionali attesi, e di eseguire un calcolo previsionale sull'influenza che tali componenti possono avere sui fabbisogni energetici per la climatizzazione e l'illuminazione.

Il testo è suddiviso in quattro parti: la prima, relativa a un inquadramento normativo in materia di efficienza energetica degli edifici e a richiami di fisica tecnica; la seconda, dove vengono presentate in dettaglio le tecnologie dei sistemi trasparenti (il vetro, le schermature solari, i materiali trasparenti innovativi ad elevate prestazioni e i telai); la terza, dove sono illustrati in maniera approfondita i metodi di calcolo e di misura previsti dalle norme di riferimento per determinare le prestazioni termiche e ottiche dei sistemi trasparenti, nella quale il lettore verrà aiutato a familiarizzare con tali procedure attraverso alcuni esempi di calcolo; la quarta, dove vengono presentati i risultati di numerosi casi studio che dimostrano quantitativamente come le differenti tecnologie dei sistemi trasparenti influenzino l'efficienza dell'involucro edilizio in funzione: della zona climatica di riferimento, della tipologia edilizia considerata, dell'esposizione dell'edificio, della destinazione d'uso (residenziale o terziario) e del tipo di componente adottato in termini di fabbisogni per la climatizzazione, di consumi per l'illuminazione e di comfort visivo e termoigrometrico.

L'ultima parte del libro potrà essere utilizzata dal professionista come supporto verso la scelta del prodotto più idoneo a rispondere alle proprie esigenze progettuali, che incontra caso per caso durante la propria attività professionale, avendo a disposizione un ricco database dal quale poter individuare come i diversi prodotti si comportano nelle diverse condizioni di applicazione.

PARTE PRIMA
Generalità

1. Aspetti preliminari

1.1. Il ruolo dell'involucro trasparente negli edifici

Introdurre il ruolo dell'involucro trasparente è come ripercorrere, in parallelo, la storia dell'uomo e l'evoluzione del modo di realizzare e fruire lo spazio costruito. Esiste una bibliografia pressoché sterminata sull'evoluzione dei materiali trasparenti e del serramento, e su come questi abbiano nel corso dei secoli contribuito a dare forma al manufatto edilizio. È a tale bibliografia che si rimanda il lettore interessato. Ciò che interessa in questa sede è una rapida introduzione per definire il quadro in cui si inseriscono i temi, prettamente tecnici, trattati nel volume.

Conviene innanzitutto accennare alle funzioni dell'involucro trasparente, con la premessa che le priorità funzionali dipendono dalle condizioni climatiche e l'uso dell'edificio:

- isolamento termico: come tutti i componenti dell'involucro edilizio, anche le parti trasparenti devono limitare gli scambi di calore con l'ambiente esterno. L'isolamento termico è fondamentale durante la stagione invernale in tutti quei climi, inclusi quelli temperati come l'Italia, in cui la temperatura esterna scende decisamente al di sotto delle condizioni di comfort termico;
- apporto solare: captazione della radiazione solare incidente sulle superfici trasparenti con successivo accumulo termico da parte delle strutture dell'edificio. Funzione tipicamente invernale che consente di mitigare le perdite termiche dell'involucro attraverso l'emissione del calore assorbito sotto forma di energia solare;
- protezione solare: intercettazione e riduzione della radiazione solare che altrimenti andrebbe ad incidere sui componenti trasparenti dell'involucro edilizio. Funzione tipicamente estiva, essendo la radiazione solare fonte prevalente di surriscaldamento degli edifici;
- illuminazione naturale: le aperture praticate nell'involucro edilizio consentono l'ingresso della luce naturale in ambiente, necessaria per tutte le attività che richiedono un compito visivo per essere assolte. Si noti la dualità del problema: è necessario provvedere a livelli minimi di illuminazione, ponendo però dei limiti alle modalità di introduzione per evitare fenomeni di abbagliamento. Problema, quindi, di qualità e quantità della luce naturale, per una funzione che è ovviamente indipendente dal periodo dell'anno;

- ventilazione naturale: attraverso l'apertura e la chiusura delle finestre è possibile modulare la quantità d'aria di rinnovo all'interno dell'ambiente. Essendo un problema di salubrità, la funzione è richiesta in ogni periodo.

Esistono poi una serie di funzioni che esulano dai temi trattati dal volume e che devono essere comunque garantite:

- la funzione strutturale, di grande importanza nell'architettura moderna, in cui il vetro strutturale ha sempre maggiore impiego;
- l'isolamento acustico, anch'esso sempre di maggiore rilievo visto il livello di inquinamento acustico raggiunto nei centri urbani;
- la sicurezza, da intendersi sia nel senso di antintrusione che nel senso di piena operabilità dei sistemi trasparenti fissi e mobili senza rischi per l'incolumità degli utenti.

Ultima funzione ma probabilmente la più importante è quella di garantire agli essere umani chiusi all'interno di un guscio artificiale una relazione costante con l'ambiente esterno. Si tratta di una funzione fondamentale, insieme fisiologica, biologica e psicologica, che garantisce il contatto visivo tra l'ambiente costruito e quello esterno. L'interazione visiva consente di conoscere l'evoluzione delle condizioni climatiche e meteorologiche e il trascorrere delle ore della giornata: essere in connessione, in altre parole, con il mondo esterno.

L'evoluzione dell'edilizia, sin dall'epoca della caverna, evidenzia una continua aspirazione ad aprire l'ambiente costruito verso l'esterno per garantire, fra gli altri, adeguati livelli di illuminazione e ventilazione. Aspirazione che ha modellato nel corso dei secoli anche l'immagine e il progetto degli edifici in relazione al contesto climatico. Esempi noti di architettura vernacolare sono le abitazioni massive con piccole finestre dei climi caldo-secchi, nei quali è necessario proteggere opportunamente l'ambiente costruito dal carico termico dovuto alla radiazione solare, che penetra attraverso le *bucature* dell'involucro edilizio. L'architettura tradizionale dei climi caldo-umidi è invece caratterizzata da ampie aperture, magari opportunamente schermate, per favorire quanto più possibile la ventilazione naturale, strategia principale di controllo del comfort termo-igrometrico in quei climi. Schemi di abitazioni tradizionali nei due climi sopracitati sono presentati nelle figure 1.1 e 1.2.

L'opportuno disegno delle aperture dell'edificio in relazione alle condizioni climatiche vanta, in effetti, origini molto antiche. Socrate, citato da Senofonte, suggeriva di realizzare abitazioni *aperte* sulla facciata esposta a sud per sfruttare i raggi solari in inverno, ma di proteggere tale facciata con dei porticati che fungessero da schermo durante la stagione estiva, quando il sole alto sull'orizzonte non riesce a far penetrare la radiazione solare all'interno dell'edificio. Viceversa la facciata esposta a nord doveva essere ribassata, massiva e con aperture ridottissime per proteggere l'edificio dai freddi venti invernali. Lo schema di questa semplice abitazione è presentato in figura 1.3. Molto più dettagliati sono gli

studi e le indicazioni di Vitruvio qualche secolo dopo: la distribuzione degli spazi interni e delle aperture delle dimore romane e l'utilizzo dei porticati per la protezione solare evidenziano un'attenzione all'analisi bioclimatica del sito e alle soluzioni progettuali da adottare negli edifici.



Figura 1.1. Finestre come piccole bucatore sulle facciate massive di abitazioni in climi caldo-secchi



Figura 1.2. Ampie aperture nelle abitazioni in climi caldo-umidi assicurano una buona ventilazione naturale (fonte: prof. Gabriele Masera)

Le superfici trasparenti e le finestre sono state, e sono tutt'ora, componenti edilizi significativi per caratterizzare gli stili architettonici che si sono succeduti nel corso dei secoli. L'involucro trasparente, dunque, risponde ad una esigenza di comfort per l'essere umano e, al tempo stesso, contribuisce a definire la qualità architettonica di un manufatto. Scrive Mies van der Rohe: la storia dell'architettura è la storia della lotta dell'uomo per la luce – la storia della finestra.

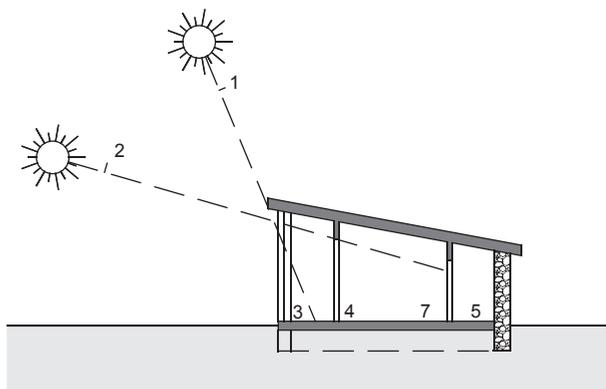


Figura 1.3. Sezione della casa bioclimatica di Socrate

Il secondo aspetto ha preso troppo spesso il sopravvento sul primo a partire dall'inizio del ventesimo secolo, allorché è stato possibile realizzare edifici climatizzati e illuminati in modo artificiale. La relazione tra microclima esterno e microclima dello spazio costruito è diventata sempre più labile, fino ad annullarsi negli edifici vetrati costruiti per decenni allo stesso modo indipendentemente dalle condizioni climatiche del sito. Il vetro, insieme all'acciaio, è stato il materiale per eccellenza dell'edilizia e dell'architettura durante il secolo passato, soprattutto nel settore terziario e commerciale. Le superfici trasparenti e i serramenti hanno quindi giocato un ruolo fondamentale nel definire la qualità architettonica dell'edificio e assumendo addirittura valori paradigmatici in alcuni casi esemplari, come illustrato nelle figure 1.4-1.6.

Nel corso degli anni diversi studi hanno, però, dimostrato che la qualità energetica e ambientale di questi edifici, acriticamente realizzati, era spesso scadente, soprattutto se confrontata con quella di edifici progettati con un approccio *tradizionale*. Le prossime pagine illustreranno quali siano le caratteristiche del vetro (e di altri materiali trasparenti) e le conseguenze, dal punto di vista energetico e ambientale, di una progettazione architettonica che non tratti in modo adeguato questa materia complessa. La situazione generale degli ultimi decenni (riscaldamento globale, riduzione delle fonti energetiche fossili, lento sviluppo e penetrazione sul mercato delle energie rinnovabili) ha spinto sulla necessità di un uso più razionale dell'energia negli edifici. Questo clima ha portato ad eccellenti esempi di edifici (essenzialmente trasparenti) energeticamente efficienti e con elevati standard di comfort visivo e luminoso. A titolo di esempio, la figura 1.7 offre una visione d'insieme della nuova ala (Modern Wing) del Chicago Art Institute, progettata da Renzo Piano. Si tratta di un manufatto trasparente, con vetrate di elevato potere isolante, integrate con schermature solari interne ed esterne, che modulano la luce naturale e gli apporti solari in modo da garantire elevati standard energetici. L'edificio è infatti candidato per la certificazione ambientale LEED silver.



Figura 1.4. Finestra a nastro nell'architettura razionalista di Le Corbusier (Villa Savoye) (© Nick and Archikey.com)



Figura 1.5. Finestra estrusa dalla facciata nell'architettura di Gehry (Casa Danzante a Praga) (© Thomas and Archikey.com)



Figura 1.6. Grattacielo per uffici in vetro e metallo nell'architettura di Mies van der Rohe (Dominion Centre a Toronto) (© Thomas and Archikey.com)

Molti altri esempi si potrebbero fare, dal momento che gli standard tecnologici attuali forniscono la possibilità di realizzare edifici efficienti, che richiedono tuttavia conoscenza e accuratezza da parte del progettista e dell'esecutore dei lavori.



Figura 1.7. Modern Wing di Renzo Piano a Chicago

1.2. Il problema energetico ambientale

Appare quasi superfluo notare il rischio ambientale che il pianeta attraversa. Fenomeni come i cambiamenti climatici e il riscaldamento globale sono noti all'opinione pubblica, così come i rischi ad essi connessi. I dati relativi all'aumento della concentrazione di anidride carbonica evidenziano un forte legame con le attività antropogeniche. L'andamento della curva riportata in figura 1.8 evidenzia come sia radicalmente cambiata la quantità di emissioni di CO_2 proveniente da fonte fossile in atmosfera a partire dalla metà del 1700. Le emissioni sono letteralmente esplose a partire dalla seconda metà del XX secolo, emissioni ovviamente legate in larga parte agli usi energetici. I dati provengono dal CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) del Dipartimento dell'Energia (DOE) negli Stati Uniti.

L'incremento della concentrazione di CO_2 in atmosfera, il principale tra i gas climalteranti, ha un notevole impatto sull'andamento delle temperature. Da questo punto di vista, è interessante osservarne l'evoluzione in figura 1.9. Il dato si riferisce alla temperatura media annuale della superficie terrestre. Ma più dei valori assoluti, è importante osservare il trend di crescita, soprattutto negli ultimi decenni. Ancora una volta i dati confermano un'alterazione dell'equilibrio termico del pianeta dovuto ad attività antropogeniche. Il tema molto dibattuto è se tali alterazioni siano naturali o causate dall'attività umana, essendo la seconda

opzione ritenuta la più plausibile dalla maggioranza della comunità scientifica. In questa sede ci si limita a riportare la considerazione secondo cui il riscaldamento globale comporterà rischi e alterazioni da molti giudicati irreversibili se l'incremento di temperatura supererà i 2 °C.

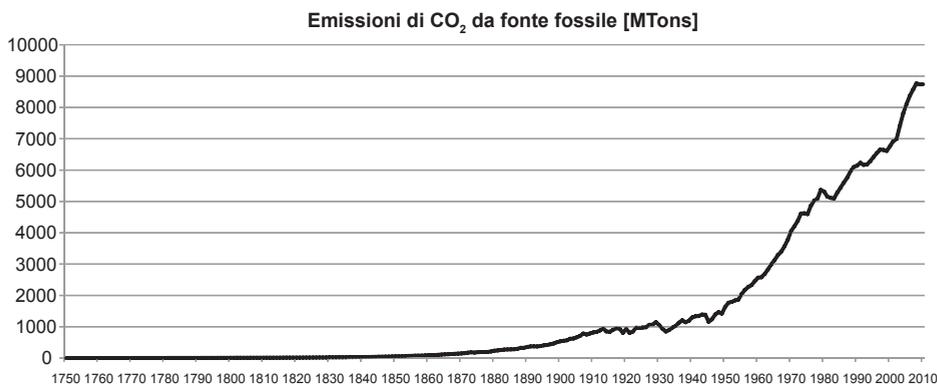


Figura 1.8. Emissioni di CO₂ in atmosfera a partire dal 1700

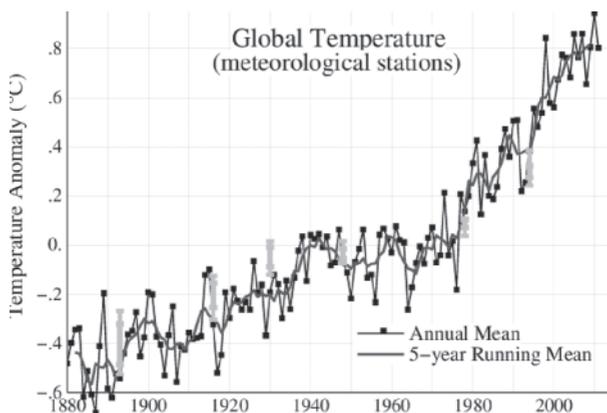


Figura 1.9. Andamento della temperatura media annuale della superficie terrestre (fonte: Nasa)

È noto che gran parte di tali attività non avrebbe potuto avere luogo senza enormi quantità di energia prodotta ed utilizzata. Tutto questo è avvenuto nei paesi industrializzati per decenni, al punto che è solo negli ultimi 20-30 anni che il problema energetico e ambientale è stato globalmente riconosciuto, senza peraltro arrivare a soluzioni condivise per limitarlo. Al contrario, l'affacciarsi di nuove e formidabili economie rende la risoluzione decisamente più complessa.

Alcuni dati interessanti sono ricavabili dal Rapporto Energia e Ambiente, pubblicato annualmente da ENEA (www.enea.it). Sul nostro pianeta gli usi finali di energia nel 2009 sono stati pari a circa 7.5 Gtep (miliardi di tonnellate equi-

valenti di petrolio, unità di misura che esprime l'energia ottenibile attraverso la trasformazione una tonnellata di petrolio), ultimo dato disponibile, con un incremento di circa il 34% rispetto ai valori del 1990.

L'Italia contribuisce a questa cifra con una percentuale ovviamente piccola. Osservando i dati dal punto di vista nazionale possono, però, essere fatte alcune interessanti considerazioni. Limitandoci a considerare i consumi energetici a partire dal 1990, gli usi finali di energia sono passati da 123 a 141 Mtep, con un aumento di circa il 24%. In figura 1.10, si riporta l'andamento degli usi finali dei settori civile, industriale e trasporti, che da soli sono responsabili di quasi il 90% degli usi finali complessivi.

Il grafico evidenzia come il settore civile (residenziale più terziario) sia diventato il più energivoro nel corso degli anni, superando l'industria, che ha vissuto un periodo di indiscutibile efficientamento energetico, e il settore trasporti, tradizionalmente la voce di consumo più consistente.

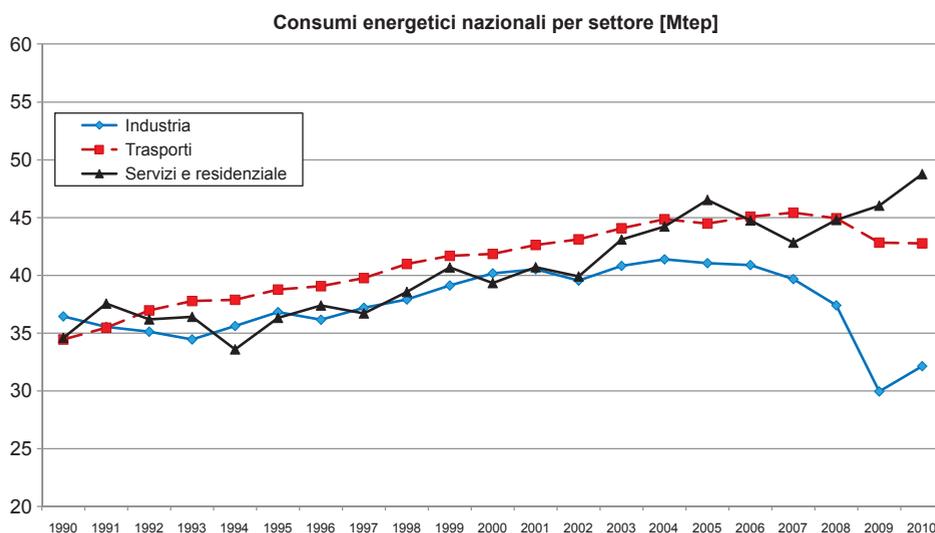


Figura 1.10. Andamento degli usi finali di energia per settore

I dati evidenziano come i target degli indicatori energetici ed ambientali fissati dal protocollo di Kyoto siano stati disattesi, con i conseguenti rischi che gravano sulle attuali generazioni, ma soprattutto su quelle future. L'Unione Europea è tuttavia impegnata ad affrontare e risolvere il problema, con piano di azione a scadenza 2020 e sintetizzato nell'acronimo 20-20-20, cioè:

- consumi di fonti primarie ridotti del 20% rispetto alle previsioni tendenziali, mediante aumento dell'efficienza energetica;
- riduzione del 20% di emissioni di gas climalteranti, ridotte del 20%, secondo impegni già presi, vedasi protocollo di Kyoto ed altri;

- incremento al 20% della quota di fonti rinnovabili nella copertura dei consumi finali.

Il raggiungimento di questi obiettivi non può che avvenire con il contributo dei singoli Stati membri. Non è un caso che la produzione legislativa dell'ultimo decennio sia stata molto intensa, in termini di direttive comunitarie e recepimenti nazionali, come si vedrà nel caso italiano, presentato al paragrafo successivo.

1.3. Il quadro legislativo nazionale

I grafici del precedente paragrafo evidenziano il trend preoccupante dei consumi energetici nel settore civile. I dati fanno riferimento agli ultimi venti anni, ma il problema è noto da tempi ben più lunghi.

Il tema dell'efficienza energetica negli edifici nella legislazione italiana è stato introdotto dalla legge 373 del 1976 sulla scia della prima grande crisi energetica del 1973. L'improvvisa consapevolezza della limitatezza delle risorse energetiche fossili, e il petrolio prima tra tutte, ha indotto molti paesi a legiferare su tale materia. La legge n. 373 era stata strutturata in tre parti, aventi per oggetto: gli impianti di produzione del calore e i sistemi di termoregolazione, l'isolamento dell'involucro e le sanzioni previste in caso di non rispetto della legge. Per la prima volta erano posti dei requisiti in termini di isolamento termico dell'involucro sebbene fossero a livello globale (e non di singoli componenti) e con l'obiettivo di limitare le potenza termica installata dell'impianto di riscaldamento. La legge 10 del 1991, con una serie di decreti attuativi successivi, introduce il requisito della prestazione energetica, al fine di unire ai limiti sulla potenza anche quelli relativi al consumo energetico durante l'esercizio della climatizzazione invernale. La legge e i successivi decreti introducono il bilancio termico dell'edificio in funzione delle perdite termiche per trasmissione e ventilazione, nonché gli apporti solari attraverso i componenti trasparenti. Lo schema prevede un metodo prestazionale (il fabbisogno termico per riscaldamento deve essere ad un valore di riferimento), senza introdurre specifici limiti sui singoli componenti. Il quadro normativo e legislativo subisce una profonda accelerazione in seguito all'emanazione della Direttiva Europea 91 del 2002, avente come oggetto il contenimento dei consumi energetici degli edifici. La direttiva abbraccia diversi campi e introduce aspetti fondamentali come la certificazione energetica degli edifici, l'obbligo di tenere conto dei diversi usi energetici e non solo del riscaldamento, ovvero: climatizzazione estiva, ventilazione, illuminazione, produzione di acqua calda sanitaria. Nel 2010 è stata emanata la direttiva 31, che aggiorna la direttiva 91/2002, introducendo altri aspetti, ad esempio l'obbligo di consumo energetico quasi zero per gli edifici di nuova costruzione di qui a pochi anni. Non è obiettivo del volume entrare nel dettaglio dei contenuti normativi, la

bibliografia è molto estesa. Interessa in questa sede fare pochi cenni, essenzialmente inerenti alle tecnologie di cui si occupa questo volume. In seguito all'emanazione della direttiva europea di cui sopra, si sono succeduti diversi contributi legislativi, a partire dal decreto legislativo 192 del 2005 (primo atto di recepimento della direttiva) fino alle linee guida per la certificazione energetica, emanate dal Ministero dello Sviluppo Economico nel 2009. È comunque importante ricordare che in Italia non si è ancora giunti al completo recepimento della direttiva, poiché alcuni aspetti, anche rilevanti, non sono ancora normati. Nelle linee guida sono indicati metodi e procedure per la certificazione energetica degli edifici in funzione dell'indice di prestazione energetica EP. Tale indice si ottiene come sommatoria in termini di energia primaria degli indici di prestazione per ogni servizio energetico, da determinare applicando i metodi definiti dalla normativa di riferimento. A regime, l'indice di prestazione globale dell'edificio sarà la somma dei seguenti usi energetici:

- climatizzazione invernale
- climatizzazione estiva
- produzione di acqua calda sanitaria
- illuminazione artificiale.

Nel caso di edifici residenziali tutti gli indici sono espressi in kWh/m² anno, per le altre tipologie di edifici (residenze collettive, terziario) gli indici devono essere espressi in kWh/m³ anno. Si ricorda inoltre che tutti gli indici devono essere espressi in energia primaria, utilizzando i fattori di conversione indicati dalle norme stesse. L'attuale livello di recepimento è limitato al calcolo dell'indice di prestazione globale come somma di energia utilizzata per i soli riscaldamento e acqua calda sanitaria.

L'indice di prestazione globale si determina utilizzando le procedure definite nelle norme tecniche UNI TS 11300 parte 1 (*Prestazione energetica dell'involucro e fabbisogni di acqua calda sanitaria*) e parte 2 (*Fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*). Le linee guida forniscono inoltre i metodi accettabili per la determinazione degli indici prestazionali in funzione di: destinazione d'uso dell'edificio, dimensioni dello stesso, edificio esistente o di nuova costruzione. Sono inoltre definiti i metodi per la valutazione dei requisiti minimi del solo involucro edilizio durante la stagione estiva. I requisiti sono: prestazionali (bilancio termico stagionale dell'edificio senza introdurre l'efficienza degli impianti) e/o prescrittivi (semplice controllo dei parametri inerziali degli elementi opachi di involucro).

La certificazione energetica dell'edificio, ossia l'assegnazione della classe di appartenenza, è fatta in funzione dell'indice di prestazione energetica, della zona climatica e del fattore di forma dell'edificio (rapporto tra la superficie disper-

dente dell'edificio e il volume da essa racchiusa). Le tabelle 1.1 e 1.2 forniscono i limiti per l'indice di prestazione energetica invernale EPI_L rispettivamente per le abitazioni e gli edifici non residenziali. Questi limiti sono poi utilizzati per la determinazione della classe energetica di appartenenza secondo gli schemi in tabelle 1.3, 1.4, 1.5.

Tabella 1.1. Valore limite applicabile dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, espresso in kWh/m² anno – Edifici residenziali

S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
	fino a 600 GG	da 601 GG	a 900 GG	da 901 GG	a 1400 GG	da 1401 GG	a 2100 GG	da 2101 GG	a 3000 GG	oltre 3000 GG
< 0.2	8.5	8.5	12.8	12.8	21.3	21.3	34	34	46.8	46.8
> 0.9	36	36	48	48	68	68	88	88	116	116

Tabella 1.2. Valore limite applicabile dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, espresso in kWh/m³ anno – Edifici non residenziali

S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
	fino a 600 GG	da 601 GG	a 900 GG	da 901 GG	a 1400 GG	da 1401 GG	a 2100 GG	da 2101 GG	a 3000 GG	oltre 3000 GG
< 0.2	2.0	2.0	3.6	3.6	6.0	6.0	9.6	9.6	12.7	12.7
> 0.9	8.2	8.2	12.8	12.8	17.3	17.3	22.5	22.5	31	31

Tabella 1.3. Limiti per l'assegnazione della classe energetica di appartenenza per la climatizzazione invernale

Classe $A_i + < 0.25 EPI_{L(2010)}$
$0.25 EPI_{L(2010)} \leq$ Classe $A_i < 0.50 EPI_{L(2010)}$
$0.50 EPI_{L(2010)} \leq$ Classe $B_i < 0.75 EPI_{L(2010)}$
$0.75 EPI_{L(2010)} \leq$ Classe $C_i < 1.00 EPI_{L(2010)}$
$1.00 EPI_{L(2010)} \leq$ Classe $D_i < 1.25 EPI_{L(2010)}$
$1.25 EPI_{L(2010)} \leq$ Classe $E_i < 1.75 EPI_{L(2010)}$
$1.75 EPI_{L(2010)} \leq$ Classe $F_i < 2.50 EPI_{L(2010)}$
Classe $G_i \geq 2.50 EPI_{L(2010)}$

Tabella 1.4. Limiti per l'assegnazione della classe energetica di appartenenza per la produzione di acqua calda sanitaria

Classe $A_{acs} < 9$ kWh/m ² anno
9 kWh/m ² anno \leq Classe $B_{acs} < 12$ kWh/m ² anno
12 kWh/m ² anno \leq Classe $C_{acs} < 18$ kWh/m ² anno
18 kWh/m ² anno \leq Classe $D_{acs} < 21$ kWh/m ² anno
21 kWh/m ² anno \leq Classe $E_{acs} < 24$ kWh/m ² anno
24 kWh/m ² anno \leq Classe $F_{acs} < 30$ kWh/m ² anno
Classe $G_{acs} \geq 30 EPI_{L(2010)}$

Tabella 1.5. Limiti per l'assegnazione della classe energetica di appartenenza per la prestazione energetica globale

Classe $A_{gl} < 0.25 EPI_{L(2010)} + 9 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$	
$0.25 EPI_{L(2010)} + 9 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} \leq$	Classe $A_{gl} < 0.50 EPI_{L(2010)} + 9 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$
$0.50 EPI_{L(2010)} + 9 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} \leq$	Classe $B_{gl} < 0.75 EPI_{L(2010)} + 12 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$
$0.75 EPI_{L(2010)} + 12 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} \leq$	Classe $C_{gl} < 1.00 EPI_{L(2010)} + 18 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$
$1.00 EPI_{L(2010)} + 18 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} \leq$	Classe $D_{gl} < 1.25 EPI_{L(2010)} + 21 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$
$1.25 EPI_{L(2010)} + 21 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} \leq$	Classe $E_{gl} < 1.75 EPI_{L(2010)} + 24 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$
$1.75 EPI_{L(2010)} + 24 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} \leq$	Classe $F_{gl} < 2.50 EPI_{L(2010)} + 30 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$
Classe $G_{gl} \geq 2.50 EPI_{L(2010)} + 30 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$	

Un aspetto fondamentale del quadro normativo è l'introduzione, oltre alla prestazione energetica, dell'obbligo al rispetto della trasmittanza termica dei singoli componenti dell'involucro edilizio, in funzione della zona climatica di appartenenza. Questi valori devono essere rispettati nel caso di sostituzione o riqualificazione energetica dei singoli componenti di involucro; non sono obbligatori nel caso di edifici di nuova costruzione, per i quali è comunque necessario il calcolo dell'indice di prestazione energetica. La tabella 1.6 presenta i valori di trasmittanza termica del serramento e della sola parte trasparente per le varie zone climatiche. Cosa sia la trasmittanza termica, così come altre proprietà termofisiche dell'involucro trasparente, sarà ampiamente descritto nei prossimi capitoli.

Per quanto riguarda il controllo degli apporti solari, la normativa non offre ancora un quadro chiaro e definitivo. Sono rese obbligatorie le schermature solari esterne, per ridurre il carico di climatizzazione estiva, d'altro canto è possibile evitare quest'obbligo nel caso i sistemi trasparenti abbiano un fattore solare inferiore a 0.5, se è dimostrata la non convenienza economica.

Tabella 1.6. Trasmittanza termica del serramento e della sola parte trasparente

Zona climatica	U_{finestra} ($W/m^2 K$)	U_{vetro} ($W/m^2 K$)
A	4.6	3.7
B	3.0	2.7
C	2.6	2.1
D	2.4	1.9
E	2.2	1.7
F	2.0	1.3

1.4. Il mercato dei serramenti e dell'involucro trasparente

Il tema dell'impatto delle superfici trasparenti e dei serramenti sulle prestazioni energetiche degli edifici e sul comfort termico e visivo degli utenti è uno degli argomenti che viene trattato in modo più approfondito in questo volume. Per comprendere meglio le dimensioni di tale impatto è sufficiente ricordare che esistono ad oggi in Italia circa 27 milioni di unità immobiliari, ognuna delle

quali ha mediamente una superficie commerciale di poco inferiore a 100 metri quadrati. Se si ipotizza che per tutte le abitazioni valga il limite del rapporto aeroilluminante (superficie trasparente pari a 1/8 della superficie dell'ambiente), si potrebbe affermare che ogni abitazione ha almeno 10 metri quadrati di finestra e, di conseguenza, risulterebbero installati nel paese oltre 300 milioni di metri quadrati di serramenti (soprattutto se si aggiunge il contributo degli edifici non residenziali). Da questo punto di vista appare evidente la potenzialità di risparmio energetico conseguibile utilizzando prodotti di elevata qualità e, di conseguenza, i benefici per l'utente finale (risparmio in bolletta termica e/o elettrica), l'ambiente (riduzione delle emissioni di CO₂), l'industria (vendita e installazione di nuovi prodotti).

Un dato di analisi fondamentale riguarda la ripartizione dell'attività edilizia: è bene ricordare che da ormai diversi anni la percentuale di nuove costruzioni non supera l'1% del parco edilizio. Questo dato testimonia come lo stock edilizio nazionale sia in buona parte obsoleto, spesso a rischio statico e, mediamente, con scadenti prestazioni energetiche (oltre il 50% degli edifici costruito prima dell'introduzione delle leggi sul risparmio energetico). Per questo motivo, una parte sempre maggiore del fatturato del segmento edilizio proviene dalla riqualificazione del parco edilizio esistente, dove notevoli sono anche le possibilità di risparmio energetico, a partire proprio dai serramenti e dall'involucro trasparente. L'industria di settore ha inevitabilmente risentito della crisi a scala locale e globale negli ultimi anni. In controtendenza è il mercato di vetro piano, quello utilizzato negli edifici. Il vetro piano include il vetro tirato in lastre, ormai non più prodotto in Italia, le lastre di vetro greggio e di vetro float. I dati pubblicati da Assovetro, l'associazione nazionale degli industriali del vetro, indicano una produzione complessiva di oltre 960.000 tonnellate nel 2011, con un incremento di oltre il 4% rispetto al 2010. Anche il 2010 era stato a sua volta un anno positivo, con un aumento della produzione di oltre l'8% rispetto a quello precedente. Segni positivi si sono registrati inoltre sia in import che in export.

Decisamente diversi sono i dati relativi al mondo del serramento, che ha natura differente da quella del vetro piano. Il mercato del secondo è quasi totalmente in mano a pochissime industrie multinazionali o, comunque, fortemente strutturato. Al contrario, un'indagine di LegnoFinestraItalia del 2010 evidenziava l'esistenza di oltre 37.000 produttori di infissi con un volume totale di vendita stimato in circa 9 milioni di finestre e un fatturato superiore ai 5 miliardi di euro. Sostanzialmente il pareggio è la ripartizione tra produttori di serramenti di legno e metallo, mentre decisamente minore il numero di operatori del PVC (inferiore a mille). Soltanto il 20% di tali aziende ha un numero di addetti superiore a 10, mentre l'uno per cento delle industrie più grandi detiene oltre il 30% del fatturato. Le quote di mercato per tipologia di prodotto sono risultate nel 2009: alluminio 35%, misto legno/alluminio 9%, PVC 15%, legno 41%. La

crisi economica ha un peso notevole nella contrazione del mercato; ad esempio l'analisi di mercato sui serramenti in alluminio condotta da UNCSAAL (Unione Nazionale Costruttori Serramenti Alluminio Acciaio e Leghe) ha evidenziato una perdita di valore di circa il 25% rispetto a quello del 2008. Anche le facciate continue hanno registrato perdite significative, anche se contenute al 15%. Una contrazione di questo tipo ha inevitabilmente investito tutto il settore e le perdite sono state parzialmente mitigate da un nuovo scenario emerso a partire dal 2008. Una spinta notevole all'industria dell'involucro trasparente è venuta da azioni a supporto dell'efficienza energetica. La necessità e l'opportunità di riqualificare il parco edilizio esistente sono state un formidabile strumento per la penetrazione sul mercato di serramenti e componenti trasparenti di elevata qualità, che tuttavia necessitava di un volano economico. Per tale ragione è utile accennare ai meccanismi di incentivazione, finalizzati alla riqualificazione energetica degli edifici esistenti. È in vigore, a partire dal 2008, lo schema delle detrazioni fiscali del 55% per le persone fisiche (detrazioni IRPEF) che adottino una o più misure energetiche per la propria abitazione. Nel 2013 la detrazione fiscale è stata innalzata al 65%. Una di queste misure è proprio la sostituzione dei serramenti, che devono però soddisfare il requisito tecnico di trasmittanza termica inferiore ad un dato valore, che dipende dalla zona climatica. Il dato è riportato in tabella 1.7. Il meccanismo ha dato eccellenti risultati in termini di risposta da parte dell'utente finale e notevoli benefici per l'industria di settore. È stimato che oltre il 90% di tutte le domande presentate avesse come misura la sostituzione dei serramenti, con tutte le altre misure ammesse allo schema di incentivazione (installazione di caldaie a condensazione, pannelli solari per la produzione di acqua calda sanitaria, riqualificazione dei componenti opachi dell'involucro edilizio) a dividersi la parte restante.

Tabella 1.7. Trasmittanza termica del serramento e della sola parte trasparente

Zona climatica	U finestra ($W/m^2 K$)
A	3.7
B	2.4
C	2.1
D	2.0
E	1.8
F	1.6

Lo strumento appena descritto è però limitato alle persone fisiche. Sono stati messi a punto altri strumenti finanziari che potranno essere adottati anche da altri soggetti. È il caso del decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 28 dicembre 2012 – *Incentivazione della produzione di energia termica da fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni*, noto anche come conto energia termico. Il decreto consente l'accesso a forme di

finanziamento per azioni di efficienza energetica sia da parte di persone fisiche che da parte delle pubbliche amministrazioni, eventualmente tramite terzi. Tra le azioni ammesse rientra la sostituzione degli infissi, solo se sono contestualmente installati sistemi di termoregolazione o valvole termostatiche, oppure se tali sistemi sono già installati. Questa tipologia di intervento è ammissibile solo da parte delle pubbliche amministrazioni dal momento che per le persone fisiche esiste, come già illustrato, la detrazione IRPEF al 65%. I requisiti di intervento sono specificati in tabella 1.8, in funzione della zona climatica.

Tabella 1.8. Requisiti minimi per l'installazione di nuovi serramenti secondo il conto energia termico

Zona climatica	Trasmittanza termica U ($W/m^2 K$)
A	≤ 3.08
B	≤ 2.00
C	≤ 1.75
D	≤ 1.67
E	≤ 1.50
F	≤ 1.33

Altra possibilità di incentivo è quella legata all'installazione di schermature solari per la riduzione dei consumi energetici estivi, anch'essa ammessa solo per le pubbliche amministrazioni. Le schermature, fisse o mobili, sono ammesse per le esposizioni da est-sud-est fino a ovest. L'incentivo è ammissibile solo nel caso vengano eseguiti anche lavori di isolamento termico dell'involucro, salvo il caso in cui l'involucro abbia già trasmittanza termica pari ai valori minimi richiesti. Il requisito tecnologico richiesto è che il fattore solare del sistema trasparente con accoppiata la schermatura solare non sia superiore a 0.15.

Si rimanda al decreto per i limiti economici ammissibili per l'intervento e il calcolo dell'incentivo associato all'intervento stesso. Il decreto incentiva anche la diagnosi energetica degli edifici nel caso si abbia accesso all'incentivo per una delle azioni di riqualificazione energetica.

Gli esempi dei meccanismi di incentivazione sopra indicati sono fondamentali per il perseguimento dei target di efficienza energetica fissati a livello nazionale ed europeo. È bene però ricordare che l'efficacia di tali misure è legata alla verifica che un effettivo risparmio energetico possa essere conseguito e non si configurino, viceversa, come uno strumento finanziario a supporto di una mera ristrutturazione edilizia.

2. Cenni di fisica dell'edificio

2.1. Introduzione

L'involucro edilizio, e quindi i componenti trasparenti, altro non sono che una frontiera che delimita l'ambiente costruito da quello esterno e, per tale ragione, sono soggetti ad una serie di flussi termici, aventi un verso dipendente dalle condizioni esterne ed indoor.

Facendo riferimento alla figura 2.1, si possono evidenziare i seguenti flussi termici:

- trasmissione: funzione della differenza di temperatura tra interno ed esterno;
- apporto solare: funzione della radiazione solare, diretta e diffusa, che incide sulle superfici opache e, soprattutto, trasparenti;
- ventilazione: aria esterna intenzionalmente introdotta in ambiente per garantire la salubrità dell'aria interna;
- infiltrazione: quantità d'aria che in modo non controllato penetra attraverso l'involucro edilizio, che non è perfettamente a tenuta stagna.

Secondo la direttiva Europea EPBD e successiva recast del 2010, gli usi energetici da considerare nel bilancio dell'edificio sono: riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, acqua calda sanitaria; dall'elenco emerge che i sistemi trasparenti entrano nel bilancio di tutti gli usi energetici dell'edificio, esclusa la produzione di acqua calda sanitaria.

Se si tiene conto del fatto che i serramenti sono il componente di involucro meno isolante, la maggior parte degli apporti solari avviene attraverso le superfici trasparenti, le infiltrazioni d'aria avvengono essenzialmente attraverso il telaio delle finestre, appare evidente che queste ultime giocano un ruolo fondamentale nel bilancio energetico dell'organismo edilizio e che la loro progettazione e messa in opera diventa fondamentale per la realizzazione di edifici ad elevata efficienza.

Il presente capitolo descrive i principali meccanismi di trasmissione del calore, introduce le principali caratteristiche termofisiche dei componenti trasparenti e illustra il modo in cui queste entrano nel bilancio termico dell'edificio. Queste nozioni di base sono necessarie per la piena comprensione dei capitoli successivi, nei quali le caratteristiche dei diversi materiali saranno ampiamente trattate.

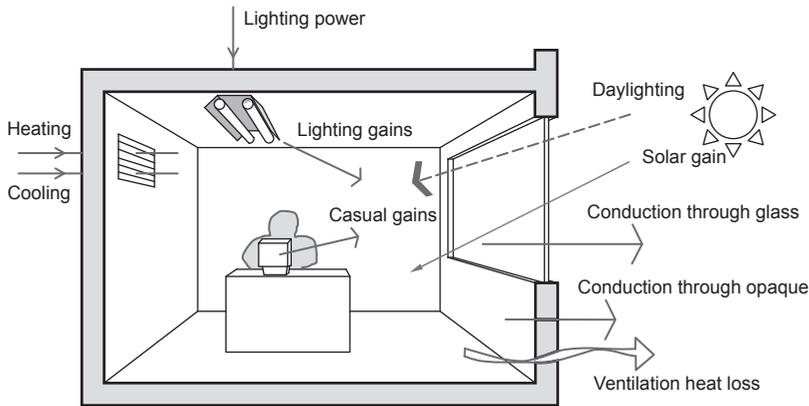


Figura 2.1. Flussi termici che interessano l'involucro edilizio

2.2. La trasmissione del calore e la trasmittanza termica

2.2.1. Il calore

Quando esiste un gradiente di temperatura in un sistema o quando due sistemi a temperatura diversa vengono messi a contatto si ha trasmissione di energia. Il processo attraverso il quale avviene lo scambio di energia è noto come *trasmissione del calore*. Di conseguenza il calore è una forma energetica di “transito” che, comparso solo nel momento in cui in un sistema sta avendo luogo una trasformazione, non può essere misurata direttamente ma possono essere misurati gli effetti da essa prodotti (ad esempio variazione della temperatura di un corpo). Il primo principio della termodinamica afferma che l’energia non può essere né creata né distrutta ma solo trasformata da una forma all’altra; esso governa quantitativamente tutte le trasformazioni di energia non ponendo però alcuna restrizione circa il verso con cui esse avvengono. Dall’esperienza tuttavia è noto che non è possibile realizzare alcuna trasformazione il cui unico risultato sia il passaggio di calore da una regione a temperatura minore verso una regione a temperatura maggiore: questo enunciato è noto come il secondo principio della termodinamica. In generale possiamo affermare che, se si opera in particolari condizioni, un solido o un liquido che ricevono calore senza subire un cambiamento di fase subiscono un innalzamento della loro temperatura.

Il rapporto tra il calore (Q) ricevuto e la variazione di temperatura (ΔT) misurata, in riferimento alla massa unitaria, prende il nome di *calore specifico*, C_p :

$$C_p = \frac{Q}{\Delta T}$$

ed indica la caratteristica propria di ciascun materiale di immagazzinare energia termica.

2.2.2. La trasmissione del calore per conduzione

La conduzione è un processo attraverso il quale il calore si trasferisce da aree a temperatura maggiore verso aree a temperatura minore attraverso un solo mezzo, solido, liquido, o gas, o attraverso più mezzi messi a diretto contatto tra di loro. Durante il trasferimento di calore per conduzione le molecole del materiale, appartenenti alle aree di scambio termico interessate, non si spostano sensibilmente ma mantengono la loro posizione inalterata nel tempo. Per questo motivo, tale modalità di trasmissione del calore è tipica dei corpi solidi, ma può avvenire anche nei liquidi o negli aeriformi purché si verifichi questa condizione.

È intuitivo comprendere che i gas, che presentano molecole molto distanti tra loro, abbiano poca attitudine a trasmettere calore per conduzione, ragione per la quale, come vedremo, vengono utilizzati per migliorare le prestazioni delle vetrate isolanti. Abbiamo già detto che la condizione necessaria affinché ci sia trasferimento di calore è uno squilibrio termico all'interno del corpo o tra corpi messi a diretto contatto tra loro; tuttavia, a parità di distribuzione spaziale della temperatura, il calore si trasmette in quantità diversa in funzione della natura fisica del corpo in oggetto.

La grandezza che caratterizza un corpo dal punto di vista della trasmissione di calore per conduzione prende il nome di *conducibilità termica*, si indica con la lettera greca λ e si misura in W/m K.

La conducibilità termica indica la quantità di calore che si trasmette nell'unità di tempo (in regime stazionario) attraverso una coppia di elementi di superfici isoterme, aventi area unitaria e distanza reciproca unitaria, quando la differenza di temperatura tra i due elementi è pari ad 1 K; in regime stazionario quindi è l'unico parametro che influenza la trasmissione di calore all'interno dei corpi e indica la tendenza dei materiali a favorire o ad opporsi al passaggio di calore.

Ipotizzando di dover calcolare, in condizioni di regime stazionario, per una lastra piana di materiale omogeneo infinitamente estesa (che non risente quindi delle condizioni del bordo), la potenza termica trasmessa in direzione ortogonale alle facce terminali che si trovano alla temperatura T' e T'' rispettivamente, con $T' > T''$, per essa vale la relazione:

$$\frac{Q}{\tau} = q_k = \frac{\lambda}{s} A (T' - T'')$$

dove

Q è la quantità di calore trasmessa nel tempo τ attraverso la parete

A è l'area della superficie della parete
 s è lo spessore della stessa (figura 2.2).

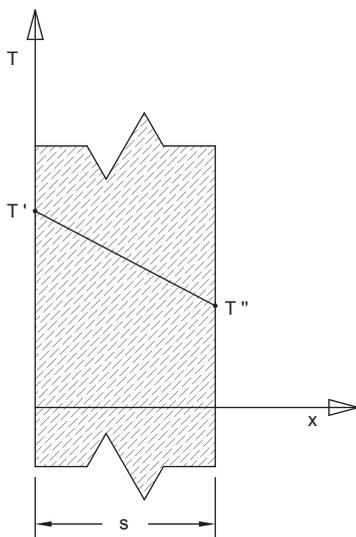


Figura 2.2. Andamento della temperatura di una parete piana che si trova in regime stazionario

L'equazione precedente rappresenta una delle soluzioni analitiche particolari dell'equazione generale di Fourier.

Pertanto la quantità di calore che si trasmette per unità di tempo, in regime stazionario attraverso una piastra piana di materiale omogeneo di spessore s , è direttamente proporzionale alla conducibilità termica del materiale λ e alla differenza di temperatura (ΔT) delle facce, ed è inversamente proporzionale allo spessore s della piastra stessa.

Ai fini del testo è utile introdurre il concetto di resistenza termica R , che indica la capacità del materiale ad opporsi al passaggio di calore, definita come il rapporto tra la differenza di temperatura delle facce e il corrispondente flusso termico che attraversa la parete in regime stazionario. Per essa vale la seguente relazione:

$$R = \frac{\Delta T}{\left(\frac{Q}{\tau}\right)}$$

che nel caso di trasmissione di calore per conduttività interna diventa per un elemento di area unitaria:

$$R_i = \frac{s_i}{\lambda_i}$$

Ovviamente maggiore sarà il valore di questa grandezza, più alta sarà la prestazione di isolamento termico dell'elemento.

Sostituendo la resistenza all'equazione della potenza termica trasmessa si ottiene:

$$\frac{Q}{\tau} = q_k = \frac{1}{R} A (T' - T'')$$

Nel caso si dovesse calcolare la potenza termica che attraversa una parete piana multistrato (figura 2.3), in condizioni di regime stazionario, è facile dimostrare che l'equazione precedente diventa:

$$q_k = \frac{1}{\left(\frac{s_A}{\lambda_A} + \frac{s_B}{\lambda_B} \right)} A (T' - T''')$$

quindi per la parete multistrato basterà considerare i contributi delle singole resistenze termiche delle lastre che la compongono.

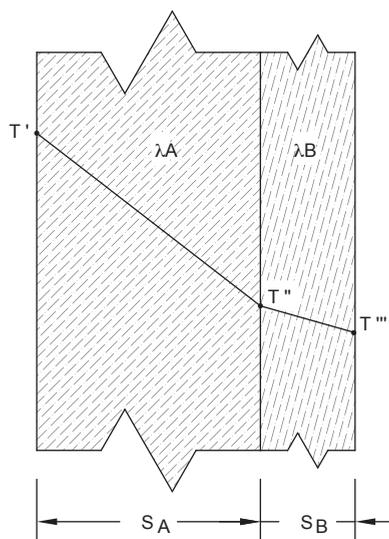


Figura 2.3. Andamento della temperatura in una parete piana a due strati in regime stazionario

2.2.3. La trasmissione del calore per convezione

La trasmissione di calore per convezione avviene quando almeno uno dei due corpi che prendono parte allo scambio termico è un fluido.

Nel caso di trasmissione di calore tra un solido (ad esempio, una parete) e un fluido (ad esempio aria), lo scambio termico è dovuto alla combinazione di due fenomeni: lo scambio termico per conduzione e il trasporto di materia (figura 2.4).

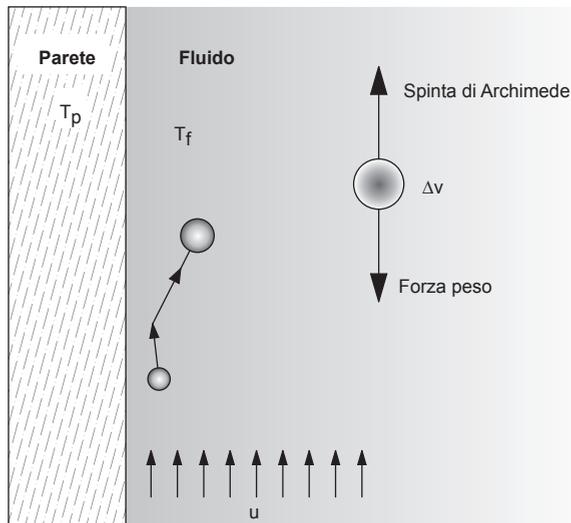


Figura 2.4. Parete piana lambita da fluido: forze agenti sull'elemento di volume

Se la superficie solida si trova ad una temperatura maggiore rispetto a quella del fluido, il calore fluisce dapprima per conduzione dal solido verso le particelle più prossime alla parete; l'energia trasferita al fluido comporta che lo stesso aumenti di volume con la conseguente riduzione della densità.

L'aumento di volume modifica la condizione di equilibrio preesistente poiché il generico elemento di volume interessato è soggetto a due forze inizialmente uguali e opposte: il peso proprio e la spinta di Archimede.

Dopo la dilatazione, il peso dell'elemento rimane costante mentre la spinta di Archimede incrementa, causando il moto della massa del fluido.

Quando la massa calda raggiunge altre regioni a temperatura più bassa, il calore viene ceduto nuovamente per conduzione dalle particelle a temperatura più alta a quelle a temperatura più bassa.

Da tale comportamento si può osservare come il moto del fluido porti a contatto diverse particelle a temperature differenti, favorendo così la trasmissione di calore.

Se le cause che scatenano il moto sono legate alle differenze di temperatura, come in questo caso, si parla di *convezione naturale*.

Oltre ai moti convettivi naturali, il moto di un fluido può essere generato anche da cause meccaniche, come ad esempio una pompa o un ventilatore: si parla in questo caso di *convezione forzata*.

Di regola i risultati della convezione termica vengono presentati secondo la seguente relazione:

$$\frac{Q}{\tau} = q_c = h_c A (T_p - T_f)$$

dove

T_p è la temperatura della faccia del solido

T_f è la temperatura del fluido a contatto con la faccia stessa

q_c esprime il flusso termico q trasmesso per convezione, in funzione dell'area A del corpo scaldante a contatto con il fluido, della differenza di temperatura tra il corpo (parete) e il fluido e del fattore h_c denominato *fattore di convezione*.

L'equazione sembrerebbe molto semplice ma comprende il fattore h_c che risulta essere funzione di numerose variabili, aspetto che rende la sua risoluzione estremamente complessa.

Ai fini del calcolo comunque si ricorre ai valori di h_c indicati nelle norme, che verranno presentati nei capitoli successivi.

2.2.4. La trasmissione del calore per irraggiamento

Tutti i corpi che si trovano nell'universo hanno una temperatura superiore a 0 K ed emettono energia raggiante.

Ogni corpo quindi emette energia raggiante e contestualmente ne riceve dagli altri.

Si ha trasmissione di calore per irraggiamento ogni qual volta due o più corpi aventi differenti temperature fra loro si trovano in presenza l'uno dell'altro, separati da un mezzo che sia sufficientemente trasparente alle radiazioni (come ad esempio il vuoto o l'aria).

Al contrario di quanto avveniva per la conduzione e la convezione, l'energia raggiante può essere trasmessa anche in assenza di materia, di conseguenza lo studio della trasmissione di calore per irraggiamento presuppone la conoscenza delle leggi che regolano l'emissione e l'assorbimento da parte dei corpi.

Per una miglior comprensione della trattazione successiva (capitolo 3), è bene precisare che i corpi che si trovano allo stato solido hanno in generale proprietà selettive nei confronti dell'energia, nel senso che essi la emettono, la riflettono, la assorbono o si lasciano da essa eventualmente attraversare, in misura diversa per le varie lunghezze d'onda.

Per caratterizzare il comportamento di un corpo quindi non è sufficiente conoscere la potenza raggiante globalmente emessa ma è necessario sapere come essa è distribuita tra le diverse lunghezze d'onda e nelle diverse direzioni.

Il testo comunque non si pone l'obiettivo di affrontare in modo così specifico e dettagliato l'argomento, e rimanda ad altri testi specializzati la trattazione più approfondita del tema.

Vengono di seguito riportate le tre leggi del corpo nero, cioè di un corpo teorico caratterizzato da un coefficiente di assorbimento costante, il cui valore è pari a 1, poiché è da esse che si ricava il comportamento dei corpi reali.

Le tre leggi sono:

- legge di Stefan-Boltzmann
- legge di Wien
- legge di Plank.

La prima fornisce il valore dell'emittanza globale J_0 del corpo nero, cioè l'energia irradiata globalmente:

$$J_0 = \sigma_0 T^4$$

dove

σ_0 è la costante di Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m² K⁴)

T è la temperatura assoluta (K).

La seconda, nota come *legge dello spostamento*, fornisce il valore della lunghezza d'onda λ_m per la quale è massima l'emittanza monocromatica:

$$\lambda_m = \frac{A}{T}$$

dove

$A = 2898$ (μK)

T è la temperatura assoluta (K).

La terza legge esprime l'emittanza monocromatica ε_0 in funzione di λ e T , cioè la potenza irradiata per lunghezza d'onda:

$$\varepsilon_0 = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

dove

$C_1 = 3.7418 \cdot 10^{-6}$ (W/m²)

$C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2}$ (m K).

Il grafico di emissione del corpo nero è riportato in figura 2.5.

Possiamo ora fare alcune considerazioni.

Dalle leggi di emissione del corpo nero si deduce che all'aumentare della temperatura (figura 2.5):

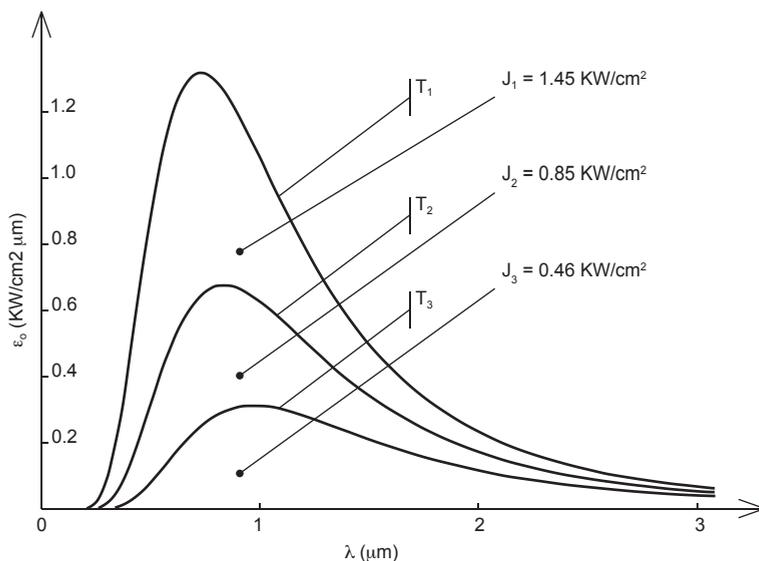


Figura 2.5. Emissione specifica del corpo nero a temperature diverse: $T_1 = 4000 \text{ K}$, $T_2 = 3500 \text{ K}$, $T_3 = 3000 \text{ K}$

- aumenta la potenza globalmente emessa, in modo proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta, secondo la legge di Stefan-Boltzmann;
- la potenza aumenta anche per ogni singola lunghezza d'onda, secondo la legge di Plank, il diagramma di emissione si sposta così interamente verso valori più elevati;
- il massimo di emissione si sposta verso lunghezze d'onda più piccole.

Abbiamo così caratterizzato il comportamento del corpo nero, ma le considerazioni appena fatte rimangono valide anche per i corpi condensati, anche se non neri, che emettono per temperatura.

Per essi è necessario introdurre una nuova grandezza, l'emissività globale ϵ , pari al rapporto tra l'emittanza globale del corpo che si considera e quella del corpo nero:

$$\epsilon = \frac{J}{J_0}$$

Pertanto, noto il valore dell'emissività di un corpo reale, per esso è possibile calcolare facilmente la potenza irradiata integralmente, applicando la formula precedente.

L'emissività di un corpo reale quindi rappresenta la percentuale della radiazione

che esso emette rispetto a quella che avrebbe emesso il corpo nero trovandosi alla sua stessa temperatura.

Se dovessimo calcolare la potenza termica scambiata per irraggiamento tra due corpi, che si trovano nelle condizioni tipiche che si riscontrano in edilizia, ipotizzando che tutta l'energia irradiata dal corpo 1 raggiunga completamente il corpo 2, la quantità di calore trasmessa dal corpo 1 al corpo 2 è pari a:

$$\frac{Q}{\tau} = q_i = A_1 \sigma_0 \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

In particolari circostanze, quando le differenze di temperatura tra i due corpi sono modeste e la superficie del corpo 2 è nettamente maggiore rispetto a quella del corpo 1, è possibile esprimere l'equazione precedente in forma lineare, analogamente a quanto avviene per la convezione:

$$\frac{Q}{\tau} = q_i = Ah_r (T_1 - T_2)$$

con h_r coefficiente di scambio termico radiativo.

2.2.5. La trasmissione del calore attraverso un componente in regime stazionario

Nei paragrafi precedenti abbiamo descritto le tre modalità di trasmissione di calore ipotizzando che esse si manifestino sempre singolarmente.

In molte situazioni reali, invece, la trasmissione di calore per irraggiamento e per convezione coesistono, e non possono essere separate.

In questi casi si parla di trasmissione di calore per *adduzione*, che accomuna proprio la trasmissione di calore per irraggiamento e per convezione.

La più importante delle ragioni che ci ha portato precedentemente a sostituire, alle espressioni analitiche esatte dell'irraggiamento e della convezione, espressioni empiriche approssimate di tipo lineare è che queste si prestano meglio a descrivere il fenomeno complessivo della trasmissione di calore per adduzione che si esprime tramite la seguente equazione:

$$q_a = hA(T_p - T_f)$$

dove $h = h_c + h_r$ con h denominato *fattore di adduzione*.

Infatti, se analizziamo il flusso di calore che passa attraverso un divisorio piano di spessore s , che supporremo infinitamente esteso, che separa due fluidi che si

trovano a temperature differenti tra loro con $T_i > T_e$ (figura 2.6), ci accorgiamo che il primo scambio termico che avviene è tra la prima faccia del divisorio e l'aria a diretto contatto con essa per convezione, e contestualmente tra la stessa faccia e l'ambiente per irraggiamento, scambio termico che avviene proprio secondo quanto descritto nell'equazione precedente.

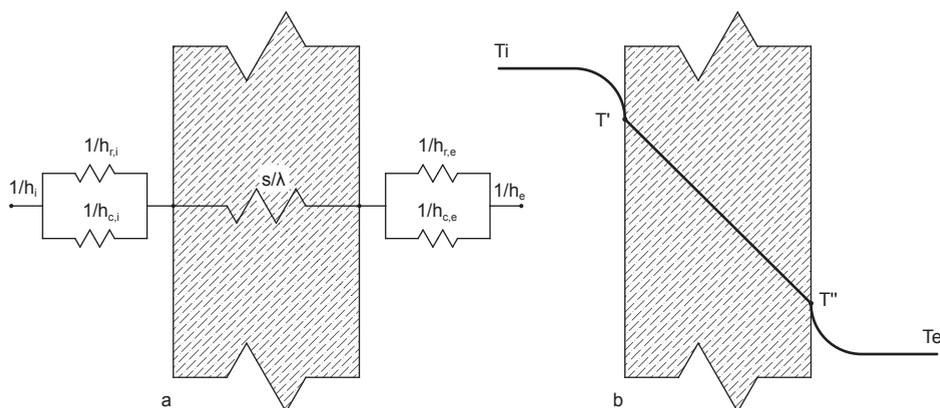


Figura 2.6. Divisorio piano omogeneo che separa due fluidi che si trovano a temperature differenti: a) schema delle resistenze termiche; b) campo termico

Successivamente il calore verrà trasmesso per conduzione attraverso il divisorio, le cui facce si troveranno alle temperature T' e T'' , e poi ancora per adduzione tra la seconda faccia e l'ambiente esterno.

Nella pratica solitamente sono note le temperature dell'aria interna T_i e di quella esterna T_e , e difficilmente vengono misurate invece quelle delle facce del divisorio (T' e T'').

Per questa ragione è utile disporre di una relazione che consenta di esprimere il flusso termico q che attraversa l'elemento, in funzione delle temperature (T_i e T_e) dei due fluidi.

Risparmiandoci ora la dimostrazione possiamo scrivere che l'equazione cercata è:

$$q = UA(T_i - T_e)$$

dove

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \text{ W/m}^2\text{K}$$

con

h_i = fattore di adduzione interno

h_e = fattore di adduzione esterno

U = trasmittanza termica del divisorio, che esprime la quantità di calore che lo attraversa nell'unità di tempo e per unità di superficie, quando la differenza di temperatura dei due fluidi è pari ad 1 K.

2.2.6. La trasmissione del calore attraverso una parete con intercapedine

La parete con intercapedine è composta da due divisori separati da un'intercapedine, e divide solitamente l'ambiente interno da quello esterno.

Alla luce di quanto esposto nei paragrafi precedenti, analizziamo ora la trasmissione di calore attraverso questo sistema (figura 2.7).

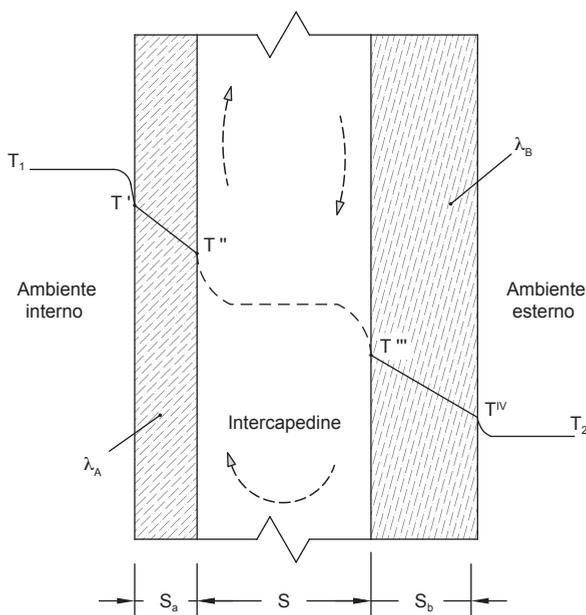


Figura 2.7. Andamento qualitativo della temperatura in una parete verticale con intercapedine

Tralasciando per il momento gli scambi termici che avvengono tra le facce esterna ed interna con gli ambienti con cui sono a contatto, e attraverso i due divisori giacché le equazioni sono state già individuate nel paragrafo precedente, possiamo concentrarci proprio a verificare i fenomeni che intervengono all'interno dell'intercapedine.

Ammettiamo che il fenomeno fisico avvenga nel seguente modo.

Le due facce interne all'intercapedine si trovano alle temperature T'' e T''' , con $T'' > T'''$.

Tra le due facce avviene uno scambio di calore per irraggiamento, secondo le modalità descritte precedentemente.

Dobbiamo ora considerare la presenza dell'aria, che influenza la trasmissione di calore.

In prossimità della faccia a temperatura T'' , quella più calda, si crea una corrente d'aria ascensionale, mentre in prossimità di quella più fredda, a temperatura T''' , si crea una corrente discendente.

Essendo l'intercapedine di dimensioni finite, si possono immaginare inoltre dei moti di rimescolamento che favoriscono la trasmissione di calore per convezione. Rimanendo negli obiettivi che si pone il testo, possiamo applicare all'intercapedine la stessa metodologia che abbiamo affrontato nel paragrafo precedente, nella definizione di trasmittanza.

Possiamo quindi considerare i coefficienti di adduzione h_2 e h_3 interni all'intercapedine, che tengono conto del calore scambiato per convezione tra pareti e aria, e per irraggiamento tra le facce interne.

Con queste condizioni, la trasmittanza termica dell'intera parete è uguale a:

$$U_p = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} + \frac{s_b}{\lambda_b} + \frac{1}{h_e}}$$

I termini $1/h_2$ e $1/h_3$ sono proprio quelli che tengono conto della resistenza intercapedine, è possibile quindi porre:

$$R_i = \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3}$$

dove R_i è la resistenza termica dell'intercapedine.

La resistenza dell'intercapedine viene influenzata, oltre che dalle caratteristiche delle superfici a diretto contatto con essa e del gas in essa contenuto (in questo caso aria), anche dall'inclinazione della parete.

Nell'ipotesi che i due divisori non siano costituiti da materiale isolante, se sostituissimo nell'equazione U_p i valori numerici, ci accorgeremmo che il livello di isolamento termico della parete viene garantito proprio dal contributo fornito dall'intercapedine, e quindi da R_i .

L'intercapedine costituisce quindi una barriera al passaggio di calore per cui è necessario che venga ottimizzata al fine di migliorare la prestazione del componente complessivo.

Per cui le grandezze in gioco sulle quali è conveniente intervenire per ridurre i valori di trasmittanza termica dell'intera parete sono ε_2 , ε_3 , λ_{aria} , aspetto che verrà trattato in dettaglio nel capitolo 3.

2.3. La radiazione solare e le grandezze ottiche

2.3.1. Natura e caratteristiche della radiazione solare

Il sole è una massa sferica gassosa avente diametro pari a 1.4×10^6 km ed una temperatura sull'ordine dei milioni di gradi nelle regioni centrali, che emette energia sotto forma di campo elettromagnetico oscillante. Tra le numerose reazioni chimiche che hanno luogo all'interno della stella, quella fondamentale è la trasformazione di idrogeno in elio, una reazione spontanea che da luogo ad emissione di energia. L'energia è poi trasferita alla superficie del sole e irraggiata nello spazio secondo un processo molto complesso. La radiazione solare è il risultato di molti strati che emettono e assorbono energia radiante a lunghezze d'onda variabili. Nelle analisi fisicotecniche è lecito approssimare il sole ad un corpo nero avente temperatura efficace compresa all'incirca tra 5800 e 6300 K, in altri si richiede un'analisi spettrale più dettagliata.

Il sole si trova ad una distanza media dalla Terra pari a 1.495×10^{11} m (circa 150 milioni di km), con una variazione del $\pm 1.7\%$, dovuta alla forma ellittica della traiettoria del moto della Terra intorno alla stella. Le caratteristiche del sole e le relazioni geometriche tra questo e la Terra inducono un'intensità della radiazione solare pressoché costante al di fuori dell'atmosfera. Si introduce così la costante solare I_s , grandezza definita come l'energia proveniente dal sole che incide nell'unità di tempo sull'unità di area di una superficie perpendicolare alla direzione di propagazione della radiazione e posta nello spazio ad una distanza pari alla distanza media Terra-sole. Le misurazioni più recenti indicano per la costante solare un valore compreso tra 1353-1367 W/m².

Oltre all'energia totale emessa dal sole è importante anche conoscerne la sua distribuzione spettrale. La radiazione emessa è in realtà la sovrapposizione di una serie di onde aventi lunghezze d'onda comprese in un intervallo teoricamente infinito, ma praticamente compreso tra 150 nm e 10 micrometri. Possono essere dunque individuate le seguente porzioni spettrali:

- spettro ultravioletto (150-380 nm), dannoso per la salute e per il deterioramento di numerosi materiali, in particolare quelli plastici, soggetti a fenomeni di polimerizzazione;
- spettro visibile (380-780 nm), parte dello spettro solare in cui è sensibile l'occhio umano e, dunque, la più importante per lo studio dell'illuminazione naturale;
- spettro infrarosso (780 nm-10 micron), area spettrale con notevole impatto sugli scambi termici. Al capitolo 9, le norme di riferimento definiscono come infrarosso vicino la regione compresa tra 780 e 2500 nanometri. Si parla di medio e lontano infrarosso per le porzioni di spettro a più elevata lunghezza d'onda.

La ripartizione spettrale della radiazione solare indica che circa il 7% della radiazione cade all'interno dello spettro ultravioletto, circa il 45% nello spettro

visibile, il resto nello spettro infrarosso vicino – essendo il contributo nell'infrarosso lontano di pochi punti percentuali. È importante notare che la ripartizione spettrale, al di là della natura propria, è spesso definita in modo differente nelle varie norme tecniche internazionali.

La figura 2.8 riporta l'andamento spettrale normalizzato rispetto al picco della radiazione solare e la distribuzione cumulativa della radiazione stessa, da cui si evince oltre il 90% dell'energia solare cade entro 1700 nanometri.

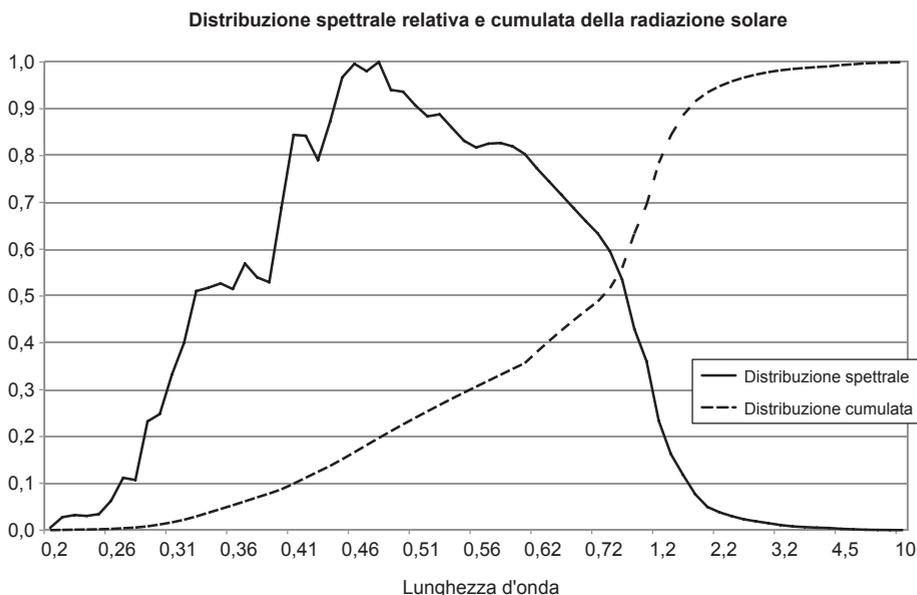


Figura 2.8. Andamento della radiazione solare

La radiazione proveniente dal disco solare si propaga come fascio di raggi paralleli ma, nell'attraversare l'atmosfera, subisce tre modifiche, dovute all'effetto dei gas, del vapor d'acqua, delle goccioline d'acqua e delle particelle solide sospese che costituiscono l'atmosfera stessa:

- consistente riduzione, dovuta al fatto che la radiazione viene in parte assorbita dall'atmosfera e in parte riflessa verso lo spazio esterno;
- variazione della distribuzione spettrale, dovuta al comportamento selettivo di alcuni dei componenti dell'atmosfera (O_2 , O_3 , CO_2 , H_2O);
- dispersione nell'atmosfera (*scattering*) per effetto di riflessioni multiple, fenomeno a causa del quale al suolo giunge radiazione proveniente da tutta la volta celeste (radiazione diffusa), oltre a quella collimata proveniente direttamente dalla direzione del sole (radiazione diretta).

La consistenza di tali fenomeni dipende dallo spessore dello strato di atmosfera attraversato dalla radiazione e dalla composizione della stessa.

Per quanto detto è utile ricordare che la costante solare è un valore molto superiore ai normali valori riscontrabili sulla superficie terrestre sia per l'effetto filtro operato dall'atmosfera, sia per le condizioni geometriche tra il sole e una superficie comunque orientata. Per quest'ultimo motivo la quantità di energia solare accumulata da una superficie dipende dall'inclinazione e dall'orientamento della superficie stessa. La figura 2.9 presenta i valori medi mensili di insolazione (W/m^2) su superfici orientate in modo diverso, da cui si evince quanto enunciato precedentemente. Questi aspetti andranno debitamente tenuti in conto nella progettazione di superfici trasparenti, come si illustrerà nella parte quarta del libro.

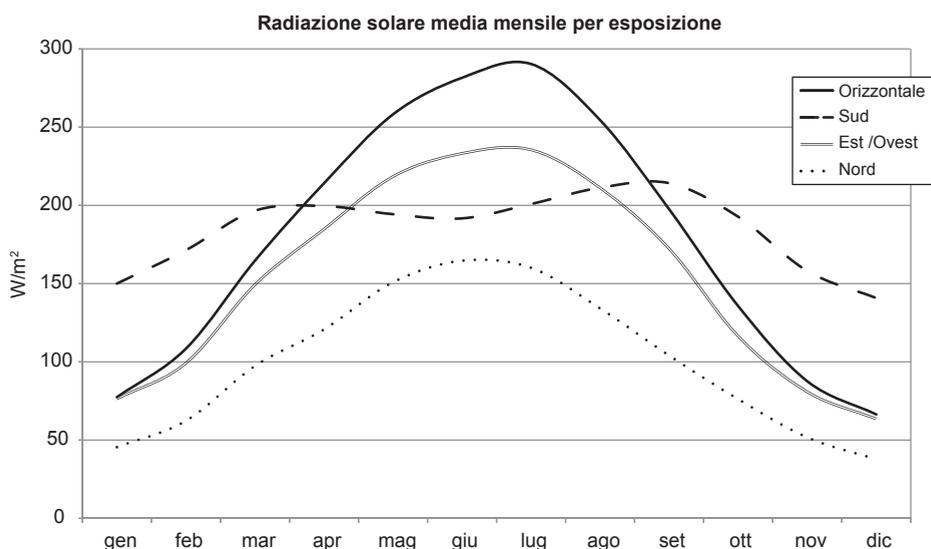


Figura 2.9. Radiazione solare media mensile per diversi orientamenti – Roma

2.3.2. I materiali e la radiazione solare

Quando la radiazione solare incide su un materiale trasparente è scomposta in tre componenti, funzione di parametri che riguardano le caratteristiche della radiazione, come la distribuzione spettrale e l'angolo di incidenza, e la natura del materiale stesso.

Una schematizzazione semplificata del fenomeno è presentata in figura 2.10, da cui si evince che la radiazione incidente I è scomposta in tre componenti:

- trasmittanza (coefficiente di trasmissione): rapporto tra radiazione che attraversa il materiale e radiazione incidente. Il simbolo corrispondente è la lettera greca τ o la lettera t (maiuscola o minuscola);

- riflettanza (coefficiente di riflessione): rapporto tra radiazione riflessa dal materiale e radiazione incidente. Il simbolo corrispondente è la lettera greca ρ o la lettera r (maiuscola o minuscola);
- assorbanza (coefficiente di assorbimento): rapporto tra radiazione assorbita dal materiale e radiazione incidente. Il simbolo corrispondente è la lettera greca α o la lettera a (maiuscola o minuscola).

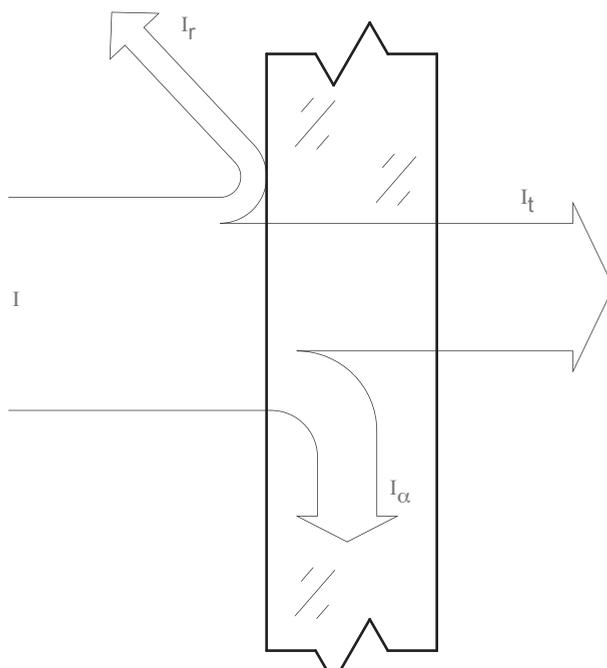


Figura 2.10. Scomposizione della radiazione solare incidente nelle tre componenti: trasmissione, riflessione, assorbimento

Per uniformità con le norme tecniche di riferimento si adotta la simbologia che fa riferimento alle lettere greche. Si ricorda che tali grandezze possono essere espresse, in modo del tutto analogo, con scala da 0 a 1 oppure da 0 a 100. In questo testo è stata adottata la prima possibilità.

Per i tre coefficienti sussiste sempre la relazione:

$$\tau + \alpha + \rho = 1$$

Se il materiale è opaco alla radiazione solare, il coefficiente di trasmissione diventa nullo, tutta la radiazione incidente sarà quindi assorbita o riflessa.

È importante a questo punto entrare maggiormente in dettaglio nella trattazione di questi parametri. Per quanto detto prima, la trasmittanza non è costante su tutto lo spettro solare ma è funzione della lunghezza d'onda; può dunque essere utilizzata l'espressione:

$$\tau(\lambda) = \frac{I_t(\lambda)}{I(\lambda)}$$

La figura 2.11 riporta a titolo di esempio l'andamento spettrale di questa grandezza per un vetro ordinario, nell'intervallo compreso tra 300 e 2500 nanometri.

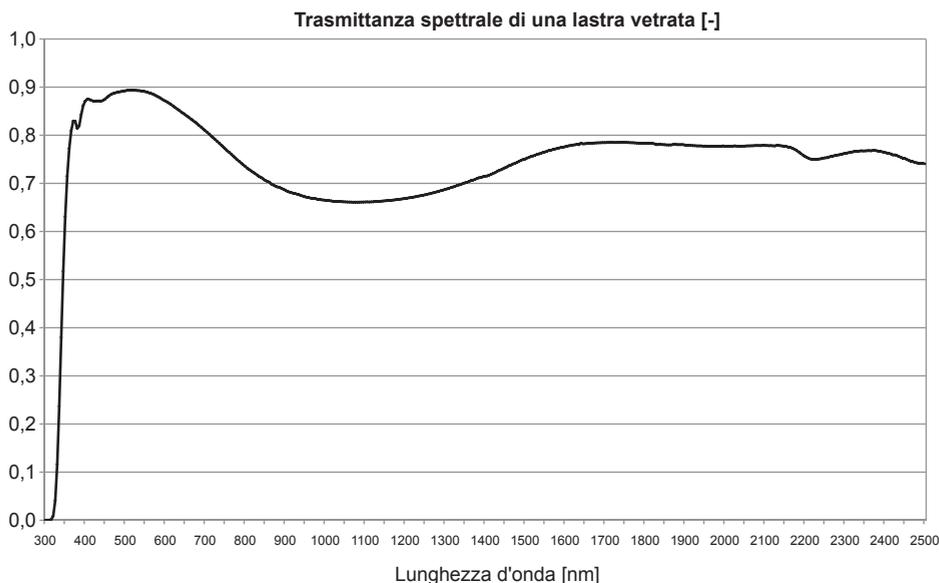


Figura 2.11. Grafico spettrale di un vetro convenzionale

Si deve ancora notare che la trasmittanza indica soltanto la quantità di radiazione trasmessa ma nulla dice circa le modalità con cui il fenomeno avviene. Questa precisazione è fondamentale quando vengono trattati materiali trasparenti per applicazioni negli edifici, poiché sapere come la radiazione solare è trasmessa dal materiale consente di valutare opportunamente la scelta di soluzioni progettuali riguardanti sia i materiali utilizzati che le soluzioni architettoniche più adeguate. La radiazione incidente può essere trasmessa in modo:

- regolare, il raggio è trasmesso (riflesso) con angolo pari all'angolo della radiazione incidente;
- diffondente (lambertiano), secondo la legge del coseno, il raggio incidente viene trasmesso come somma di infiniti raggi emessi in tutte le direzioni ricavabili dalla relazione: $\tau I_{\beta} = \tau I_0 \cos \beta$, cioè la radiazione trasmessa (riflessa) in direzione β è pari alla radiazione normale alla superficie I_0 per il coseno dell'angolo compreso. I materiali di questo tipo sono puramente

teorici e non esistenti in natura. Sono generalmente considerati diffondenti quei materiali che hanno un angolo di *apertura* rispetto alla normale compreso tra 60 e 90 gradi (essendo quest'ultimo l'angolo di un materiale lambertiano);

- parzialmente diffondente (*scattering*), il raggio incidente è trasmesso in modo più o meno diffuso mantenendo come direzione principale quella dell'angolo di incidenza. I materiali possono essere ad ampio scattering (angolo di uscita tra 30 e 45 gradi) o a stretto scattering (angolo tra 0 e 15 gradi).

Quanto detto precedentemente riguardo alla trasmittanza si applica in modo assolutamente analogo anche alla riflettenza e all'assorbanza.

2.3.3. Le proprietà ottiche e solari dei materiali trasparenti

Trattare i parametri ottici per mezzo di specifiche funzioni diventa piuttosto complesso per applicazioni pratiche, come l'edilizia. È necessario e comodo ridurre queste ultime a numeri più semplici da comprendere e gestire. Per ricondurre il problema in un ambito più pragmatico le curve spettrali sono ridotte a semplici numeri attraverso operazioni di integrazione di tali curve su spettri di riferimento.

Facendo riferimento nuovamente e per semplicità alla sola trasmittanza, si definisce *trasmittanza solare* τ_e il risultato dell'integrale al numeratore e denominatore della formula seguente, essendo $E(\lambda)$ lo spettro solare di riferimento:

$$\tau_e = \frac{\int \tau(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda}{\int E(\lambda) \cdot d\lambda}$$

I limiti di integrazione sono i limiti inferiore e superiore dello spettro solare di riferimento. Il pedice *e* è utilizzato per tutte le grandezze integrate sullo spettro solare di riferimento.

Allo stesso modo viene definita la *trasmittanza luminosa* τ_v , in cui la curva peso è una doppia curva, ovvero quella di un illuminante bianco standard D e la curva di visibilità dell'occhio umano V . I limiti inferiore e superiore di integrazione sono le lunghezze minime e massime che danno sensazione visiva all'occhio umano medio:

$$\tau_v = \frac{\int \tau(\lambda) \cdot D(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int D(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$