

Marco Berti

ELEMENTI DI EDILIZIA SOSTENIBILE

**MATERIALI, INVOLUCRO E SISTEMI
PER UN EDIFICIO PASSIVO (E SOSTENIBILE)**

- SISTEMI E PROCESSI SOSTENIBILI ▪ OBIETTIVI SUL BENESSERE SOSTENIBILE
- MATERIALI PER UN'EDILIZIA SOSTENIBILE ▪ VAPORE, CALORE E SOSTENIBILITÀ DELL'INVOLUCRO ▪ ENERGIA (QUASI) ZERO E SOSTENIBILITÀ



**PRONTO
GRAFILL**

Clicca e richiedi di essere contattato
per informazioni e promozioni

**GRAFILL**

Marco Berti

ELEMENTI DI EDILIZIA SOSTENIBILE

ISBN 13 978-88-8207-869-0

EAN 9 788882 078690

Manuali, 200

Prima edizione, settembre 2016

Berti, Marco <1952->

Elementi di edilizia sostenibile / Marco Berti. – Palermo : Grafill, 2016.

(Manuali ; 200)

ISBN 978-88-8207-869-0

1. Bioarchitettura.

720.47 CDD-23

SBN Pal0290958

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è disponibile anche in eBook (formato *.pdf) compatibile con PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader.

Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con c/c postale, bonifico bancario, carta di credito e PayPal.

Per i pagamenti con carta di credito e PayPal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno Smartphone o un Tablet il Codice QR sottostante.



I lettori di Codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di settembre 2016

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.



**PRONTO
GRAFILL**

**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

A tutti coloro che ho incontrato lungo questo cammino.

m. b.



**PRONTO
GRAFILL**

**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**



**PRONTO
GRAFILL**

**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

SOMMARIO

➤	INTRODUZIONE	p.	1
1.	SISTEMI E PROCESSI SOSTENIBILI	"	3
1.1.	Sistemi e complessità.....	"	3
1.1.1.	Premessa.....	"	3
1.1.2.	Concetto (e definizione) di sistema.....	"	3
1.1.3.	Confine di un sistema.....	"	5
1.1.4.	Sistema chiuso.....	"	5
1.1.5.	Sistema aperto.....	"	5
1.1.6.	Involucro chiuso e involucro aperto.....	"	5
1.1.7.	Comportamento dinamico.....	"	6
1.1.8.	Comportamento teleologico (o teleonomico).....	"	6
1.1.9.	Comportamento equifinalizzato.....	"	7
1.1.10.	Comportamento omeostatico.....	"	7
1.1.11.	La complessità.....	"	8
1.1.12.	Interazione lineare e circolare.....	"	8
1.2.	Entropia come rappresentazione della sostenibilità.....	"	9
1.2.1.	Entropia e disordine (nelle scienze sociali).....	"	9
1.2.2.	Entropia positiva.....	"	9
1.2.3.	Entropia negativa (o neg-entropia).....	"	9
1.2.4.	Entropia, ordine e disordine.....	"	10
1.3.	Sistemi, catastrofi e collasso della sostenibilità.....	"	11
1.3.1.	Catastrofi.....	"	11
1.3.2.	Catastrofi evolutive e involutive.....	"	11
1.3.3.	Strutture dissipative.....	"	11
1.4.	Energia.....	"	12
1.4.1.	Calore e macchina perpetua.....	"	12
1.4.2.	Energia (e calore): unità di misura.....	"	13
1.4.3.	Energia (e calore): equivalenza direzionale.....	"	14
1.4.4.	Entropia e degradazione del calore.....	"	14
1.4.5.	Calcolo (pratico) dell'entropia.....	"	15
1.4.6.	Entropia e processi sostenibili.....	"	15
1.5.	Sviluppo economico e sostenibilità.....	"	16
1.5.1.	Sviluppo economico.....	"	16
1.5.2.	Sviluppo definito e indefinito.....	"	17

1.5.3.	Sviluppo economico, catastrofi e strutture dissipative.....	p.	17
1.5.4.	Sistemi ecologici sostenibili.....	"	18
1.5.5.	Sostenibilità totale (o complessa)	"	19
1.5.6.	Sostenibilità debole e forte.....	"	20
1.5.7.	Sviluppo sostenibile come sistema	"	21
1.5.8.	Conferenze e protocolli sullo sviluppo sostenibile	"	23
1.5.9.	Indicatori di sostenibilità.....	"	27
1.5.10.	Indicatori di sostenibilità ambientale	"	29
1.5.11.	Indicatori di sostenibilità socio-economica.....	"	31
1.5.12.	Ciclo di vita.....	"	33
1.5.13.	Energia incorporata	"	40
1.5.14.	Esempio di calcolo dell'energia incorporata: cappotto esterno	"	43
1.5.15.	Energia incorporata in un edificio	"	46
1.6.	Edilizia e sostenibilità.....	"	49
1.6.1.	Premessa.....	"	49
1.6.2.	Obiettivi	"	49
1.6.3.	Strategie energetiche	"	49
1.6.4.	Riqualificazione energetica	"	50
1.6.5.	Edifici a consumo zero.....	"	50
2.	OBIETTIVI SUL BENESSERE SOSTENIBILE	"	52
2.1.	Il benessere termo igrometrico (sostenibile).....	"	52
2.1.1.	Premessa.....	"	52
2.1.2.	Il benessere ambientale e termoigrometrico	"	52
2.1.3.	Le variabili ambientali del benessere termoigrometrico	"	53
2.2.	L'uomo standard (o di riferimento).....	"	58
2.3.	Gli scambi termici dell'uomo standard.....	"	59
2.3.1.	Metabolismo e produzione di calore.....	"	59
2.3.2.	Emissione di calore	"	62
2.3.3.	La termoregolazione	"	64
2.4.	Il bilancio termico del corpo umano	"	65
2.4.1.	Equazione di bilancio.....	"	65
2.4.2.	Comportamento dell'uomo standard.....	"	68
2.5.	Equazione di Fanger	"	74
2.6.	Indici di valutazione del benessere sostenibile	"	83
2.6.1.	Benessere (globale) e disagio locale	"	83
2.6.2.	Il carico termico	"	83
2.6.3.	Indice PMV (Predicted Mean Vote).....	"	85
2.6.4.	Indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied).....	"	86
2.7.	Il discomfort (o disagio) termico puntuale (o localizzato)	"	87
2.7.1.	Le correnti d'aria.....	"	87
2.7.2.	Irraggiamento asimmetrico	"	88
2.7.3.	Differenze verticali della temperatura dell'aria	"	89
2.7.4.	La temperatura del pavimento.....	"	90

2.8.	Modello semplificato per il benessere termico sostenibile	p.	90
2.8.1.	La temperatura operativa	"	90
2.8.2.	Intervalli pratici di neutralità termica.....	"	91
2.9.	Il benessere visivo.....	"	93
2.9.1.	Premessa.....	"	93
2.9.2.	Grandezze fotometriche fondamentali	"	93
2.9.3.	Benessere visivo.....	"	98
2.9.4.	Requisiti dell'ambiente luminoso	"	99
2.10.	Il benessere acustico	"	108
2.10.1.	Grandezze acustiche fondamentali.....	"	108
2.10.2.	Il fonometro.....	"	112
2.10.3.	Controllo e valutazione del comfort acustico	"	114
2.11.	Il benessere e l'aria interna (sostenibile)	"	117
2.11.1.	Premessa.....	"	117
2.11.2.	Sorgenti e sostanze di inquinamento dell'aria interna	"	117
2.11.3.	Ventilazione naturale e meccanica degli ambienti confinati	"	119
2.11.4.	Tabella dei ricambi d'aria raccomandati	"	119
3.	MATERIALI PER UN'EDILIZIA SOSTENIBILE	"	123
3.1.	Premessa	"	123
3.2.	Materiali, bioedilizia e sostenibilità.....	"	124
3.3.	Funzione strutturale (e sostenibilità).....	"	125
3.3.1.	Calcestruzzo armato.....	"	125
3.3.2.	Calcestruzzo armato e ponti termici.....	"	126
3.3.3.	Correzione di un ponte termico in calcestruzzo armato.....	"	128
3.3.4.	Cemento e riciclaggio di scarti di lavorazione e rifiuti	"	129
3.3.5.	Calcestruzzo, gabbia di Faraday e variazione del campo elettromagnetico naturale.	"	130
3.3.6.	Calcestruzzo armato e sostenibilità.....	"	131
3.3.7.	La terra cruda	"	132
3.3.8.	Il legno da costruzione	"	135
3.3.9.	Sistemi d'involucro compositi (e sostenibili)	"	138
3.3.10.	Il laterizio (o terra cotta)	"	138
3.3.11.	Comparazione tra mattoni in terra cruda e mattoni in terra cotta	"	142
3.3.12.	Materiali lapidei	"	146
3.4.	Funzione legante (e sostenibilità)	"	151
3.4.1.	Calce aerea	"	152
3.4.2.	Gesso.....	"	156
3.4.3.	Calce idraulica.....	"	157
3.4.4.	Cemento con funzione di legante.....	"	158
3.4.5.	Cemento magnesiaco	"	160
3.5.	Proprietà generali degli isolanti termici (ed acustici).....	"	161
3.5.1.	Isolamento termico e acustico.....	"	161

3.5.2.	Struttura e sostenibilità dei materiali isolanti.....	p.	162
3.5.3.	Isolamento dell'involucro	"	164
3.5.4.	Proprietà generali dei materiali isolanti	"	166
3.5.5.	Classificazione dei materiali isolanti.....	"	168
3.5.6.	Il bilancio energetico e ambientale	"	169
3.6.	Isolanti inorganici minerali (quasi sostenibili e sostenibili)	"	170
3.6.1.	Fibre minerali: lana di vetro e lana di roccia	"	170
3.6.2.	Silicato di calcio.....	"	172
3.6.3.	Vetro cellulare	"	173
3.6.4.	Minerale espanso.....	"	174
3.6.5.	Argilla espansa.....	"	175
3.6.6.	Perlite espansa.....	"	175
3.6.7.	Pomice naturale.....	"	176
3.6.8.	Vermiculite espansa.....	"	177
3.7.	Isolanti organici chimici (da polimerizzazione)	"	177
3.7.1.	Polistirene espanso (EPS)	"	177
3.7.2.	Polistirene estruso (XPS)	"	178
3.7.3.	Poliuretano (PUR).....	"	179
3.8.	Isolanti organici vegetali (e sostenibili).....	"	180
3.8.1.	Canapa.....	"	180
3.8.2.	Lino	"	181
3.8.3.	Canna palustre.....	"	182
3.8.4.	Paglia.....	"	182
3.8.5.	Fibre di cellulosa	"	182
3.8.6.	Fibre di cocco	"	183
3.8.7.	Pannelli in fibra di legno	"	184
3.8.8.	Legno mineralizzato.....	"	185
3.8.9.	Sughero	"	186
3.9.	Isolanti organici animali (e sostenibili)	"	186
3.9.1.	Lana di pecora.....	"	186
3.10.	Isolanti (sottovuoto) a zero aria	"	187
3.10.1.	Pannelli isolanti sottovuoto.....	"	187
4.	VAPORE, CALORE E SOSTENIBILITÀ DELL'INVOLUCRO	"	189
4.1.	Aria umida e diffusione del vapore.....	"	189
4.1.1.	Premessa.....	"	189
4.1.2.	Il paradosso del vapore	"	189
4.1.3.	La misura della pressione.....	"	190
4.1.4.	Aria ambiente, vapore e saturazione	"	192
4.1.5.	Sostenibilità e vapore	"	196
4.1.6.	Bolle di vapore, gocce d'acqua e altre storie	"	196
4.1.7.	La curva delle pressioni di saturazione	"	197
4.1.8.	Involucro e diffusione del vapore	"	199
4.1.9.	Classificazione del processo di condensazione.....	"	208

4.1.10.	Riqualificazione energetica (e correzione igrometrica) di un involucro	p.	211
4.1.11.	Parametri di confronto e controllo della diffusione	"	214
4.1.12.	Condensazione e correzione igrometrica	"	217
4.1.13.	Condensazione e strutture di copertura	"	220
4.2.	Trasmissione (trasporto) di calore	"	222
4.2.1.	Premessa.....	"	222
4.2.2.	Modelli di scambio termico	"	223
4.3.	Accumulo, inerzia e surriscaldamento estivo	"	234
4.3.1.	Premessa.....	"	234
4.3.2.	La diffusività termica	"	235
4.3.3.	Inerzia termica dell'involucro	"	237
4.3.4.	Incremento dell'inerzia termica di una parete leggera.....	"	238
4.3.5.	Trasmittanza termica periodica	"	242
5.	ENERGIA (QUASI) ZERO E SOSTENIBILITÀ.....	"	246
5.1.	Una casa (quasi) sostenibile	"	246
5.1.1.	Premessa.....	"	246
5.1.2.	Classificazione (incompleta) dei sistemi passivi.....	"	246
5.1.3.	Edilizia bioclimatica	"	249
5.1.4.	Edilizia passiva (Passivhaus e Passiv-On).....	"	253
5.1.5.	La ventilazione meccanica controllata (con recupero di calore)	"	256
5.1.6.	Pompa di calore (o termica).....	"	258
5.1.7.	Involucro e misure per la sostenibilità (energetica).....	"	261
5.1.8.	Edilizia a energia quasi zero	"	265
5.1.8.1.	Carichi energetici in un sistema edilizio	"	265
5.1.8.2.	La casa passiva.....	"	266
5.1.9.	Autoproduzione di energia elettrica da fonte rinnovabile (sistemi fotovoltaici)	"	281
5.1.10.	Sostenibilità dei sistemi fotovoltaici.....	"	289
∨	BIBLIOGRAFIA E RISORSE WEB	"	292
-	BIBLIOGRAFIA.....	"	292
-	RISORSE WEB.....	"	293



**PRONTO
GRAFILL**

**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

INTRODUZIONE

Il tema del presente volumetto è la sostenibilità in campo edilizio.

Un processo si definisce sostenibile – almeno sul piano teorico – quando è ripetibile (e riproducibile) per un tempo indefinito. In parole diverse, la sostenibilità di un sistema consiste nel ciclico ritorno (dal punto di vista della disponibilità delle risorse primarie) alle condizioni iniziali. Pertanto, la sostenibilità è la scienza (ed anche il paradigma culturale) dell'uso appropriato delle risorse rinnovabili.

Il testo comunque ha un risvolto più pratico ed è caratterizzato dalla semplice presentazione e descrizione degli elementi del processo edilizio che possono partecipare a rendere l'ambiente più o meno sostenibile. In altre parole – a parte il primo capitolo – dove si dà spazio a qualche considerazione teorica di livello più avanzato, per il resto il volumetto rimane un documento molto pratico, descrittivo, che ha il solo scopo di dar consigli in un ambito dal confine incerto: la sostenibilità in campo edilizio.

Il volume si compone di cinque capitoli.

Nel **primo** capitolo vengono definiti e analizzati gli aspetti teorici fondamentali: il concetto di sistema come modello di descrizione e rappresentazione dei processi in generale e dei processi edilizi in particolare; l'entropia (e la misura del disordine) come variabile sintetica di analisi del livello organizzativo; lo sviluppo economico (crescente) incontrollato e lo sviluppo controllato; il concetto di sostenibilità e l'analisi del ciclo di vita dei prodotti/sistemi.

Nel **secondo** capitolo viene trattato un tema fondamentale e collegato al concetto della sostenibilità: il benessere percepito nello spazio interno degli edifici. Un *modus vivendi* che deve rimanere costante anche a fronte della progressiva sostituzione dell'uso delle risorse e dei materiali non sostenibili (non rinnovabili) con l'uso delle risorse e dei materiali sostenibili (e rinnovabili). Nel capitolo viene introdotto il concetto di uomo *standard* e vengono analizzate le sue interazioni con l'ambiente confinato (di tipo termico, visivo, acustico e olfattivo).

Nel **terzo** capitolo vengono presentati i materiali per l'edilizia, con particolare riguardo ai materiali dell'edilizia sostenibile: la terra cruda, il legno, gli isolanti naturali e via discorrendo.

Nel **quarto** capitolo viene analizzato il comportamento di un involucro edilizio sostenibile dal punto di vista degli scambi con l'ambiente esterno: la diffusione del vapore, la traspirazione, la trasmissione del calore e l'analisi del surriscaldamento estivo con i relativi parametri di controllo (trasmittanza stazionaria e periodica, inerzia, capacità e diffusività termica).

Nel **quinto** capitolo vengono presentati due aspetti differenti (e opposti) della sostenibilità: quello della **casa bioclimatica** (di derivazione nord americana) e quello della **casa passiva** (*Passivhaus*, di derivazione europea). Inoltre viene analizzato il concetto di **casa ad energia quasi zero** e viene discussa la presenza (praticamente obbligatoria) di impianti che, se da un

lato si presentano come sostenibili (ossia finalizzati all'uso delle fonti rinnovabili), d'altro lato introducono delle antinomie che vanno valutate con molta attenzione. Infine, sempre con un taglio pratico, vengono analizzati alcuni impianti come i sistemi VMC (ventilazione meccanica controllata), le pompe termiche, i moduli solari termici e i moduli solari fotovoltaici (compresi quelli di seconda generazione a film sottile).

Il volumetto infine, si propone con un taglio descrittivo (e sperimentale) – dove ogni lettore dovrà apportare il proprio pensiero (e la propria esperienza) – ricordando che la sostenibilità non è la scienza del quantitativo (delle formule) ma è la scienza/conoscenza delle concrete azioni che portano ad un uso controllato delle risorse rinnovabili.

SISTEMI E PROCESSI SOSTENIBILI

1.1. Sistemi e complessità

1.1.1. Premessa

Iniziare con il concetto di sistema, o di complessità (o di olistico), può apparire incongruente in un testo come questo, dove l'obiettivo principale è un'esposizione snella sulla sostenibilità in campo edilizio. In realtà, il concetto di sistema è profondamente legato al tema della sostenibilità, in quanto quest'ultima, essendo un fenomeno complesso e rappresentato da numerose variabili, si dovrà leggere in modo integrato (o sistemico).

1.1.2. Concetto (e definizione) di sistema

Il concetto di sistema rappresenta il punto di partenza della nostra ricerca ed è lo strumento di lettura finalizzato all'analisi della sostenibilità edilizia (in generale) e della sostenibilità dell'involucro (in particolare).

Per **sistema** si intende un insieme di elementi (o componenti) – mutuamente interagenti – finalizzato a perseguire un determinato obiettivo. Ad ogni sistema corrisponde un definito obiettivo. In altre parole, la struttura di un sistema è sempre organizzata per addivenire ad un fine. La presenza del fine – appunto – determina il carattere (o funzionamento) cosiddetto sistemico, che è sempre orientato al raggiungimento dello scopo prefisso.

Esempi di sistemi sono:

- a) gruppi sociali;
- b) processi tecnologici;
- c) banche di dati;
- d) reti di comunicazione;
- e) impianti tecnici;
- f) edifici, ecc..

Tabella 1.1. *Sistemi della realtà quotidiana*

Aggregati complessi (o sistemi della realtà)
Gruppi sociali (società di persone, organizzazioni operaie, squadra di ciclismo, ecc.)
Organizzazioni socio-tecniche (aziende, enti pubblici, ospedali, ecc.)
Processi tecnologici (produzione della lana di roccia, del polistirene, ecc.)
Processi di manutenzione e trasformazione degli impianti tecnologici
Banche di dati
Reti di comunicazione, reti di trasporto, ecc.

Volendo dare un'ulteriore definizione possiamo dire che un sistema è un insieme **strutturato** di enti. In altre parole, il carattere sistemico è dato dalle seguenti proprietà: la mutua relazione tra i componenti e la loro organizzazione interna.

Facciamo un esempio linguistico. Un insieme è una collezione di entità. Un gruppo di lettere dell'alfabeto – disposte casualmente – non ha valore semantico, o significato. Al contrario, le lettere interconnesse, in mutua relazione – ordinate – acquisiscono un senso o significato linguistico, diventano una parola del nostro linguaggio, rappresentano un oggetto, un'idea, ecc..

Tutto questo è descritto nella seguente figura 1.1.

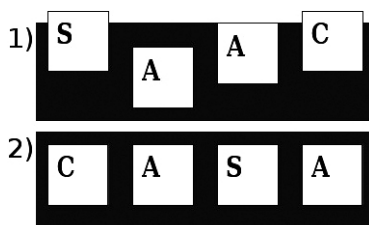


Figura 1.1. Differenza tra un insieme 1) e un sistema 2)

Dove in 1) abbiamo rappresentato un **insieme** di lettere, le quali – disposte in modo casuale – non assumono uno specifico significato.

Al contrario, in 2) le lettere disposte in modo organizzato diventano un **sistema** ed assumono il consueto significato dell'oggetto denominato casa.

In conclusione, un sistema è un aggregato di elementi – materiali e immateriali – che hanno le seguenti proprietà:

- 1) gli elementi (o componenti) sono in relazione reciproca (la mutua interazione) e si configurano secondo una determinata struttura (o organizzazione);
- 2) l'aggregato, nel suo complesso, ha un comportamento finalizzato, ha un obiettivo o scopo (è teleologico).

Un sistema è un insieme integrato (e teleologico) pertanto le proprietà (o i comportamenti) dell'intero sistema non sono la somma delle proprietà (o dei comportamenti) dei singoli componenti. Con parole diverse, un sistema si comporta come un oggetto integrato, unitario, ecc., dove ogni elemento componente mette a comune le sole proprietà olistiche. Pertanto, analizzando il comportamento di un sistema, si dovrà prescindere da un'analisi di tipo causa-effetto o componente per componente, ma si dovrà fare una lettura essenzialmente integrata (olistica).

Tabella 1.2. Definizione e proprietà di un sistema

Sistema Aggregato di n parti in mutua relazione (interazione)
Struttura di un sistema Organizzazione su più livelli: sovra-sistema, sotto-sistema, componenti (o elementi)
Proprietà fondamentali Complessità e ridondanza; perseguimento di uno scopo; comportamento integrato

1.1.3. *Confine di un sistema*

Dato un sistema è sempre definibile il suo **confine**, nel senso che, preso in considerazione un qualunque elemento (o componente) l'elemento stesso si potrà classificare come contenuto all'interno oppure all'esterno del sistema medesimo. Il «contenitore» di tutti gli elementi interni è il confine del sistema.

Il confine può essere permeabile o impermeabile. Un confine **permeabile** permette un «dialogo» tra il sistema e l'ambiente (o mondo) esterno. Un confine **impermeabile** impedisce la relazione interno-esterno.

1.1.4. *Sistema chiuso*

Un sistema **chiuso** è un sistema dotato di un confine **impermeabile**: non scambia materia, energia e dati con l'ambiente (o mondo) esterno. Persegue il proprio obiettivo consumando esclusivamente le risorse interne. È quindi destinato all'esaurimento (decrescita incontrollata) ed alla progressiva riduzione del livello di organizzazione fino al massimo disordine interno.

L'universo è un sistema chiuso, ed è destinato (nel tempo) a raggiungere il massimo livello di disordine denominato «morte termica». La «morte termica» corrisponde allo stato dell'universo con una temperatura ambientale di 0 K (ossia -273 °C), dove la vita si ferma e scompare.

1.1.5. *Sistema aperto*

Un sistema **aperto** è un sistema dotato di un confine **permeabile**: scambia materia, energia e dati con l'ambiente esterno. Persegue il proprio obiettivo consumando le risorse interne ed **esterne**. È destinato alla crescita o alla decrescita controllata (decrescita felice) e mantiene un livello di organizzazione congruo all'obiettivo da perseguire. I sistemi viventi (e sociali) sono sistemi aperti.

1.1.6. *Involucro chiuso e involucro aperto*

Immaginiamo un edificio con un involucro teorico: un confine chiuso che non ha scambi con l'esterno. In questo caso, anche se da un punto di vista strettamente energetico – almeno nella fase iniziale – la cosa potrebbe apparire come positiva, con il passare del tempo, per l'edificio e i suoi improbabili abitanti, il percorso sarebbe verso la fine di ogni forma di vita.

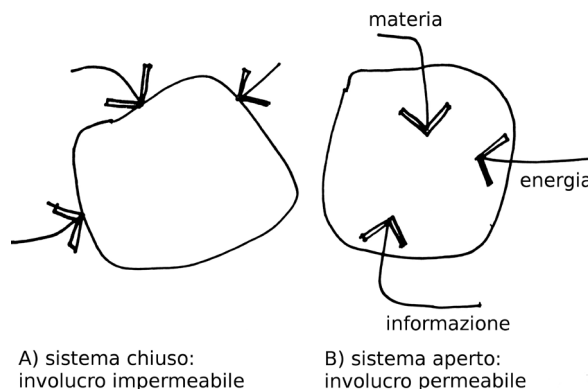


Figura 1.2. *Involucro (o confine) di un sistema*

Pertanto, ogni involucro reale è sempre un involucro aperto. Anche gli edifici passivi, quelli che in teoria non abbisognano di impianti termo-meccanici e che controllano lo scambio energetico interno-esterno con l'obiettivo di rendere minime (o quasi nulle) le perdite di calore, sono sempre sistemi aperti, nel senso che, se da un lato minimizzano le perdite, d'altro lato cercano di massimizzare il guadagno solare.

Per quanto detto si potrebbe concludere che in termini di confine – o di involucro o di chiusura – le proprietà fondamentali del sistema aperto sono:

- 1) la permeabilità;
- 2) la selettività (o permeabilità direzionale), che è una forma di permeabilità orientata, dove una grandezza passa in un senso (ad esempio dall'interno all'esterno) e non nel senso opposto.

1.1.7. *Comportamento dinamico*

Per **comportamento dinamico** di un qualunque sistema si intende il suo funzionamento nel tempo in condizioni di regime variabile. In parole diverse, mentre il **comportamento permanente** (o stazionario) rappresenta il sistema che ha raggiunto il proprio obiettivo di funzionamento (e vi rimane, teoricamente, in un tempo indefinito), quello dinamico rappresenta il sistema in divenire che si sposta da uno stato di funzionamento all'altro. In modo diverso, mentre l'analisi dinamica di un sistema lo rappresenta per un intervallo di tempo limitato, diversamente, l'analisi permanente lo rappresenta (oltre il comportamento dinamico) per il resto del suo ciclo di vita.

Tuttavia esiste questo paradosso sistemico: il comportamento transitorio (o dinamico) è in concreto lo stato di funzionamento più ricorrente ed è la risposta alle continue sollecitazioni del mondo esterno che fanno passare un sistema, senza soluzione di continuità, da un transitorio all'altro.

Per quanto detto, dal punto di vista del comportamento dinamico (o transitorio), esistono le seguenti diversità:

- in un sistema **chiuso**, non esistendo la possibilità di assorbire le risorse dall'esterno il funzionamento dinamico, una volta consumati i materiali e le risorse interne, conduce con certezza al progressivo disordine e degrado;
- in un sistema **aperto**, esistendo il continuo prelievo delle risorse ambientali l'evoluzione dinamica determina (con elevata probabilità) la conservazione o il miglioramento dello stato organizzativo del sistema stesso.

In conclusione, all'interno di una teoria generale dei sistemi, il modello di riferimento è quello del sistema aperto in competizione con l'ambiente, dove quest'ultimo assume il ruolo di contenitore delle risorse e di deposito dei rifiuti derivanti dai processi di scambio.

1.1.8. *Comportamento teleologico (o teleonomico)*

Dal punto di vista linguistico l'aggettivo *Teleologico/teleonomico* ed in particolare il sostantivo *Teleologia/teleonomia*, hanno concretamente il seguente significato:

- la tendenza ad un divenire finalizzato, ad un comportamento dinamico con uno scopo, un fine, un obiettivo.

Un sistema in generale ed un sistema aperto in particolare, hanno sempre un comportamento **teleologico (o teleonomico)**, ossia hanno sempre uno scopo od obiettivo da perseguire.

1.1.9. *Comportamento equifinalizzato*

Un obiettivo generale di un sistema aperto è il raggiungimento dello stato di **quasi-stazionarietà** (o stato di equilibrio), ovvero di quelle condizioni di funzionamento dove, pur permanendo lo scambio e l'alimentazione dall'esterno, lo stato sistemico rimane quasi-costante (o pressoché invariante).

Lo stato-obiettivo di quasi-stazionarietà si può raggiungere con trasformazioni diverse, ossia partendo da stati iniziali differenti. Questa proprietà dei sistemi aperti, che consiste nel giungere allo stesso stato finale partendo da condizioni iniziali diverse, si chiama **equifinalità**.

In conclusione, un sistema aperto ha un comportamento teleologico (tendente ad uno scopo) ed equifinalizzato, che gli consente di raggiungere un obiettivo percorrendo traiettorie di trasformazione completamente differenti.

Nel caso di un sistema aperto – ovvero di un aggregato che scambia continuamente materia, energia e dati con il mondo esterno – il comportamento teleologico (finalizzato), ossia il perseguimento di un obiettivo, è più forte e vitale che in un sistema chiuso (o tendenzialmente chiuso), in quanto il sistema aperto può continuamente attingere dalle risorse dell'ambiente esterno.

1.1.10. *Comportamento omeostatico*

In generale, un sistema ha un comportamento omeostatico quando tende a rendere invariante nel tempo una qualche proprietà, o tutte le proprietà che lo caratterizzano. In sintesi: *«è l'attitudine propria dei sistemi viventi (sistemi aperti) a conservare le proprie caratteristiche, al variare delle condizioni del mondo esterno, tramite meccanismi di autoregolazione»*.

Ad esempio, l'omeostasi glucidica è il mantenimento della giusta concentrazione di zucchero nel sangue mediante l'azione combinata di insulina e glicogeno e di altri meccanismi di autoregolazione dell'organismo.

La proprietà più generale di un sistema è l'organizzazione. Ne consegue la seguente definizione: *«il comportamento omeostatico di un sistema (chiuso o aperto) è la tendenza a conservare il proprio livello d'ordine, ossia il proprio livello d'organizzazione»*.

In sintesi, il comportamento omeostatico tende a dare la stabilità al sistema. In parole diverse, l'omeostasi annulla con continuità la differenza tra l'organizzazione in atto (l'ordine esistente in un certo istante) e l'organizzazione-obiettivo.

Il comportamento omeostatico è un funzionamento complesso tipico dei sistemi aperti fortemente organizzati: i sistemi viventi.

L'omeostasi è la tendenza dei sistemi aperti, organizzati in modo complesso (come gli esseri viventi), ad evolvere mantenendo costante la propria organizzazione interna (in specie quella di controllo e decisionale) mediante la capacità di compensare, con i propri cambiamenti, le deformazioni imposte dall'esterno. In altre parole, è la capacità degli organismi viventi di trasmettere e riprodurre le proprie invarianze strutturali e di modificare le relative prestazioni in rapporto all'ambiente.

Tra un sistema vivente, o meglio, tra un sistema molto complesso e l'ambiente, esiste sempre un'interazione di tipo **competitivo**, dove:

- 1) da un lato l'ambiente cerca di evolvere a spese della struttura organizzativa del sistema vivente medesimo, riducendola, quando possibile, ai livelli inferiori;
- 2) d'altro lato il sistema vivente risponde con i comportamenti di compensazione che tendono (essendo finalizzati) al mantenimento dell'integrità strutturale (dell'aggregazione unitaria).

OBIETTIVI SUL BENESSERE SOSTENIBILE

2.1. Il benessere termo igrometrico (sostenibile)

2.1.1. Premessa

La casa – comunque costruita – ha il seguente principale obiettivo: proteggere chi vi abita dalle avversità del mondo esterno. Sia essa una tenda di viaggiatori, una baracca di cantiere o un palazzo di diversi piani, deve sempre riparare dal tempo (quello atmosferico), dando agli individui – i suoi abitanti – una sensazione di benessere.

In termini più rigorosi si potrebbe dire che il sistema involucro (di un edificio) è finalizzato al controllo della relazione tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno, ed ha come obiettivo fondamentale la ricerca ed il mantenimento dello stato interno di comfort abitativo, ovvero di benessere degli abitanti dello spazio confinato dall'involucro stesso. Inoltre, l'involucro funzionale tende a perseguire i seguenti e ulteriori obiettivi: riduzione dell'onda termica estiva ed invernale, attenuazione dei rumori, protezione dall'inquinamento atmosferico ed elettromagnetico esterno ecc.

Il concetto di benessere (o comfort) ambientale è piuttosto ampio e complesso e comprende quell'insieme di variabili che rappresentano lo stato di soddisfazione di un organismo umano allorché è inserito all'interno di un involucro edilizio. Il nostro obiettivo è principalmente quello di dar forma al concetto di benessere termico (o, più propriamente, termoigrometrico). In quest'ambito l'involucro diviene uno speciale mediatore finalizzato allo scambio di energia (e di materia): una specie di terza «pelle» in aggiunta al vestiario (la seconda) e alla cute (la prima pelle).

2.1.2. Il benessere ambientale e termoigrometrico

Il benessere ambientale (o benessere negli ambienti confinati) è definibile come quella condizione psicologica che esprime soddisfazione nei confronti dell'interazione con l'ambiente medesimo. Le variabili di controllo del benessere ambientale sono:

- 1) microclimatiche, ossia relative allo stato termoigrometrico dell'ambiente confinato;
- 2) della qualità dell'aria;
- 3) dei rumori;
- 4) dell'illuminazione naturale e artificiale.

Tabella 2.1. *Il benessere ambientale*

Benessere ambientale	Variabili di controllo
– Termoigrometrico	Grandezze microclimatiche
– Respiratorio (e olfattivo)	Controllo della qualità dell'aria
– Acustico	Attenuazione del rumore
– Visivo	Controllo illuminazione naturale e artificiale

Per quanto riguarda il solo benessere termico (e igrometrico) le variabili di controllo ambientale sono:

- 1) la temperatura dell'aria interna (o temperatura a bulbo asciutto);
- 2) la temperatura a bulbo bagnato;
- 3) la temperatura media radiante delle superfici interne di confine;
- 4) la temperatura di rugiada;
- 5) la velocità dell'aria interna;
- 6) l'umidità relativa.

Alle grandezze suddette si dovranno aggiungere quelle variabili che esprimono le caratteristiche proprie ed il comportamento dell'individuo:

- a) il livello e tipo di attività svolta;
- b) la resistenza termica del vestiario indossato.

In parole diverse, il benessere termico dell'individuo che abita un ambiente confinato deriva dal controllo e dall'interazione delle variabili quantitative sopra enumerate e riportate nella seguente tabella 2.2.

Tabella 2.2. *Il benessere termico*

Benessere termico	Variabili di controllo
AMBIENTE INTERNO	
Controllo dei parametri ambientali:	Temperatura dell'aria a bulbo asciutto
	Temperatura dell'aria a bulbo bagnato
	Temperatura media radiante
	Temperatura di rugiada (o di saturazione)
	Velocità dell'aria
	Umidità relativa
INDIVIDUO	
Controllo dei parametri individuali:	Livello di attività
	Livello di resistenza del vestiario

In senso generale il benessere termico è dato dalla gestione di due interazioni:

- 1) la gestione del livello di attività da parte dell'individuo, che di fatto è una risposta allo stress ambientale e tende all'aumento (o alla diminuzione) del calore prodotto;
- 2) il controllo – sempre da parte dell'individuo – del livello di resistenza degli abiti, che contrasta gli scambi termici determinati dal gradiente di temperatura (e di pressione parziale del vapore) tra la superficie della pelle e l'ambiente esterno.

2.1.3. *Le variabili ambientali del benessere termoigrometrico*

Diamo alcune definizioni delle variabili ambientali al fine di cogliere il significato complessivo (sistemico) del benessere termoigrometrico.

↘ *Temperatura dell'aria a bulbo asciutto*

Si misura con un termometro a bulbo, a colonna d'alcool (o di mercurio) la cui dilatazione (o allungamento nel capillare) rappresenta – visivamente – la temperatura dell'aria,

indipendentemente dal suo contenuto di vapore d'acqua. In parole diverse si potrebbe fare questo paragone: la misura a bulbo secco corrisponde a quanto percepisce un individuo – con i vestiti perfettamente asciutti – in stato di riposo, ad esempio quando è seduto: di fatto (non riesce a valutare la presenza del vapor d'acqua) valuta solo una sensazione termica complessiva che tiene conto dell'aria per come si presenta, con il suo contenuto (più o meno accentuato) di umidità.

Dal punto di vista termocinetico, la trasmissione del calore tra l'aria e il bulbo del termometro si realizza essenzialmente per convezione. In sintesi, quando si parla semplicemente di temperatura dell'aria, s'intende la temperatura misurata con un termometro a bulbo asciutto.

↘ *Temperatura di rugiada (o di saturazione)*

Un volume d'aria, ad una certa temperatura, può contenere una quantità massima (in peso) di vapore. Al crescere della temperatura cresce la quantità massima di vapore che può esser contenuta nel volume medesimo; al contrario, riducendo la temperatura si riduce tale quantità. Pertanto, per l'aria di ogni ambiente – che di massima contiene sempre una certa quantità di vapore – abbiamo:

- a) aria **insatura**, dove il peso del vapore per unità di volume (o anche per unità di peso dell'aria) è inferiore al valore della quantità massima – al limite, con il peso uguale a zero, abbiamo l'aria secca –;
- b) aria **satura**, quando il peso di vapore per unità di volume (o anche per unità di peso dell'aria) è uguale al valore della quantità massima.

Infine, con lo scopo di definire il concetto di temperatura di rugiada (o temperatura di saturazione), possiamo notare quanto segue:

- 1) l'aria raramente è secca, perché quando lo fosse catturerebbe subito del vapore dal primo specchio d'acqua disponibile;
- 2) l'aria di solito è insatura e tende a saturarsi o catturando acqua o riducendo – nel suo andirivieni – la propria temperatura, fin quando (ad una certa temperatura) si formeranno le prime goccioline d'acqua: la condensa. In questo caso l'aria è divenuta satura per abbassamento della temperatura (dovuta al contatto con una superficie fredda) ed il processo avviato (la condensazione) è di formazione della rugiada (dispersione di gocce d'acqua sopra la superficie). La temperatura che attiva questo fenomeno è denominata temperatura di saturazione (dell'aria umida) o di rugiada.

↘ *Umidità relativa*

È la percentuale in peso di vapore contenuto nell'unità di volume dell'aria (o di peso dell'aria), rispetto al peso in condizioni di saturazione.

Esempio: se un metro cubo d'aria alla temperatura di 20 °C può contenere 10 g di vapore, nel caso ne contenga solo 5 g avrà un'umidità relativa del 50%, se ne contiene 7 g avrà un'umidità relativa del 70%, ecc..

L'umidità relativa è sovente indicata con il simbolo UR%.

↘ *Temperatura dell'aria a bulbo bagnato*

Si misura con un termometro a colonnina d'alcool (o di mercurio) con il bulbo avvolto in una garza inzuppata d'acqua che pesca in un bacinella continuamente alimentata. La garza è investita da una corrente d'aria forzata da un ventilatore. In equilibrio, la dilatazione (o allungamento nel

capillare) rappresenta il processo d'evaporazione dell'acqua dalla garza all'aria ambiente, per cui la misura termometrica è in sostanza una valutazione indiretta dell'umidità relativa presente nell'aria, infatti:

- 1) se l'ambiente è secco l'evaporazione sarà più corposa, il calore estratto (per il cambiamento di stato) sarà maggiore ed il bulbo raffreddato segnerà un valore inferiore a quello della temperatura dell'aria, tanto più piccolo quanto minore è il tasso d'umidità ambientale;
- 2) se l'ambiente è quasi saturo di vapor d'acqua l'evaporazione sarà fortemente ridotta, l'estrazione del calore sarà minima ed il termometro (poco raffreddato) tenderà a rimanere prossimo al valore della temperatura dell'aria ambiente.

Anche in questo caso si potrebbe portare un paragone: la misura a bulbo umido (o bagnato) corrisponde a quanto percepisce un individuo – con i vestiti inzuppati d'acqua – in stato di riposo, ad esempio seduto: di fatto valuterà soprattutto l'evaporazione dell'acqua dai propri vestiti, che lo raffredderanno in modo tanto più forte quanto maggiore sarà la secchezza ambientale. In sintesi:

- 1) quando l'ambiente tende al secco, il termometro a bulbo asciutto segnerà la temperatura dell'aria e quello a bulbo umido una temperatura minore, tanto minore quanto maggiore sarà la siccità;
- 2) quando l'ambiente tende al saturo, il termometro a bulbo asciutto continuerà a segnare la medesima temperatura dell'aria e quello a bulbo umido una temperatura di poco inferiore, o al limite uguale a quella dell'aria nel caso di saturazione completa.

Dal punto di vista termocinetico, la trasmissione del calore tra il bulbo umido del termometro e l'aria si realizza essenzialmente per evaporazione. In sintesi, nota la temperatura a bulbo asciutto e quella a bulbo umido si ricava – mediante l'uso di appositi grafici – l'umidità relativa. Lo strumento di misura dell'umidità relativa dell'aria è denominato psicrometro ed è composto dai due termometri (a bulbo asciutto e bagnato) integrati e dall'abaco per la lettura dell'umidità.

↘ **Temperatura media radiante**

Per temperatura radiante si intende la temperatura di una superficie che emette energia radiante (raggi infrarossi) verso superfici o punti a temperatura inferiore. Un uomo posto all'interno di una stanza «sente» la temperatura radiante di tutte le pareti (e superfici) che lo circondano. In sostanza l'uomo interagisce con le varie temperature «viste» dalla propria superficie corporea, le quali – per irraggiamento – gli trasmettono del calore. Il processo complessivo si può considerare come prodotto da una sola superficie (che circonda l'uomo) dotata di una temperatura pari alla media ponderata delle temperature delle superfici esistenti. La misura della temperatura radiante media si realizza con un termometro a irraggiamento.

Il globotermometro è un termometro a irraggiamento composto da una sfera sottile di rame (cava) di diametro di 15 cm e spessore di 0,2 mm – verniciata di nerofumo – con al centro (nella cavità) un sensore di temperatura (in genere una termocoppia). La sfera di nerofumo assorbe per irraggiamento il calore emesso dalle pareti radianti. In equilibrio la sfera sottile assume una temperatura uguale alla temperatura radiante e comincia ad irraggiare verso l'interno (nella cavità) nella direzione del sensore che indicherà la temperatura radiante media (ponderata) delle pareti.

↘ **Velocità dell'aria (ambiente)**

L'aria di un ambiente confinato può essere ferma o in movimento. Da un punto di vista termocinetico l'aria ferma si comporta come un solido con una conducibilità (termica) molto bassa:

è un ottimo isolante e la trasmissione del calore si realizza per sola conduzione. L'aria in movimento, al contrario, è molto più trasmissiva, ovvero aggiunge al meccanismo della conduzione quello della convezione – asportazione o immissione di calore mediante un movimento di aria «fredda» o «calda» –. In concreto, un uomo inserito in un ambiente confinato, avrà una maggiore sensazione di freddo in inverno (o di fresco in estate) quando l'aria che lo avvolge avrà una velocità maggiore di 0,1 m/s (inverno) o 0,25 m/s (estate).

In conclusione, per il benessere termoisometrico e per non variare la percezione del clima interno, la velocità dell'aria non dovrà superare il valore di 0,1 m/s. La misura della velocità si realizza con **anemometri** da interni, aventi sensibilità adeguata alle ridotte velocità in gioco.

↘ *Cenni sulle unità di misura del calore e della temperatura*

Il processo di termoregolazione (ed energetico in genere) è comprensibile se risultano note – e concretamente chiare – alcune unità di misura.

Diciamo subito che le unità di misura sono suddivise in «pacchetti» coerenti: il sistema anglosassone, quello tecnico degli ingegneri e via discorrendo. In via ufficiale il sistema riconosciuto è quello denominato SI (Sistema Internazionale), usato oramai in ogni ambito, anche se i sistemi pratici – sia per la ricchezza dei dati esistenti, che per pura consuetudine – sono ancora molto applicati.

Nel sistema internazionale (SI) l'energia si misura in Joule (J). In ambito termico è usata la chilocaloria o semplicemente caloria (kcal).

La relazione fondamentale tra le due grandezze è la seguente:

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$$

La relazione precedente, oltre a stabilire un'equivalenza tra due unità diverse, mette in evidenza un fatto importante: il calore (kcal) è una forma di energia.

Della chilocaloria (kcal) – che è una grandezza molto nota, ed è la medesima unità che si trova nel campo dell'alimentazione (o delle diete) – vorrei dare una definizione (non troppo rigorosa) ma espressiva: la chilocaloria (kcal) è quella quantità d'energia necessaria ad innalzare di un grado centigrado (o Celsius) un litro – o decimetro cubo (dm³) o chilo (kg) – d'acqua.

Per completezza è bene introdurre l'unità di misura del calore del sistema anglosassone denominato *Btu* (*British thermal unit*) – che corrisponde alla quantità di calore necessaria per elevare di un grado *Fahrenheit* la temperatura di una *libbra* di acqua.

Nel sistema anglosassone una *libbra* (pound, simbolo «lb» o «p») rappresenta l'unità di misura del peso, e vale la relazione:

$$1 \text{ lb} = 0,4536 \text{ kg}$$

Un'altra grandezza fondamentale è la temperatura, la quale si può esprimere con diverse unità di misura: in gradi kelvin (K) indicata con la lettera maiuscola T; oppure in gradi centigradi (o celsius, °C) indicata con la lettera minuscola t. La temperatura – dal punto di vista fisico – rappresenta la mobilità (disordinata e in tutte le direzioni) delle particelle elementari che costituiscono la materia. All'aumentare di questa agitazione molecolare aumenta il valore della temperatura e viceversa. Nel caso limite di particelle che divengono tutte ferme abbiamo la cosiddetta «morte

MATERIALI PER UN'EDILIZIA SOSTENIBILE

3.1. Premessa

I materiali da costruzione tradizionali – nell'edilizia corrente o commerciale – sono impiegati per circa il 20%, al contrario – il restante 80% – è costituito da materiali innovativi o comunque non tradizionali.

I vantaggi più evidenti dei materiali tradizionali sono:

- 1) il risparmio energetico e di materie prime in relazione alla possibilità di un completo riuso e riciclaggio dei materiali medesimi;
- 2) la salubrità degli ambienti confinati dovuta alla buona permeabilità all'aria dei materiali stessi.

Non solo, i materiali tradizionali sono anche (in linea di massima) sostenibili. Infatti, la sostenibilità di un materiale da costruzione (e di un materiale in genere) è correlata ad un ridotto impiego di energia (durante il ciclo di vita) e ad una bassa produzione di rifiuti. In particolare un materiale sostenibile **non** produce emissioni di gas tossici, inquinanti, ecc..

I materiali da costruzione si suddividono in tre gruppi:

- a) di origine minerale, o materiali minerali;
- b) di origine vegetale, o materiali vegetali;
- c) di origine artificiale (sintesi chimica), o materiali chimici.

Nel campo dell'edilizia sostenibile – per i materiali isolanti – è anche in uso un materiale di origine animale, la lana di pecora.

Sempre nel campo dell'edilizia sostenibile si evita in modo sistematico l'uso di materiali di sintesi chimica ed anche di quei materiali che – pur essendo in parte naturali – nella rimanente parte sono mescolati a materiali che derivano da processi chimici.

In conclusione, per l'edilizia sostenibile i materiali dovrebbero essere di tipo minerale o vegetale o animale.

Dal punto di vista della sostenibilità ambientale – in relazione all'estrazione delle materie prime e alla produzione di rifiuti – abbiamo che il processo edilizio utilizza circa il 50% dei materiali complessivamente estratti e produce una massa di rifiuti pari al 25% di quelli complessivamente prodotti. In parole diverse, il processo edilizio è una **criticità** per uno sviluppo sostenibile.

Pertanto – per un approccio sostenibile – si dovrebbero valutare i materiali da costruzione tanto dal punto di vista del ciclo di vita (consumo energetico, riuso e smaltimento) quanto dal punto di vista delle emissioni inquinanti (aria, acqua e terra) che dal punto di vista della salute degli utilizzatori (emissioni di eventuali agenti tossici). Non solo, il materiale da costruzione va valutato anche da un punto di vista prestazionale nel senso che dovrebbe generare quel benessere abitativo analizzato nel precedente capitolo.

3.2. Materiali, bioedilizia e sostenibilità

Nell'edilizia tradizionale i materiali in uso erano (e sono): laterizio, pietra, legno, terra cruda e calce. Nell'edilizia commerciale la quantità dei nuovi materiali è ampia e include componenti di derivazione chimica (plastica, isolanti polimerici, ecc.). Pertanto l'unità abitativa è divenuta un luogo artificiale (o scarsamente naturale) dove l'elevata tenuta – giustificata dall'obiettivo del contenimento delle perdite per ventilazione – produce effetti indesiderati come la stagnazione di sostanze volatili e tossiche.

Un esempio per tutti: il gas Radon (elemento a bassa attività radioattiva) – emesso da parte di alcuni materiali lapidei o da parte del terreno – che rimane incapsulato in un involucro poco traspirante (fatto con materiali artificiali) mentre viene espulso in un involucro permeabile (fatto con materiali naturali).

In sintesi, alla luce delle semplici considerazioni sopra esposte, diventa opportuno indirizzare la scelta dei materiali in senso maggiormente ecologico (o sostenibile), ossia valutando complessivamente il costo energetico del materiale, il riuso, le emissioni inquinanti, tossiche, ecc..

A livello europeo, per indirizzare (e soprattutto facilitare) la scelta dei materiali maggiormente sostenibili è stato definito il seguente marchio di qualità ecologica (cfr. Regolamento CE n. 66/2010):

- **marchio Ecolabel UE**: etichetta che rappresenta la qualità ecologica di un prodotto o servizio e che lo differenzia (in termini di sostenibilità) da altri prodotti o servizi simili presenti sul mercato. In sintesi l'etichetta attesta che il prodotto/servizio ha un ridotto impatto ambientale nel suo intero ciclo di vita.

Il marchio **Ecolabel UE** è uno strumento volontario, selettivo e con diffusione a livello europeo. Ovvero:

- **strumento volontario**: la richiesta del marchio/etichetta ecologica è del tutto volontaria (a domanda);
- **strumento selettivo**: l'etichetta ecologica è un attestato di eccellenza. Viene concessa solo a prodotti che hanno un ridotto impatto ambientale;
- **strumento con diffusione a livello europeo**: la forza del marchio/etichetta è la sua diffusione nei ventisette stati membri dell'Unione europea nonché nella Norvegia, Islanda e Liechtenstein.

L'etichetta è concessa con un approccio che analizza il prodotto/servizio nell'intero ciclo di vita (LCA): dalla «culla» alla «tomba». Iniziando dall'estrazione delle materie prime (dove vengono qualificati i fornitori), passando attraverso i processi di lavorazione (dove vengono controllati gli impatti ambientali), fino alla distribuzione (analisi dell'imballaggio), uso e smaltimento del prodotto/servizio. Gli studi LCA tendono a valutare il risparmio energetico, il livello d'inquinamento delle acque e dell'aria, la quantità di rifiuti prodotti e la sostenibilità nell'uso delle materie prime. Infine – per ottenere l'Ecolabel UE – viene valutato il livello prestazionale del prodotto/servizio.

↳ Una classificazione dei materiali in edilizia potrebbe essere la seguente:

- 1) materiali con funzione strutturale;
- 2) materiali con funzione di chiusura (e protezione e finitura);
- 3) materiali con funzione legante (o di collegamento);
- 4) materiali con funzione di isolamento termico (ed acustico).

3.3. Funzione strutturale (e sostenibilità)

3.3.1. Calcestruzzo armato

Il materiale maggiormente usato nell'edilizia commerciale – con funzione strutturale – è il cemento armato o (con maggiore proprietà di linguaggio) calcestruzzo amato. È d'uso corrente e scarsamente sostenibile ma al momento risulta (per il modello economico in atto) insostituibile. Nondimeno cercheremo di valutare gli elementi critici del materiale stesso con lo scopo di limitarne l'uso ai casi di effettiva necessità e con l'obiettivo di migliorarne la durabilità.

↳ Carbonatazione e corrosione

In aria, in acqua o nel terreno – solitamente a causa della presenza di umidità – il ferro di armatura è soggetto al processo della corrosione. Al contrario, all'interno della massa cementizia il ferro è protetto da un ambiente fortemente alcalino ($\text{pH} > 13$).

In sintesi, il punto base della protezione delle armature è il carattere basico del getto cementizio. In altre parole, quando l'ambiente basico è stabile (sui livelli anzidetti) il ferro è protetto, diversamente, quando il livello di basicità diminuisce (ossia diminuisce il pH) diminuisce il livello di protezione ed aumenta la probabilità della corrosione, la quale si innesca in seguito al processo di **carbonatazione** (diffusione del biossido di carbonio all'interno del getto cementizio) e alla contemporanea presenza degli ioni cloruro che determinano un forte abbassamento della basicità (con valori prossimi a $\text{pH} \approx 8,5$).

Il processo di corrosione può essere un semplice processo di ossidazione che – una volta formata la pellicola di ruggine (idrossido di ferro) – si stabilizza e protegge il ferro stesso. Oppure può essere un processo progressivo (instabile) che conduce ad una significativa riduzione della sezione resistente. Tutto dipende dal livello di basicità della massa di calcestruzzo.

Infatti, sono differenti i tipi di idrossido di ferro (pellicola di ruggine) che si formano per ossidazione dei ferri d'armatura:

- **ambiente molto basico** ($\text{pH} > 11$): si forma una pellicola di ruggine (idrossido di ferro) stabile, compatta ed aderente ai ferri di armatura. In queste condizioni la pellicola costituisce una protezione che sviluppa una barriera impenetrabile all'ossigeno e all'umidità. Il processo di ossidazione è bloccato (passivazione del ferro);
- **ambiente scarsamente basico** ($\text{pH} < 11$): si forma una pellicola di ruggine (idrossido di ferro) porosa e permeabile all'ossigeno e all'umidità. Il processo di ossidazione è progressivo e si innesca un processo di corrosione.

Come detto in precedenza, la corrosione dei ferri di armatura di un calcestruzzo può portare:

- 1) al distacco del copriferro (fenomeno di *spalling*) a causa delle espansioni che seguono alla formazione della ruggine;
- 2) alla riduzione progressiva della sezione del tondino.

Diversi sono i provvedimenti che possono rendere più sostenibile il calcestruzzo armato (che ha scarse doti di sostenibilità). Del resto – essendo un materiale scarsamente sostituibile all'interno del nostro sistema economico e della relativa edilizia commerciale – risulta opportuno dare la dovuta attenzione ai provvedimenti/comportamenti finalizzati all'incremento della durabilità del materiale stesso. In sintesi si dovrà porre particolare cura alla fasi del progetto e alla formazione dell'impasto cementizio. Con il progetto si dovranno evitare i sovraccarichi di esercizio (che aggravano eventuali processi di corrosione) e si dovrà dare opportuno spessore ai copriferro

che svolgono la funzione di protezione dei ferri d'armatura. Con la formazione dell'impasto sarà fondamentale la scelta e la pulizia dei materiali componenti (acqua, inerti e cemento), onde evitare la presenza di cloruri che favoriscono l'abbassamento del pH e l'innesco della corrosione.

↘ **Protezione dei ferri di armatura**

Per contrastare (ed arrestare) la corrosione dei ferri di armatura si possono utilizzare dei sistemi protettivi di tipo passivo, attivo o una combinazione dei medesimi.

La protezione **passiva** svolge la funzione di isolamento della superficie del metallo dall'ambiente aggressivo (in questo caso la massa cementizia con un basso livello di basicità). L'isolamento si ottiene con un rivestimento protettivo applicato a regola d'arte (ossia secondo le istruzioni del produttore). Solitamente si usano pitture protettive o zincatura.

La protezione **attiva** viene utilizzata per eliminare il processo di corrosione dei manufatti interrati a mezzo di protezioni catodiche, ossia con l'inserimento (a contatto del metallo da proteggere) di un metallo che assume il ruolo di catodo. In questo caso il processo della corrosione interessa quest'ultimo metallo che viene per ciò denominato catodo sacrificale.

↘ **La zincatura del ferro**

In generale, per quanto riguarda il ferro (o acciaio) impiegato nelle costruzioni – armature, accessori degli edifici, ecc. – deve essere preservato dall'azione distruttiva della corrosione con lo scopo di renderlo maggiormente sostenibile.

Tra i metodi menzionati, quello più opportuno (per semplicità, costo e sostenibilità) è la zincatura a caldo. Questo trattamento determina un ciclo di vita cosiddetto «dalla culla alla culla» così caratterizzato:

- a) una forte resistenza alla corrosione che evita gli interventi di ripristino;
- b) la conservazione in esercizio della massa del materiale metallico;
- c) il riciclo (o riuso) del materiale stesso.

3.3.2. Calcestruzzo armato e ponti termici

Un ponte termico rappresenta una **discontinuità** costruttiva (e prestazionale) dell'involucro edilizio. In altri termini, le chiusure verticali e orizzontali presentano una determinata resistenza termica la quale assume – nelle zone che funzionano da ponte termico – un valore «molto» ridotto (cfr. [20]).

In sintesi, un ponte termico è una zona d'involucro dove si realizza una caduta del valore della resistenza termica. Dal punto di vista delle temperature – vista la ridotta resistenza termica del ponte – abbiamo una superficie interna «fredda» (rispetto alla rimanente parte d'involucro) ed una superficie esterna «calda».

Dal punto di vista prestazionale la presenza di un ponte termico implica insalubrità (condensa superficiale, muffe, ecc.), discomfort (superficie interna che irradia freddo) e notevoli perdite di energia per trasmissione. Dal punto di vista quantitativo le perdite di calore in corrispondenza dei ponti termici possono raggiungere un valore di circa il 20% delle dispersioni totali.

Un ponte termico – «caldo» all'esterno e «freddo» all'interno – è visibile con la termocamera a raggi infrarossi.

Il calcestruzzo armato – essendo un materiale composito altamente trasmissivo (con bassa resistenza termica) – determina nell'involucro ove è inserito un ponte termico.

Dal punto di vista della norma tecnica – secondo la UNI EN ISO 10211-1 (cfr. [19]) – abbiamo la seguente definizione di ponte termico: parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto di:

- 1) compenetrazione totale o parziale di materiali con conduttività termica diversa (ad esempio un pilastro in calcestruzzo armato in una parete in laterizio);
- 2) variazione dello spessore della parete (ad esempio un sottofinestra);
- 3) differenza tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella sul lato esterno (ad esempio un angolo tra due pareti perimetrali).

Dal punto di vista qualitativo si potrebbe definire un ponte termico come un pezzo d'involucro dove è molto facilitato il passaggio del calore. Dal punto di vista della classificazione possiamo suddividere i ponti termici come segue:

- **ponti termici di struttura**: dovuti alle discontinuità del materiale nelle congiunzioni tra strutture diverse;
- **ponti termici di forma**: dovuti alle discontinuità della forma.

I **ponti termici di struttura** si trovano nelle congiunzioni di strutture diverse:

- a) congiunzione tra il pilastro e la parete perimetrale che lo contiene;
- b) congiunzione tra un solaio in latero-cemento (struttura orizzontale) e la parete perimetrale (struttura verticale), ecc..

I **ponti termici di forma** si trovano nei nodi tecnologici ove esiste un cambiamento di giacitura (o direzione) dei piani strutturali, ad esempio: angolo – o spigolo – tra due pareti perimetrali (verticali) diversamente orientate, ecc.. Sovente, soprattutto nei sistemi edilizi a scheletro indipendente – in un ponte termico relativo ad una discontinuità geometrica (ad esempio un ponte d'angolo) – si sommano due effetti ponte:

- 1) la riduzione della resistenza termica per la discontinuità di forma (ad esempio: angolo tra due pareti verticali);
- 2) la riduzione della resistenza termica per la discontinuità di struttura (ad esempio la congiunzione tra il pilastro d'angolo in calcestruzzo armato con le due pareti verticali concorrenti).

Prescindendo dai ponti termici di forma – che esistono comunque al variare della geometria dell'involucro (ed anche a fronte di un materiale perfettamente omogeneo) – **i ponti di riferimento**, per quanto riguarda la presenza del calcestruzzo armato, **sono quelli denominati di struttura**.

I ponti termici sono suddivisibili in due grandi categorie:

- a) ponti **termici lineari**;
- b) ponti **termici puntiformi (o puntuali)**.

Un ponte lineare (come detto in precedenza) è dato da una struttura filiforme, ad esempio un pilastro (o una trave) in calcestruzzo armato inserito nell'involucro, un solaio che interseca la parete perimetrale, ecc.. Un ponte puntuale è dato dalla presenza nell'involucro di un elemento puntiforme e disomogeneo, ad esempio un tassello metallico (luogo di perdite di calore) che fissa un pannello isolante di un cappotto esterno.

Dal punto di vista quantitativo – per rappresentare le perdite di un ponte termico – vengono definite le grandezze trasmittanza termica lineare (ponti lineari) e trasmittanza termica puntuale (ponti puntiformi). Normalmente – nel progetto e nella diagnosi energetica – si trascura il contributo dei ponti puntuali e si considera esclusivamente quello dei ponti lineari.

VAPORE, CALORE E SOSTENIBILITÀ DELL'INVOLUCRO

4.1. Aria umida e diffusione del vapore

4.1.1. Premessa

L'aria – in campo edilizio – si ipotizza formata da soli due componenti:

- 1) la **parte secca**, che è la somma di tutti i gas che costituiscono l'aria, escluso il vapor d'acqua;
- 2) la **parte umida**, data dal solo vapor d'acqua.

In sintesi, l'aria che interessa il processo edilizio è composta dalla somma di aria secca con il vapor d'acqua. La composizione (in volume) dell'aria secca è la seguente: 78% di azoto, 21% di ossigeno e 1% di gas rari (elio, neon, argon, ecc.). L'aria umida – oltre agli elementi enumerati – contiene il vapor d'acqua.

4.1.2. Il paradosso del vapore

✎ *Una piccola quantità di vapore ed un grande effetto termodinamico*

La quantità di vapore (nelle ordinarie condizioni di temperatura e pressione) è di pochi grammi per metro cubo d'aria ($\approx 10 \text{ g/m}^3$), 1 m^3 d'aria pesa circa 1,3 kg (ovvero 1300 g). Per cui, in termini percentuali, la quantità di vapore corrisponde a circa l'1% in peso dell'aria.

Questo aspetto quantitativo, ovvero la quantità ridottissima del vapore nell'aria – data l'importanza del vapore nel definire il comportamento termodinamico della miscela complessiva – è paradossale.

✎ *Dentro il paradosso del vapore*

La miscela di aria umida è costituita da due parti:

- 1) il componente aria secca ($\approx 99\%$ in peso);
- 2) il componente vapor d'acqua ($\approx 1\%$).

La risposta termodinamica delle due componenti è profondamente diversa:

- la **parte secca** – nell'ambito delle ordinarie temperature e pressioni – si scalda, si raffredda, si sposta, ma non subisce cambiamenti di stato;
- la **parte umida**, al contrario, oltre a scaldarsi, raffreddarsi e circolare nello spazio, subisce dei cambiamenti di stato (evaporazione e condensazione) e porta nella propria massa una grande quantità di energia **latente**, ossia, nel miscuglio, **svolge la funzione di accumulatore del calore**.

È questo il punto fondamentale: il vapor d'acqua è portatore di grandi quantità d'energia ed è pertanto centrale in tutti i processi termocinetici; non solo, è anche centrale nella percezione del benessere, infatti, l'organismo risponde con la sudorazione (ed evaporazione) in funzione della

quantità di vapore contenuta per chilo d'aria: se l'aria è satura (e può significare semplicemente un contenuto in peso di vapore di circa l'1,5%) l'evaporazione rimane bloccata e lo stato di discomfort diventa dominante.

Per comprendere l'importanza di questa differenza – di questo paradosso del vapore – diamo il seguente esempio.

✎ *Esempio sul paradosso del vapore*

Consideriamo una miscela di aria umida (a 20 °C) con la seguente composizione: 1000 g di aria secca e 10 g di vapor d'acqua.

I calori specifici sono:

- calore specifico (a pressione costante) dell'aria secca: $c_{pa} \approx 1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
- calore specifico (a pressione costante) del vapor d'acqua: $c_{pv} \approx 2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
- calore latente d'evaporazione (o di condensazione): $r \approx 2500 \text{ kJ}/\text{kg}$.

I 1000 g di aria secca – riscaldati da 0 °C a 20 °C – accumulano una quantità di calore sensibile pari a:

$$1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times 1 \text{ kg} \times 20 \text{ °C} = 20 \text{ kJ}$$

I 10 g di vapor d'acqua – riscaldati da 0 °C a 20 °C – accumulano una quantità di calore **sensibile** pari a:

$$2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times 0,010 \text{ kg} \times 20 \text{ °C} = 0,4 \text{ kJ}$$

a cui si aggiunge una quantità di calore **latente** pari a:

$$2500 \text{ kJ}/\text{kg} \times 0,010 \text{ kg} = 25 \text{ kJ}$$

In sintesi, la massa d'aria secca contiene 20 kJ di calore **sensibile**. La massa di vapore contiene 0,4 kJ di calore **sensibile** e 25 kJ di calore **latente**.

In conclusione pare evidente quanto segue:

- una piccola quantità di vapore (1% in peso) è più significativa – dal punto di vista energetico – di una grande quantità d'aria (99% in peso);
- la quantità di vapore controlla il comportamento dell'organismo umano in quanto ne limita lo scambio termico per evaporazione;
- aggiungendo un'altrettanto piccola quantità di vapore – ad esempio 5 g a 20 °C (per raggiungere circa l'1,5% in peso) – abbiamo una **catastrofe** che assume i seguenti caratteri:
 - 1) aria umida che diventa satura;
 - 2) annullamento dei processi di evaporazione dell'organismo umano;
 - 3) discomfort e riduzione del livello di attività.

4.1.3. *La misura della pressione*

La pressione è la forza applicata all'unità di superficie. Nel Sistema Internazionale l'unità di misura della pressione è il pascal:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$$

Il pascal rappresenta una forza specifica, ovvero una forza (in newton) su una superficie unitaria; di fatto è una piccola unità poco adatta ai valori delle pressioni della vita d'ogni giorno.

Facciamo alcune semplici osservazioni:

- **pressione di appoggio di un individuo sul terreno:** la superficie d'appoggio media di un piede (al netto della scarpa) è di circa 250 cm². Al lordo della scarpa abbiamo circa 300 cm². Per i due piedi la superficie complessiva di appoggio è di 600 cm². Ipotizzando un individuo di 60 kg abbiamo una pressione in appoggio di circa:

$$60 \text{ kg} / 60 \text{ cm}^2 = 0,1 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ N/cm}^2 = 10^4 \text{ N/m}^2 = 10^4 \text{ Pa}$$

che – espresso in pascal – diventa un valore numericamente grande;

- **pressione dell'atmosfera al livello del mare:** il primo strato dell'atmosfera (quello a contatto del suolo) è denominato troposfera: ha un'altezza media di circa 10 km e contiene il 90% dell'aria atmosferica. La pressione atmosferica corrisponde al peso di questa massa d'aria sull'unità di superficie terrestre. Pertanto, il peso della colonna d'aria (la troposfera di 10 km = 10⁴ m) su un metro quadrato di superficie terrestre al livello del mare – ammessa una densità media dell'aria di circa 1 kg/m³ – vale:

$$10^4 \text{ m} \cdot 1 \text{ kg/m}^3 = 10^4 \text{ kg/m}^2 \approx 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}$$

dove nelle precedenti relazioni abbiamo posto: 1 N ≈ 1 hg = 10² g = 10⁻¹ kg.

- **il pascal ovvero una moneta troppo piccola:** facendo un paragone valutario, il pascal è una moneta troppo piccola per le nostre attività quotidiane. Infatti, un individuo calpesta il suolo (in posizione ortostatica) con circa 10.000 Pa e si porta sulle spalle un peso d'aria (per unità di superficie) di circa 100.000 Pa.

↘ *Unità pratiche della pressione*

Le unità di pressione più usate sono:

- l'atmosfera: 1 atm ≈ 1 kg/cm² ≈ 10⁵ Pa;
- il bar: 1 bar ≈ 1 kg/cm² ≈ 10⁵ Pa (1 mbar = 10⁻³ bar ≈ 10² Pa = 1 hPa);
- il torr (dal Fisico Torricelli): 1 torr = 760 mmHg = 1 atm = 1 bar.

Il sistema anglosassone prevede il psi (*pound square inch* = libbra su pollice quadrato):

$$1 \text{ psi} \approx 6895 \text{ Pa}$$

↘ *Le unità di pressione in edilizia*

Cerchiamo d'individuare le unità di pressione più comode per l'analisi dei fenomeni energetici (e di sostenibilità) in edilizia. Come punto di partenza abbiamo la pressione atmosferica che è la pressione di una qualunque massa d'aria che circola nell'ambiente. Poi si dovrebbe tener conto della pressione parziale del vapor d'acqua – all'interno della massa d'aria – che è proporzionale al valore percentuale del peso del vapore stesso.

Tutti questi valori di pressione dovrebbero essere maneggevoli e visualizzabili.

↘ *Esempio di unità numericamente maneggevoli*

Nel caso di 1000 g d'aria e 10 g di vapore abbiamo le seguenti coppie numeriche:

- pressione dell'aria (atmosferica) 1 con una pressione del vapore di 0,01;
- pressione dell'aria (atmosferica) 100 con una pressione del vapore di 1;
- pressione dell'aria (atmosferica) 1000 con una pressione del vapore di 10;

d) pressione dell'aria (atmosferica) 100.000 con una pressione del vapore di 1000.

Da questi valori di pressione, alla ricerca di situazioni espressive, abbiamo che la coppia (b) risponde pienamente ai nostri obiettivi, pertanto, scegliendo il kPa (1000 Pa) abbiamo una pressione atmosferica di 100kPa ed una pressione del vapore di 1 kPa.

Altra situazione maneggevole ed usata è il mbar (millibar, ovvero millesimo di bar) che richiama il caso (c), dove la pressione atmosferica è di circa 1000mbar e la pressione del vapore diventa di circa 10mbar. Infine, tenendo presente la seguente relazione – 1 mbar = 1 hPa – il caso (c) diventa 1000 hPa di pressione atmosferica e 10 hPa di pressione del vapore.

↘ *Avvertenza sulle unità di pressione e le unità di misura in genere*

Per quanto riguarda le equivalenze tra le varie unità di pressione (e di misura in genere) è stato utilizzato un metodo approssimato, più semplice e più visualizzabile. Il tutto si basa sulla seguente assunzione: $10 \text{ N} \approx 1 \text{ kg}$, diversamente, nella realtà fisica – per l'accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$) – abbiamo: $9,81 \text{ N} = 1 \text{ kg}$.

4.1.4. *Aria ambiente, vapore e saturazione*

L'aria atmosferica è costituita da due componenti: aria secca e vapor d'acqua. L'aria è un sistema gassoso con un comportamento ideale e i suoi componenti si assumono altrettanto ideali.

L'aria è in continua circolazione nell'ambiente e scambia energia e massa con le numerose presenze d'acqua disseminate nello spazio circostante. L'interazione tra l'acqua e l'aria è regolata dalle pressioni (e temperature) dei due sistemi fluidi.

↘ *Pressione totale e pressione parziale*

Data una miscela di n gas (ideali o quantomeno tendenti a questa condizione) vale la legge di Dalton: la pressione **totale** della miscela è uguale alla somma delle pressioni parziali dei gas che la compongono, dove per pressione **parziale** si intende la pressione del generico gas qualora occupasse da solo lo spazio dell'intera miscela.

Nel caso dell'aria atmosferica abbiamo le seguenti pressioni:

- 1) pressione **totale** dell'aria (p_a);
- 2) pressione **parziale** dell'aria secca (p_{as});
- 3) pressione **parziale** del vapor d'acqua (p_v).

E la seguente relazione:

$$p_a = p_{as} + p_v$$

Dal concetto di pressione, inteso come peso sull'unità di superficie, discende che la pressione **totale** corrisponde al **peso totale** della colonna d'aria sulla superficie di 1 m^2 . Dove il peso totale della colonna è costituito dalla somma dei **pesi parziali** dei due componenti: aria secca e vapore.

In questo modo abbiamo una concreta visione delle pressioni dell'aria, le quali sono legate, anche quantitativamente, ai pesi dei singoli componenti: maggiore è la pressione parziale, maggiore sarà il peso del gas corrispondente.

↘ *Pressione (parziale) di saturazione o pressione del vapor saturo*

Per quanto detto il nostro «materiale» da costruzione, il nostro fluido da sottoporre a continue analisi – l'aria atmosferica – è caratterizzato da due elementi indipendenti:

- 1) la pressione parziale dell'aria secca;
- 2) la pressione parziale del vapor d'acqua;

e da un elemento dipendente: la pressione totale dell'aria (o miscela), che è la somma delle due pressioni parziali.

Diamo alcuni concetti finalizzati alla comprensione del processo di saturazione dell'aria.

Il caffè e lo zucchero

Per comprendere il concetto di saturazione del vapore cerchiamo di impostare dei semplici (e consueti) paragoni. Ad esempio, nel caffè caldo (che potrebbe essere considerato un solvente), di solito – per chi non fa diete o cose simili – si mette un soluto: lo zucchero. La quantità di quest'ultimo (il numero dei cucchiaini) non è senza limiti, infatti, ad ogni temperatura del caffè vi corrisponde una precisa quantità che vi è solubile, oltre la quale, lo zucchero rimane sul fondo. I termini di paragone sono i seguenti: il caffè, lo zucchero, la variabile miscibilità del medesimo (ossia la massima quantità contenibile) e la temperatura. Il funzionamento è questo: la quantità di zucchero miscibile ha un valore massimo (in peso) che aumenta all'aumentare della temperatura del caffè. In parole diverse, ad ogni temperatura del caffè corrisponde un peso di zucchero miscibile che aumenta all'aumentare della temperatura stessa. Facciamo alcune considerazioni numeriche: una tazzina di caffè – alla temperatura di circa 40 °C – è in grado di sciogliere zucchero per una quantità **massima** di 25 g. Aumentando la temperatura a 45 °C la quantità **massima** di zucchero miscibile diventa 30 g. Al contrario, un caffè freddo – circa 35 °C – potrà contenere una quantità **massima** di zucchero pari a 20 g. In questi tre casi il caffè è **saturo** di zucchero – ne contiene la quantità massima – in termini percentuali ne contiene il 100%. Di solito, la quantità di soluto (in questo caso lo zucchero) si esprime in percentuale della quantità massima solubile. Vale a dire, se a 35 °C la quantità massima è 20 g (100% o saturazione) nel caso ne misceliamo 10 g abbiamo un valore del 50%. Il valore percentuale ha una forza espressiva notevole, non solo esprime la condizione di saturazione (100%), ma – nei rimanenti casi – indica la distanza dalla saturazione stessa. È anche interessante notare che aggiungendo lo zucchero oltre il 100% la parte eccedente si deposita sul fondo.

L'aria che vaga (circola) nell'ambiente e cattura le molecole d'acqua

Ogni volta che una massa d'aria entra in contatto con una massa d'acqua si realizza uno scambio di energia e materia attraverso l'evaporazione, vale a dire che un insieme di particelle d'acqua cambia lo stato di aggregazione (diventa vapore) assorbe il calore latente e migra nell'aria, che accoglie il vapore in funzione di quanto già ne possiede: se l'aria è satura l'evaporazione è nulla, se è tendenzialmente secca l'evaporazione è massima. L'evaporazione è regolata dalla pressione parziale del vapore, la quale – essendo correlata al peso del medesimo – è piuttosto piccola rispetto alla pressione totale dell'aria che corrisponde a quella atmosferica.

Il vapore e la saturazione

La cattura delle molecole d'acqua – da parte dell'aria – si realizza quando la pressione parziale del vapore è minore della pressione di saturazione. Consideriamo un massa d'aria in contatto con una qualunque superficie d'acqua. In funzione della temperatura dell'aria e dell'acqua (siamo in condizioni di equilibrio) abbiamo un continuo passaggio di particelle d'acqua dallo stato liquido allo stato di vapore. Questo processo – denominato evaporazione – si conclude quando

ENERGIA (QUASI) ZERO E SOSTENIBILITÀ

5.1. Una casa (quasi) sostenibile

5.1.1. Premessa

Tra le case sostenibili rientrano (in una qualche misura) le case denominate a comportamento passivo, o semplicemente passive. Anche se, in questi edifici, la sostenibilità è intesa soprattutto in termini di risparmio energetico. Pur tuttavia, l'edilizia passiva – peraltro molto codificata – è didatticamente significativa e rappresenta un esempio base da trasformare nella direzione di una maggiore sostenibilità (e vivibilità).

5.1.2. Classificazione (incompleta) dei sistemi passivi

Non è possibile una completa classificazione dei sistemi passivi, tante sono le variabili di tipo tecnologico, culturale e storico.

Ad esempio, volendo fare un accenno solo linguistico, abbiamo: edilizia bioclimatica, bioarchitettura, case solari passive, edifici ad energia quasi zero, ecc.. Dove le classificazioni/denominazioni – pur rispondendo a valenze culturali distinte, approcci tecnologici locali (o globali), processi costruttivi differenti – hanno un punto in comune: perseguono il risparmio energetico.

Infine, questi concetti sono spesso non codificati, oppure (in modo equivalente) hanno codificazioni locali, per cui diventa poco praticabile una trattazione generale e puntuale dei termini e delle tecnologie, mentre risulta più praticabile un'esposizione per obiettivi che metta in evidenza le relazioni.

Diamo due definizioni fondamentali:

- **Casa a comportamento attivo:** edificio dove il processo di climatizzazione invernale (ed estivo) è realizzato con la presenza degli impianti tecnici che trasformano l'energia primaria – da fonte **non** rinnovabile – in energia utile al riscaldamento (e raffrescamento) dell'aria interna all'involucro e di parte dell'involucro stesso. Il consumo di energia primaria non rinnovabile (gasolio, gas naturale, ecc.) – che si traduce nel progressivo depauperamento delle risorse naturali – corrisponde ad un modello costruttivo non sostenibile. L'edificio a comportamento attivo è quello espresso dall'edilizia corrente di tipo commerciale.
- **Casa a comportamento passivo:** edificio dove il processo di climatizzazione invernale (ed estivo) è dato dall'ottimizzazione dei guadagni termici solari ed interni (metabolismo delle persone, calore di cottura degli alimenti, uso di computer, ecc.) e dove è massimizzata la resistenza termica d'involucro. Il consumo di energia primaria è quasi sempre nullo. Oppure (quando inevitabile) è realizzato a carico di fonti rinnovabili. In queste condizioni di funzionamento l'edificio è ampiamente sostenibile.

➤ *Una digressione linguistica*

Il termine **attivo** deriva dall'impiego – nell'edificio – di impianti meccanici con componenti in movimento (rotazione di pompe, ventilatori, ecc.), che utilizzano energia elettrica di rete e che trasformano l'energia primaria in energia utile alla climatizzazione. Dove – nella quasi totalità dei casi – sia l'energia elettrica che l'energia primaria derivano da fonti **non** rinnovabili.

Il termine **passivo** deriva dal funzionamento dell'involucro che da un lato (attraverso le superfici vetrate) favorisce l'ingresso dell'energia solare, d'altro lato impedisce la perdita del calore contenuto nello spazio confinato. In sostanza, la struttura involucro (opportunamente progettata) funge da struttura di climatizzazione dell'aria interna attraverso una serie di scambi termici basati sul trasporto conduttivo, convettivo e radiativo.

Gli esempi consolidati di edilizia passiva sono denominati:

- 1) architettura (o edilizia) bioclimatica;
- 2) edilizia passiva (o *Passivhaus*).

Architettura (o edilizia) bioclimatica

È un modello di derivazione nord-americana **non soggetto** a protocolli di progettazione, realizzazione e collaudo. È affidato soprattutto alla capacità individuale ed è sovente il risultato di un processo di autoconstruzione.

Gli obiettivi fondamentali di un sistema edilizio bioclimatico sono:

- a) orientamento delle superfici vetrate verso sud con lo scopo di massimizzare l'energia solare captata;
- b) accumulo del calore solare in masse murarie ad alta capacità termica;
- c) distribuzione del calore accumulato – finalizzata alla climatizzazione – con trasmissione conduttiva, convettiva e radiativa.

Le tecnologie passive utilizzate – statiche, senza organi meccanici in movimento e senza fluidi in moto forzato – sono: pannelli termici solari ad acqua a circolazione naturale; pannelli termici solari ad aria (praticamente scomparsi) a circolazione naturale; masse murarie di accumulo (pavimenti, muri, ecc.). Il pensiero tecnologico centrale dell'architettura bioclimatica è la captazione dell'energia solare e la sua trasformazione in energia utile alla climatizzazione dello spazio confinato. In sintesi, la casa bioclimatica, utilizza un solo tipo di energia primaria rinnovabile: l'energia solare.

*Edilizia passiva del nord Europa (o *Passivhaus*)*

È un modello di derivazione europea soggetto a protocolli di progettazione, realizzazione e collaudo. I primi studi e prototipi furono realizzati nel 1991 da Wolfgang Feist e da Bo Adamson, che applicarono i principi dei sistemi passivi ad un piccolo edificio costruito a Darmstadt, con l'obiettivo di realizzare un prototipo di casa a basso consumo energetico. L'esperimento ebbe successo e nel 1995 Wolfgang Feist – basandosi su questa esperienza – iniziò a codificare un modello prestazionale che ebbe la denominazione di standard *Passivhaus*.

Lo standard si basa essenzialmente sui seguenti aspetti:

- 1) definizione di un limite prestazionale in termini di consumo energetico;
- 2) definizione di un requisito di qualità ambientale in termini di comfort;
- 3) determinazione di un costo/investimento adeguato al ciclo di vita del prodotto (la casa passiva), ovvero con un tempo di ritorno limitato, vale a dire con una quantità di benefici (sociali e individuali) maggiore dei costi.

Edilizia passiva del sud Europa (o Passiv-On)

Il sistema Passivhaus – nato e sviluppato nell'Europa centrale – è stato esteso al clima più mite dell'Europa del sud mediante lo studio/progetto denominato Passiv-On, che di fatto ha gli stessi principi espressi nel modello Passivhaus con la differenza che cambiano numericamente i requisiti minimi da rispettare in funzione delle migliori condizioni climatiche dell'Europa del Sud.

✎ *Antinomia nel sistema Passivhaus*

L'obiettivo tecnologico fondamentale del sistema Passivhaus (ed anche del sistema Passiv-On) è il perseguimento del contenimento del calore nello spazio confinato delimitato dall'involucro, specie per quanto riguarda il calore derivante dal guadagno termico solare e dai guadagni interni. Di conseguenza l'involucro viene realizzato sia scarsamente permeabile all'aria (per la riduzione delle perdite di ventilazione) che scarsamente conduttivo al calore (per la riduzione delle perdite di trasmissione). Di fatto l'edificio diventa ermetico – praticamente impermeabile – con l'aspetto positivo della forte riduzione delle perdite di calore ma, al contempo, con l'aspetto negativo della drastica riduzione della traspirazione e con la produzione di un elevato livello di umidità, il quale viene sempre risolto con l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC). In sintesi – e questa è l'antinomia – la casa passiva del nord Europa – dove le condizioni climatiche sono più rigide e dove il livello di ermeticità dell'involucro è decisamente più elevato – deve utilizzare un impianto meccanico (attivo) per realizzare le condizioni di benessere termo-igrometrico. In altre parole, la cura estrema del bilancio del calore (attraverso la realizzazione di un involucro ermetico) ottiene come risultato negativo uno sbilanciamento tra il vapore prodotto e quello smaltito che richiede la necessità di installare un impianto meccanico per il ricambio d'aria. Diversamente vale per i sistemi Passiv-On – relativi al sud Europa – in questo caso, in funzione delle migliori condizioni climatiche, non sempre è necessario l'impiego di un sistema VMC.

✎ *Sostenibilità dell'edilizia bioclimatica*

Come precedentemente descritto, il modello costruttivo bioclimatico non è stato definito mediante protocolli di progettazione, realizzazione e collaudo, pertanto, ogni giudizio, in termini di sostenibilità, deve essere riferito ad una specifica unità abitativa o edificio. Nondimeno, in generale, la gran parte degli edifici realizzati ha utilizzato materiali naturali e di recupero, dando concreta dimostrazione di un'edilizia perlopiù sostenibile.

✎ *Sostenibilità della casa passiva europea (Passivhaus)*

In questo caso, la presenza di procedure standardizzate (di tipo prestazionale), che pongono l'accento sul funzionamento degli edifici, danno la possibilità di utilizzare sia materiali naturali che materiali artificiali. Pertanto, il protocollo – che non ha come obiettivo la sostenibilità in senso lato (risparmio di energia, ciclo di vita, ecc.), ma ha come obiettivo il solo risparmio energetico – corrisponde ad una visione parziale del concetto di sostenibilità. Ovvero, specie per le case passive che usano materiali isolanti di tipo sintetico e sistemi VMC, la sostenibilità è chiaramente scarsa.

✎ *Sostenibilità della casa passiva europea (Passiv-On)*

Anche in questo caso, la presenza di procedure standardizzate (di tipo prestazionale) danno la possibilità di utilizzare sia materiali naturali che materiali artificiali. Pertanto, il protocollo – che

ha come obiettivo il solo risparmio energetico – non è pienamente sostenibile. Pur tuttavia, i climi più miti (e quindi l'eventuale eliminazione dell'impianto VMC) e l'uso volontario di materiali naturali possono rendere i singoli casi ampiamente sostenibili.

5.1.3. Edilizia bioclimatica

L'edilizia bioclimatica deriva dagli studi di Victor Olgyay (cfr. [22]). È finalizzata all'utilizzazione degli elementi naturali del sito (irraggiamento solare, acqua, caratteristiche della vegetazione, ecc.) per realizzare edifici termicamente efficienti e confortevoli indipendentemente dall'uso degli impianti di climatizzazione.

La cultura del modello bioclimatico persegue un obiettivo di sostenibilità cercando di annullare il consumo di energia primaria da fonte **non** rinnovabile. L'edilizia bioclimatica tende a trasformare l'energia primaria **rinnovabile** proveniente dal sole in energia utile alla climatizzazione degli ambienti confinati.

In parole diverse, lo scopo dell'edilizia bioclimatica è il controllo del microclima interno – con modelli progettuali di tipo passivo (senza l'ausilio di qualsivoglia impianto meccanico) – ottimizzando gli scambi termici tra l'edificio e l'ambiente esterno e tra parti distinte dello spazio confinato. Gli obiettivi di funzionamento di un edificio bioclimatico variano in funzione delle stagioni, pertanto avremo:

- 1) finalizzazioni per il periodo invernale;
- 2) finalizzazioni per il periodo estivo.

Dove:

- **Obiettivi per la stagione invernale:** favorire l'irraggiamento solare sull'involucro (ottimizzando l'orientamento dell'edificio) per scaldare gli ambienti interni. Incrementare l'isolamento termico dell'involucro (ossia la resistenza termica) per conservare il calore accumulato;
- **Obiettivi per la stagione estiva:** proteggere l'involucro dall'irraggiamento solare mediante lo studio dell'ombreggiamento e mediante l'incremento della sua inerzia termica. Nonché favorire la ventilazione naturale dell'edificio.

Pertanto, i caratteri fondamentali dell'involucro bioclimatico – sistema rigorosamente passivo – sono:

- a) orientamento che massimizza l'irraggiamento solare;
- b) elevati valori di resistenza termica ed inerzia termica;
- c) controllo dell'ombreggiamento di tipo naturale (vegetazione estiva) e di tipo artificiale (apertura e chiusura delle vetrate con schermature regolabili);
- d) presenza di canali per la ventilazione **naturale** estiva con lo scopo di evitare il surriscaldamento.

L'edilizia bioclimatica – per la climatizzazione dello spazio confinato – utilizza sistemi tecnologici solari passivi.

I sistemi solari passivi sono finalizzati al seguente processo di trasporto del calore:

- **captazione** dell'energia solare mediante **collettori**. Ovvero mediante le superfici d'involucro (opache e trasparenti) orientate a sud (nell'emisfero boreale) e a nord (nell'emisfero australe);
- **accumulo** mediante masse ad elevata capacità termica (pareti, pavimenti, ecc.);
- **distribuzione** del calore nello spazio confinato (**spazio climatizzato**).

↘ *Sistemi solari passivi e sistemi solari ibridi*

Un sistema solare passivo (rigoroso) non contiene impianti meccanici e neanche semplici ventilatori per forzare il movimento dell'aria e incrementare lo scambio termico convettivo. Al contrario, un sistema attivo – pur sfruttando l'energia solare (ad esempio per la produzione di acqua calda sanitaria) – è dotato di impianti meccanici di climatizzazione. Una terza via sono i **sistemi ibridi**, i quali, pur essendo essenzialmente dei sistemi solari passivi utilizzano semplici ventilatori per rafforzare il movimento dell'aria e per rafforzare il trasferimento di calore dai punti collettori ai punti di accumulo fino allo spazio servito (da climatizzare). In ogni caso, la scelta tecnologica dei puristi dell'edilizia bioclimatica rimane sempre e semplicemente il sistema solare passivo.

↘ *Guadagno solare*

I sistemi solari passivi vengono classificati in funzione del tipo di guadagno solare:

- 1) guadagno separato;
- 2) guadagno indiretto;
- 3) guadagno diretto.

Guadagno separato

È presente uno spazio separato che funge da collettore e accumulatore del guadagno solare. Successivamente il calore viene trasferito – per moto convettivo naturale – nello spazio da climatizzare. Questa tipologia di guadagno si può configurare come una serra separata – rispetto allo spazio servito (o spazio utente da climatizzare) – finalizzata alla raccolta del calore.

Guadagno indiretto

Una massa di accumulo raccoglie e immagazzina il calore solare che viene successivamente trasferito allo spazio servito (spazio utente da climatizzare). In sintesi, la massa di accumulo è interposta tra il sole e lo spazio servito, ovvero il guadagno solare dello spazio confinato si realizza indirettamente. Questa tipologia di guadagno si può configurare in due distinte tecnologie:

- a) muro di accumulo;
- b) muro Trombe.

Guadagno diretto

L'irraggiamento solare entra direttamente nello spazio servito (da climatizzare). Questa guadagno si può configurare come una serra integrata nello spazio servito (o spazio utente da climatizzare).

↘ In sintesi, di massima, abbiamo cinque modalità di guadagno solare:

- 1) separato con serra-collettore;
- 2) indiretto con muro di accumulo;
- 3) indiretto con muro di trombe;
- 4) diretto con semplice vetrata e serra integrata nello spazio utente (da climatizzare).

↘ *Edificio con sistema a guadagno separato*

È un edificio solare a comportamento passivo. La zona di raccolta dell'irraggiamento solare è distinta dallo spazio usato per le attività abitative.

