

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



**GRAFILL**

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

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.

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 innesta 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.

La trasmittanza termica lineare ha le dimensioni fisiche di W/mK . All'aumentare della lunghezza del ponte lineare aumenta la perdita di calore, la quale è data dal prodotto della trasmittanza lineare per la lunghezza del ponte medesimo ed ha le dimensioni di W/K . Il contributo del ponte si somma alla perdita della parte rimanente d'involucro.

3.3.3. *Correzione di un ponte termico in calcestruzzo armato*

La maggior parte dei ponti termici riguarda la discontinuità del calcestruzzo armato nelle strutture di chiusura dell'involucro edilizio, pertanto, in questo paragrafo, parleremo della correzione dei ponti termici con lo scopo di rendere maggiormente sostenibile il materiale composito calcestruzzo armato.

La correzione di un ponte termico consiste nella messa in opera di quei provvedimenti tecnologici che riducono (o annullano) gli effetti del ponte medesimo. L'effetto di un ponte consiste in una forte perdita di calore. La riduzione dell'effetto di un ponte consiste nella riduzione o annullamento delle dispersioni termiche. In termini operativi la correzione di un ponte termico si ottiene incrementando la sua resistenza termica, ovvero **aggiungendo localmente opportuni strati di materiale isolante**.

Dal punto di vista dell'edilizia o **architettura sostenibile**, o bioarchitettura, l'intervento sui ponti termici – dal progetto alla costruzione – è una priorità tecnologica. Un involucro edilizio con delle discontinuità che si comportano da ponte termico è un involucro difettoso. Ed è anche una risposta incompleta alle esigenze del committente/utente. Pertanto – per i costruttori/progettisti che hanno come modello «filosofico» di riferimento la sostenibilità architettonica – la correzione dei ponti termici (in ogni fase del processo edilizio) è un obiettivo da conseguire.

Quando una struttura (o stratigrafia) funziona da ponte termico, la sua correzione si realizza sommando uno strato di materiale isolante alla struttura medesima. Per motivi igrometrici – ovvero per evitare la formazione di rugiada – il materiale o pannello isolante è opportuno montarlo sulla faccia esterna, o comunque prossimo alla superficie esterna della parete. La correzione (in concreto) è la messa in opera di un pannello di materiale isolante con i seguenti obiettivi:

- 1) aumentare la resistenza termica del ponte con lo scopo di renderla circa uguale a quella della parete corrente;
- 2) aumentare la temperatura sulla faccia interna del ponte con lo scopo di renderla circa uguale alla temperatura sulla faccia interna della parete corrente (che in ogni caso, per evitare la condensa, dovrà essere $> 13,2$ °C).

Per quanto riguarda l'impiego del materiale isolante, nel modello filosofico denominato «edilizia sostenibile» si dovranno usare **esclusivamente** materiali di origine minerale, vegetale o animale. Diversamente, per una sostenibilità meno rigorosa, ma attenta ai modelli economici esistenti e alle tipologie complesse (ad esempio un palazzo multipiano), si dovranno usare di **preferenza** (ma non in via esclusiva) materiali di origine naturale.

Per quanto riguarda la correzione di un ponte termico, la scelta del tipo di materiale isolante dipende (tra le altre cose) dalla posizione del ponte medesimo e quindi dal livello di umidità ambientale. Infatti, un muro perimetrale (contro terra) con pilastri in calcestruzzo armato è soggetto ad un livello di umidità di risalita che potrebbe peggiorare le perdite del ponte stesso. Pertanto – secondo il modello della bioedilizia – si potrebbe usare un pannello in fibre di legno (od anche un pannello di sughero) eventualmente protetto contro terra con un cannicciato, ossia

con un materiale che incrementa il livello di isolamento e che introduce – con la superficie levigata e con le canalizzazioni longitudinali – una maggiore capacità di controllo dell'umidità. In alternativa, in luogo del cannicciato – e sempre come protezione dall'umidità – si potrebbe usare un foglio o strato di laterizio forato. Diversamente – nell'edilizia di consumo – si tende ad usare un pannello di tipo sintetico, come ad esempio un pannello di polistirene espanso (EPS) o estruso (XPS), il quale può essere impiegato sia nelle zone ad elevata umidità che nelle zone ad ordinaria umidità. In questo caso – soprattutto per motivi di resistenza meccanica – si possono usare pannelli a due strati: un primo strato di fibre di legno ed un secondo strato di polistirene espanso o estruso.

La relazione involucro-calcestruzzo armato determina – per la discontinuità introdotta – una serie di ponti termici così enumerabili:

- 1) **pilastro in parete corrente**: è il nodo tecnologico tra il pilastro in c. a. e la parete verticale;
- 2) **pilastro in angolo**: è il nodo tecnologico tra il pilastro in c. a. (nello spigolo dell'edificio) e le due pareti verticali che formano un angolo diedro;
- 3) **solaio in parete corrente**: è il nodo tecnologico tra la struttura orizzontale solaio e la parete verticale;
- 4) **solaio di base su pilotis**: è il nodo tecnologico tra il solaio su pilotis e la parete verticale;
- 5) **solaio di base interrato**: è il nodo tecnologico tra il solaio interrato e la parete verticale;
- 6) **solaio di base su locale non riscaldato**: è il nodo tecnologico tra il solaio su locale non riscaldato e la parete verticale;
- 7) **solaio di copertura**: è il nodo tecnologico tra il solaio di copertura e la parete verticale.

Infine esiste un altro nodo, che non sempre contiene l'elemento in c.a., ma che citiamo per completezza:

- 8) **serramento in parete corrente**: è il nodo tecnologico tra il serramento e la parete verticale.

Prescindendo da una schematizzazione puntuale di correzione dei ponti termici, che esula dallo scopo di questo testo, rimane da dire, in termini generali, che la correzione di un ponte ha di fatto i seguenti due indirizzi:

- 1) correzione locale;
- 2) correzione globale.

La **correzione locale** consiste nell'applicazione di pannelli di materiale isolante nella zona ponte termico (verso l'esterno e limitatamente al ponte medesimo) con lo scopo di aumentare la resistenza termica della zona ponte.

La **correzione globale** consiste nell'applicazione (all'intero involucro) di un cappotto di materiale isolante con lo scopo di inglobare tutti i ponti termici esistenti e di aumentare la resistenza termica complessiva dell'involucro stesso.

In conclusione, la correzione degli inevitabili ponti termici introdotti dal componente d'involucro calcestruzzo armato – componente ad alta trasmittanza termica (ovvero bassa resistenza termica) – rende il materiale medesimo (in esercizio) termicamente meno dispendioso e quindi più sostenibile.

3.3.4. Cemento e riciclaggio di scarti di lavorazione e rifiuti

Nel processo di produzione del cemento – soprattutto in fase di cottura delle materie prime (argilla, marna, calcare, ecc.) – si possono aggiungere materiali derivanti da altri processi, sia

con la funzione di materia prima, sia con la funzione di combustibile. In parole diverse, alle materie prime si possono aggiungere scorie d'altoforno, ceneri delle centrali termoelettriche, polveri captate dai filtri di abbattimento, ecc., ottenendo i seguenti obiettivi:

- a) il riciclaggio di rifiuti altrimenti destinati allo smaltimento;
- b) un minore impiego di materie prime e di combustibili di origine naturale. In concreto, durante la produzione del cemento gli scarti di altri processi produttivi (o i rifiuti di varia natura) sono utilizzati sia in fase di cottura delle materie prime (fondenti, correttori di composizione chimica, ecc.), sia nella fase di macinazione per ottenere il cemento riducendo in tal modo il depauperamento delle cave e incentivando il riciclaggio dei rifiuti.

Dal punto di vista chimico-fisico – viste le ridotte percentuali degli elementi aggiunti – il riciclaggio sembra che non comporti variazioni significative in termini di emissioni inquinanti e in termini di caratteristiche tecnologiche del prodotto finito. Diversamente, dal punto di vista energetico – in relazione alle alte temperature di cottura 1300÷1500 °C e all'elevato consumo di calore – l'impiego dei rifiuti come combustibili (oltre a ridurre l'uso di combustibili naturali non rinnovabili) ricicla un materiale altrimenti destinato alla discarica.

Le principali tipologie di combustibili alternativi in uso per la produzione del cemento sono: olii esausti; emulsioni oleose; solventi organici esausti; pitture, vernici, colle e resine non clorurate; plastiche; pneumatici usati; fanghi di depurazione essiccati; residui della lavorazione del legno; farine animali, ecc.

In sintesi abbiamo i seguenti vantaggi ambientali:

- a) la valorizzazione dei rifiuti (e scarti) come materie prime o come combustibili;
- b) una riduzione dei rifiuti destinati allo smaltimento;
- c) una riduzione del consumo di nuove materie prime;
- d) una riduzione del consumo di combustibili fossili.

Alcuni osservatori – principalmente coloro che operano in termini di bioedilizia – fanno una diversa lettura dell'aggiunta di materiali di rifiuto o di scarto nel processo di produzione del cemento. Sembra (a parer loro) che possa esistere la tendenza ad un uso scarsamente controllato dei suddetti materiali, i quali (aggiunti in eccesso) anziché rendere il cemento più sostenibile lo rendono meno durevole, più **inquinato** e poco **sostenibile**. Al limite il cemento diventa un materiale che – posto in opera come calcestruzzo (cemento, sabbia, ghiaia, ecc.) – diventa (una volta rappreso) con un livello di sicurezza inferiore a quello ordinario e con possibili emissioni inquinanti nocive alla salubrità degli ambienti (come ad esempio l'energia raggianti delle scorie a basso contenuto radioattivo).

3.3.5. Calcestruzzo, gabbia di Faraday e variazione del campo elettromagnetico naturale.

L'armatura del calcestruzzo funziona come gabbia di Faraday. Nella bioedilizia la gabbia di Faraday è ritenuta un elemento critico per la salubrità degli ambienti.

La gabbia di Faraday è un involucro metallico (anche rete metallica) che funge da barriera contro i campi magnetici provenienti dall'esterno. La traspirabilità dell'involucro – in bioedilizia – è relativa a tutti i tipi di fattori fisici naturali: aria, vapore e campi elettromagnetici generati dal carattere ferromagnetico della crosta terrestre.

Nel caso dell'armatura in cemento armato abbiamo due situazioni:

- 1) armatura elettricamente ben collegata a terra;
- 2) armatura scarsamente collegata a terra.

Nel caso 1) il collegamento a terra permette il passaggio della corrente nell'armatura e il campo elettromagnetico naturale viene modificato dalla corrente di armatura e trasmesso all'interno dell'edificio.

Nel caso 2) il collegamento a terra è scarso, l'armatura metallica funziona da gabbia di Faraday, le cariche elettriche si addensano verso la superficie esterna della gabbia e il campo elettromagnetico terrestre viene bloccato all'esterno, ovvero la gabbia riduce la «traspirabilità» dell'involucro.

In sintesi, la presenza dell'armatura metallica, comunque collegata a terra, determina sempre una variazione del campo elettromagnetico naturale visto dall'interno dell'involucro edilizio. Pertanto, dal punto di vista della bioedilizia, la gabbia metallica del calcestruzzo armato è un punto critico e determina quello che è genericamente denominato stress cellulare. Di questi modelli di analisi e delle relative conclusioni **non esiste al momento un'evidenza scientifica** come la intendiamo modernamente.

3.3.6. Calcestruzzo armato e sostenibilità

Per quanto riguarda il concetto di sostenibilità del calcestruzzo armato, se da un lato pare essere decisamente **poco** sostenibile, da altri punti di vista sembra potersi dire che è sostenibile. Di fatto, il comportamento del calcestruzzo armato va analizzato in modo induttivo – caso per caso, in funzione della tipologia costruttiva e delle dimensioni dell'edificio, – con lo scopo di trarre delle conclusioni in tema di sostenibilità ambientale.

I punti critici per la sostenibilità sono:

- a) lo sgretolamento del calcestruzzo e la corrosione dei ferri d'armatura;
- b) la bassa resistenza termica del materiale e la formazione dei ponti termici;
- c) l'uso di scarti, rifiuti e sostanze chimiche nella fase di cottura delle materie prime per la produzione del cemento.

Ai punti critici si pone rimedio con la serie dei provvedimenti descritti nei paragrafi precedenti, che di massima sono:

- 1) zincatura dei ferri;
- 2) correzione dei ponti termici in prossimità degli elementi strutturali in calcestruzzo armato;
- 3) uso quantitativamente **limitato** degli scarti e dei rifiuti con lo scopo di accentuare l'impatto ambientale positivo senza giungere al decremento della resistenza del materiale stesso e al rilascio di sostanze inquinanti.

Appare evidente – in un'ottica di razionalità dell'intervento – che l'uso del cemento armato non deve essere inteso come un fatto ineluttabile, ma deve esser visto come una scelta modulabile in funzione delle caratteristiche dell'obiettivo, ovvero in funzione delle caratteristiche dell'edificio in progetto. Di massima, per «piccoli» edifici ad uso abitativo (da uno a tre piani) è anche possibile l'uso della **muratura portante**, la quale – in zona sismica – dovrà esser legata con cordoli e ferri allo scopo di ottenere un funzionamento monolitico, come un oggetto tridimensionale o scatolare.

Non solo, per edifici ancor più piccoli e per uno scopo di tipo strumentale (soprattutto in ambito agricolo), è anche possibile l'uso della **terra cruda**, ovvero l'uso del mattone (con inserti in paglia o materiale vegetale) cotto al sole o stagionato.

È chiaro che, sia la terra cotta (il laterizio) che la terra cruda sono materiali molto più sostenibili del calcestruzzo armato, nondimeno – nel caso di edifici complessi e grandi – è sempre più

opportuno (ed economico) l'uso di quest'ultimo, il quale, del resto, è comunque insostituibile nelle strutture orizzontali (solai e coperture) dove è presente la sollecitazione di flessione.

Invero – in tema di orizzontamenti – si potrebbero usare altri materiali: il ferro ed il legno. Mentre il ferro da costruzione – soggetto al rischio della corrosione e poco sostenibile – è razionalmente impiegato per le strutture a funzionamento dinamico (ponti, grattacieli, ecc.), il legno è un materiale decisamente sostenibile e coerente al modello della bioedilizia.

In sintesi, se in strutture complesse (soprattutto in zona sismica) pare opportuno l'uso del calcestruzzo armato (con i provvedimenti di incremento della sostenibilità come la zincatura dei ferri, la correzione dei ponti, ecc.), in altre situazioni pare più razionale l'uso della muratura portante in laterizio (terra cotta) oppure in terra cruda.

È evidente che – nonostante la scelta di una tendenza costruttiva (muratura portante, calcestruzzo armato, ecc.) – la pratica di cantiere condurrà verso sistemi misti, vuoi per la presenza degli orizzontamenti che andranno sempre fatti con travi e travetti in calcestruzzo armato, vuoi per i tamponamenti che, liberi dalla funzione strutturale, possono anche esser fatti in terra cruda.

È invece da escludere o da valutare con molta attenzione – per il rischio Radon (gas a bassa attività radioattiva) – l'uso della pietra da costruzione, la quale è da porre sotto controllo sia per il tipo di minerale che per la provenienza.

3.3.7. *La terra cruda*

L'edilizia in terra cruda ha una storia millenaria che inizia – con ogni probabilità – nel periodo neolitico (circa 8.000 a.C.). Di fatto le prime costruzioni furono in legno, pietra e terra.

Attualmente, circa il 40% della popolazione mondiale vive in case di terra cruda. Di fatto è un materiale reperibile localmente, lavorabile con facilità e riciclabile. È un materiale sostenibile.

Dal punto di vista del comportamento dinamico delle strutture in terra cruda (a seguito di sollecitazioni sismiche) si nota che circa il 60% delle costruzioni è realizzato in zone ad alta sismicità. In concreto, le azioni sismiche – nei casi di forte sollecitazione – possono deformare le strutture senza portarle al collasso. Fatta eccezione per gli edifici che si trovano in prossimità dell'epicentro.

La terra cruda – come materiale da costruzione – ha le seguenti caratteristiche:

- è un materiale di facile reperimento (in sostanza è un materiale locale, vale a dire a «chilometri zero»);
- è facilmente lavorabile ed è caratterizzato da una semplice messa in opera;
- ha una bassa conducibilità termica;
- è un materiale a tossicità zero e completamente recuperabile.

La terra cruda si estrae dallo strato **sottostante** lo strato arabile. Lo strato superficiale è inutilizzabile per la presenza di sostanze organiche inquinanti e putrescibili e per la bassa resistenza meccanica. La terra è composta da argilla, limo, sabbia e ghiaia. L'argilla – nei manufatti in terra cruda – svolge il ruolo di legante dei materiali inerti (sabbia e ghiaia).

Le principali tecniche costruttive sono:

- **mattone crudo (adobe)**: è un sistema in muratura, dove il muro è fatto di mattoni crudi, ovvero di mattoni realizzati con un impasto di terra – paglia e stabilizzanti naturali – essiccato al sole;
- **pisé**: è un sistema che si basa sulla colata e compattazione della terra nelle casseforme di legno;

- **torchis**: è un sistema dove la funzione strutturale è data da griglie di legno e dove la terra svolge la funzione di riempimento/tamponamento;
- **bauge**: è un sistema in muratura con blocchi irregolari.

- Il **mattoncino crudo (adobe)** – che è un miscuglio di terra e paglia e stabilizzanti (naturali) – è realizzato utilizzando una forma di legno. Il processo, di massima, è il seguente:
 - bagnare la forma per renderla antiaderente ed evitare l'incollaggio della terra;
 - mescolare terra ed acqua fino ad ottenere una palla di materiale plastico;
 - riempire la forma con il materiale plastico, livellare e girare per togliere il mattone;
 - essiccare il mattone per un periodo adeguato (ad esempio una settimana) girandolo periodicamente.

- La tecnica del **pisé** (o della terra battuta) consiste nella battitura/compattazione di terra umida all'interno di casseforme di legno (o casseri). La massa di terra può essere rinforzata (e alleggerita) con paglia, erba secca, ecc.. Il muro in pisé è realizzato a strati battendo la terra con strumenti in legno con lo scopo di renderla compatta e di favorirne l'essiccazione. Dopo l'indurimento si sposta la cassaforma fino ad ottenere (per fasi successive) il muro finito.

- Il **torchis** è un sistema costruttivo che utilizza due diversi materiali da costruzione: il legno e la terra. Il legno (a telaio, a graticcio, griglia, ecc.) svolge sia la funzione strutturale che la funzione di armatura che raccoglie il tamponamento di terra. Nel caso strutturale il legno è sovente a vista (orditura principale), diversamente, nel caso di griglia, armatura, ecc., il legno è nascosto nella massa di terra (orditura secondaria). L'impasto è utilizzato allo stato plastico e viene inserito manualmente (a pressione) nell'orditura secondaria della struttura lignea. Il legno – che è un materiale elastico – dà resistenza alle azioni orizzontali e verticali di flessione. Talvolta, legato all'orditura secondaria, vi si inserisce un cannicciato con lo scopo di aumentare la resistenza meccanica, quella termica e per dare una maggiore facilità di collegamento della terra sull'armatura.
- La tecnica del **bauge** usa un impasto grasso (ricco di limo e argilla) rinforzato con fibre vegetali e paglia a consistenza plastica. L'impasto è lavorato a terra, quindi – dopo circa un giorno di riposo – viene tagliato con la vanga e posto in opera per realizzare murature in blocchi (irregolari) dello spessore di almeno 50 cm.

Il muro – ancora fresco – viene regolarizzato utilizzando una vanga e viene rigato con un rastrello con lo scopo di favorire il collegamento con l'intonaco. A differenza della tecnica del pisé – essendo l'impasto più consistente – non vengono utilizzate casseforme. In Abruzzo (Italia) – la tecnica del **bauge** ha una variante denominata **massone**, che consiste nel modellare i blocchi con una forma approssimativamente cilindrica e nel porli in opera per la formazione del muro.

Le costruzioni in terra cruda si realizzano con due distinte modalità:

- la **posa umida**, dove la terra è modellata direttamente durante la messa in opera;
- la **posa a secco**, fatta con mattoni prefabbricati ed essiccati. In questo caso si riducono i tempi di messa in opera, la quale può esser fatta anche in stagioni fredde. Infine, i mattoni

crudi – in fase di produzione – richiedono circa il 15% di energia rispetto alla produzione dei mattoni cotti e sono completamente riciclabili.

↘ *Essiccazione e ritiro*

L'adobe (o mattone in terra cruda) una volta formato a mano – o con l'uso di uno stampo – viene posto ad essiccare in spazi all'aperto e soleggiati oppure in ambienti interni con le dovute caratteristiche di temperatura, ventilazione ed umidità.

Durante la fase di essiccazione – dove il mattone prende la propria consistenza strutturale – si ha la fase del ritiro (riduzione del volume per perdita di acqua), la quale – onde evitare la formazione di stati di tensione o cricche o rotture – deve essere assolutamente omogenea. Il ritiro omogeneo è avvantaggiato dalla presenza nell'impasto di paglia o fibre naturali.

L'essiccazione (o perdita d'acqua) si realizza dall'esterno verso l'interno ed è favorita da una temperatura elevata, una buona ventilazione ed una scarsa umidità ambientale. L'acqua della superficie esterna evapora verso l'aria circostante e viene sostituita (per capillarità) dall'acqua interna. Il tutto fino all'essiccamento dell'intero volume del mattone.

Dal punto di vista qualitativo il ritiro dipende dalla quantità d'acqua dell'impasto iniziale e dalla eventuale presenza di additivi come calce o cemento. Un quantità d'acqua eccessiva determina una maggiore riduzione del volume (maggiore ritiro), viceversa gli additivi stabilizzano le dimensioni del mattone, ovvero riducono il ritiro.

Dal punto di vista quantitativo il ritiro varia nell'intervallo $0,5\div 20\%$.

↘ *Porosità e peso specifico*

Quanto maggiore è l'acqua utilizzata nella fase di impasto tanto maggiore sarà la porosità del mattone essiccato. Il peso specifico sarà minore a fronte di una maggiore porosità e in presenza di materiali d'impasto leggeri come paglia, fibre, pomice, ecc..

Il peso specifico è contenuto nell'intervallo $1,5\div 1,9\text{ g/cm}^3$.

↘ *Resistenza a compressione*

Il funzionamento statico degli edifici in terra cruda è solamente a compressione. I muri portanti hanno una capacità che dipende dal tenore iniziale dell'acqua d'impasto. Maggiore è la quantità iniziale di acqua d'impasto, maggiore sarà la porosità e minore la resistenza a compressione.

I muri portanti – in sola terra cruda – devono avere uno spessore minimo di 40 cm e potranno interessare edifici ad un piano fuori terra. Per edifici a maggiore elevazione la struttura portante dovrà includere materiali a maggiore resistenza.

La resistenza a compressione dei mattoni essiccati vale $1\div 3\text{ MPa}$.

Una digressione sulle unità di misura. Il Pascal (Pa) rappresenta l'unità di misura della pressione nel sistema internazionale e vale 1 N/m^2 , ovvero (in modo approssimato) $\approx 0,1\text{ kg/m}^2 = 0,00001\text{ kg/cm}^2$.

Pertanto – in via approssimata – la resistenza a compressione del mattone in terra cruda varia nell'intervallo $10\div 30\text{ kg/cm}^2$.

↘ *Il dilavamento delle acque meteoriche*

Il comportamento idraulico dell'edificio in terra cruda (ovvero lo smaltimento delle acque meteoriche) deve essere studiato con dettaglio, onde evitare il dilavamento della superficie

esterna dei muri portanti e la relativa riduzione della resistenza meccanica dei singoli mattoni e della stabilità dell'intero muro.

✎ **La conducibilità termica**

La struttura porosa del mattone (ossia la presenza di aria interna) determina una ridotta conducibilità termica, che in via quantitativa varia nell'intervallo $0,8 \div 0,9$ W/mK (mattone in ambiente secco). In caso di ambiente umido (ovvero di mattone bagnato) la conducibilità termica tende a raddoppiare. In sintesi la terra non ha uno specifico comportamento isolante se non in virtù della porosità del mattone. Pertanto, volendo incrementare il comportamento termoisolante, si può aggiungere – all'involucro in terra – un paramento esterno composto da due ulteriori strati: cannicciata e legno mineralizzato (o sughero, lana, ecc.).

✎ **Il degrado delle strutture in terra cruda**

Dipende essenzialmente dalla quantità d'acqua assorbita durante il ciclo di vita del materiale in opera. L'acqua determina un veloce degrado. Pertanto, una volta presi i provvedimenti contro le acque meteoriche, bisognerebbe utilizzare degli impasti adeguati all'umidità, piovosità e clima del luogo di costruzione.

La permeabilità all'acqua (di un dato materiale o manufatto) è valutata mediante la velocità di penetrazione della medesima nel manufatto stesso ed ha le unità di misura in cm/s.

Tenuto presente che la terra d'impasto – in funzione della granulometria – è composta da argilla, limo, sabbia e ghiaia, abbiamo la seguente tabella 3.1, dove viene data la velocità di penetrazione dell'acqua nei vari substrati.

Tabella 3.1. *Permeabilità all'acqua dei componenti d'impasto*

Materiale	Diametro medio delle particelle	Permeabilità all'acqua (cm/s)
Ghiaia	> 2 mm	1
Sabbia grossa	$0,6 \div 2$ mm	$0,1 \div 1$
Sabbia media	$0,2 \div 0,6$ mm	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Sabbia fine	$60 \div 200$ μ m	$10^{-4} \div 10^{-3}$
Limo	$3 \div 60$ μ m	$10^{-5} \div 10^{-4}$
Argilla	< 3 μ m	< 10^{-6}

Analizzando la precedente tabella notiamo che l'argilla e il limo sono molto meno permeabili della ghiaia e sabbia, infatti – per l'argilla e il limo – abbiamo una velocità di penetrazione dell'acqua molto minore. Al limite il comportamento dell'argilla è praticamente impermeabile.

Risulta pertanto evidente che un mattone con alto contenuto d'argilla è maggiormente adeguato ad ambienti piovosi e con un alto contenuto di umidità.

3.3.8. Il legno da costruzione

Il legno è un materiale di origine biologica. Disponibile in natura sotto forma di tronchi risultanti dal taglio dei boschi. Il legno – rispetto ai mattoni in terra cruda o cotta – ha un insieme di proprietà che lo rendono resistente allo sforzo di flessione e quindi utile negli schemi

strutturali dove, oltre alla tensione di compressione (supportata dai mattoni) si debba mettere in conto la tensione di trazione (ad esempio nelle travi e orizzontamenti in genere).

Il tronco di legno – in sezione – è caratterizzato da una zona esterna (corticale) e da una zona interna (o legno propriamente detto).

La zona corticale è suddivisa in strati relativamente sottili che dall'esterno all'interno sono denominati:

- 1) corteccia;
- 2) libro;
- 3) cambio.

Mentre la zona interna, che è relativamente più spessa, è costituita – andando verso il centro – dai seguenti strati:

- 1) alburno;
- 2) durame;
- 3) midollo.

Il legno strutturale è tagliato soprattutto negli strati alburno e durame. La resistenza meccanica (e qualità) del legno strutturale dipende dal punto di taglio. Il durame è il legno a più alta resistenza meccanica.

↘ *Comportamento anisotropo*

Il tronco ha una dimensione prevalente ed un comportamento strutturale anisotropo. In parole diverse, la resistenza meccanica (a trazione) longitudinale – ossia secondo le fibre del tronco – è maggiore della resistenza (a trazione) trasversale, ovvero normalmente alle fibre del tronco.

↘ *Comportamento viscoso*

Il comportamento strutturale del legno è di tipo viscoso. In parole diverse, il legno – nel tempo e durante l'esercizio in opera – tende ad aumentare il proprio stato di deformazione e a ridurre gli stati coattivi.

↘ *Comportamento termo-igrometrico*

Il legno è sensibile alle variazioni termiche e di umidità ambientale che possono produrre il processo della viscosità, causare fessurazioni e deformazioni da ritiro.

↘ *Degrado biologico*

La sensibilità alle condizioni termo-igrometriche può generare un degrado biologico che consiste nell'attacco di funghi ed insetti xilofagi (che consumano e indeboliscono la struttura del legno).

L'insediarsi e il diffondersi di tali agenti è legato a due fattori:

- 1) la predisposizione della specie legnosa ad ospitare i vari xilofagi;
- 2) l'esposizione a condizioni ambientali che possono favorire gli agenti stessi (umidità e temperatura elevata).

Il degrado che dipende dai funghi è visibile dal mutamento cromatico (il legno che diventa scuro) e dal mutamento della tessitura della superficie del legno (la formazione di fessure). Diversamente, il degrado dovuto agli insetti xilofagi è individuabile dalla presenza di escrementi superficiali, fori, gallerie, ecc..

➤ **Componenti strutturali**

Il legno è presente nelle strutture sotto forma di travi (ottenute da tronchi scortecciati e rifilati), travetti (ottenuti dal taglio longitudinali dei tronchi) e tavole. Le travi e i travetti (che sono essenzialmente strutture mono-dimensionali) svolgono le seguenti funzioni:

- 1) resistenza agli sforzi di taglio e flessione (nelle travi);
- 2) resistenza allo sforzo composto di pressoflessione (nei pilastri, puntoni, ecc.);
- 3) resistenza allo sforzo di trazione (nei tiranti).

In sintesi, la varietà nel comportamento strutturale del legno – dovuta alla capacità di resistere agli sforzi di taglio, trazione e compressione, – si integra con quei materiali (pietra, terra cruda, cotta, ecc.) che in pratica rispondono al solo sforzo di compressione.

In sintesi il legno è un materiale da costruzione rinnovabile, riciclabile e biodegradabile, costituito principalmente da cellulosa, emicellulosa e lignina. Il legno – storicamente impiegato per scopi strutturali e decorativi – è un materiale naturale di facile lavorabilità, con buone caratteristiche di durata e resistenza meccanica ed è un ottimo isolante termico ed acustico.

La sostenibilità del taglio del legno è data dalla selezione dei boschi di provenienza, che dovranno essere gestiti secondo principi colturali che ne assicurano il rinnovo. È opportuno dare la priorità – sempre per ragioni di sostenibilità – al legno locale.

I principali impieghi nell'edilizia sostenibile sono:

- strutture primarie e secondarie di copertura, solai e orizzontamenti in genere (abete, larice, *douglas*, pino, quercia, castagno, ecc.);
- pareti e strutture verticali d'involucro (abete, larice, *douglas*, pino, quercia, castagno, ecc.);
- rivestimento di pavimenti (abete, faggio, larice, rovere, frassino, pino, acero, ecc.)
- rivestimento interno di pareti e controsoffitti (ciliegio, frassino, abete, acero, ontano, pino, faggio, pioppo, ecc.)
- arredamento d'interni e finiture in genere;
- infissi (abete, larice, pino, ecc.).

Dal punto di vista dell'impiego in cantiere il legno da costruzione si suddivide nelle seguenti grandi tipologie:

- 1) legno massello;
- 2) legno lamellare;
- 3) pannelli a base di legno.

Il **legno massello** (o massiccio) è impiegato per coperture e solai (orizzontamenti in genere) ed è una delle soluzioni tecniche migliori sul piano della sostenibilità. Il legno massello dovrebbe esser messo in opera stagionato (umidità inferiore a circa il 20%). Talvolta viene posto in opera fresco (umidità superiore a circa il 30%). In ogni caso – durante il periodo di adattamento all'umidità di esercizio – il materiale diventa sovente suscettibile alle variazioni dimensionali e all'attacco dei funghi, senza che ciò debba costituire necessariamente un processo di degrado. Infatti, i manufatti in legno della storia dell'edilizia, pur realizzati con legno fresco e stagionato, hanno sempre dimostrato una notevole durabilità, anche a fronte dell'attacco dei funghi, ecc.. Tutto per l'indiscusso merito dei carpentieri dell'epoca, che avevano trovato la regola dell'arte per giungere allo scopo di minimizzare le deformazioni eccessive e al contempo evitare l'inizio

del processo di degrado. Oggi, l'attuale carpenteria si è arricchita di utensili a controllo numerico e di ferramenta affidabili, rendendo più facile l'esecuzione di unioni che prevengono il ristagno di umidità e che tollerano le variazioni dimensionali. Infine – con le tecnologie d'unione mediante viti, chiodi, bulloni, piastre, ecc. – anche strutture complesse e di grande dimensione possono essere realizzate con legno massiccio.

Il **legno lamellare** è realizzato con lamelle (di legno) sovrapposte e incollate a fibre parallele. È un materiale per strutture complesse di medie e grandi dimensioni. Non è propriamente sostenibile per l'impiego di colle di tipo artificiale (fenolresorcina, colle melaminiche, poliuretatiche, ecc.). Le tipologie d'uso ricorrenti sono di tipo strutturale: travi, pilastri, strutture reticolari, ecc..

I **pannelli a base di legno** sono realizzati con trucioli (di legno) incollati. È un materiale che si usa nei controventamenti, irrigidimenti e tamponamenti. Anche in questo caso si tratta di un materiale scarsamente sostenibile per la presenza di colle artificiali nell'impasto a base di legno.

✎ *Elementi prefabbricati in legno*

Sono costituiti da moduli prefabbricati in legno massello, in legno lamellare o con pannelli a base di legno. Sono elementi sostenibili quando lo sono i componenti. In altre parole, gli elementi prefabbricati con componenti in legno massello congiunti mediante chiodatura, bullonatura, ecc., sono elementi sostenibili, diversamente, con altri componenti (legno lamellare e pannelli a base di legno) o con l'unione mediante incollaggio risultano scarsamente sostenibili per la presenza di colle artificiali.

3.3.9. Sistemi d'involucro compositi (e sostenibili)

Un sistema completamente in terra cruda presenta – in tema d'involucro – delle limitazioni in termini di elevazione della struttura e di durabilità. Un sistema d'involucro composito, costituito da due materiali che collaborano reciprocamente – laddove è carente il primo interviene il secondo e viceversa – potrebbe essere la soluzione ottimale sia in termini di resistenza e durabilità che in termini di sostenibilità.

Una combinazione storicamente provata – ma, nonostante tutto, innovativa e portatrice di possibili invenzioni riguardo l'involucro – è quella data dalla terra cruda (con funzione di chiusura) e dal legno (in ottica strutturale/resistente).

Per quanto riguarda il tema della sostenibilità è evidente che l'involucro composito essendo costituito da due materiali altamente sostenibili è altrettanto sostenibile, non solo – per quanto detto in precedenza – tutti gli elementi sollecitati a compressione possono essere di terra cruda, diversamente gli elementi sollecitati a trazione dovranno essere di legno.

Un modello costruttivo del genere incentiva l'autocostruzione e quindi aggiunge ulteriore valore alla sostenibilità.

3.3.10. Il laterizio (o terra cotta)

Il laterizio (o terracotta) consiste in un impasto di argilla, sabbia e acqua, essiccato e cotto. Si differenzia dalla terra cruda per la fase di cottura in forno.

Il laterizio viene prodotto con diverse forme e per diverse funzioni. Il laterizio con funzione strutturale è pieno ed è modulare. Il modulo (mattoncino pieno) ha le dimensioni – ormai piuttosto consuete – di 5,5×12×25 cm. Il laterizio con funzione di chiusura è alleggerito (mattoncino forato) ed ha le dimensioni di uno o più moduli. Il limite alle dimensioni geometriche di un mattoncino

(pieno o forato) è dato dal peso del mattone stesso che non deve superare – per ragioni di maneggevolezza – i 3 kg.

Dal punto di vista tecnologico il mattone in terra cotta presenta delle buone proprietà meccaniche ed è stabile – a differenza del mattone in terra cruda – all'azione degli agenti atmosferici.

▷ *Argilla*

È il componente fondamentale del mattone in terra cotta. L'argilla si presenta come massa terrosa, friabile con colore tendente al grigio (per la presenza di sostanze organiche) o al rosso (per la presenza di ossidi di ferro) e con impurezze come silice, silicati, carbonati di calcio e magnesio, solfuri di ferro, gesso, ecc.. L'argilla si distingue dalle altre terre (cosiddette sabbiose) per la **plasticità**, che consiste nel fornire – quando mescolata con acqua – un impasto facilmente modellabile che conserva la forma anche dopo il successivo essiccamento e la cottura.

▷ *Classificazione del terreno*

Il terreno può essere suddiviso in sottoclassi in funzione della granulometria delle particelle che lo compongono. Una classificazione è la seguente:

- **sabbia**: composta da elementi di roccia lapidea con grani di diametro da 4 mm a 75 micron. Non ha un comportamento plastico per mancanza di coesione tra i grani (ovvero non è modellabile) e può essere compattata. Non è sensibile al gelo ed è permeabile all'acqua;
- **limo**: composto da particelle di diametro da 75 micron a 2 micron. È una frazione molto fine della terra che non ha (come la sabbia) un comportamento plastico. È poco permeabile all'acqua;
- **argilla**: composta da particelle di diametro inferiore a 2 micron. Con un determinato contenuto d'acqua assume un comportamento plastico e – una volta essiccata – acquisisce resistenza meccanica. Le particelle sono fortemente coese e la coesione aumenta al diminuire del contenuto d'acqua. È praticamente impermeabile.

Dalla classificazione risulta evidente che la terra – adatta al confezionamento di un mattone in terra cotta di qualità elevata – è quella con un alto contenuto di argilla. Pertanto, l'estrazione della terra andrà fatta in cave con elevato contenuto della frazione di argilla.

Diversamente si dovrà dire per il mattone in terra cruda, in quanto – anche se il contenuto elevato d'argilla ottimizza la resistenza meccanica e la resistenza all'azione delle acque meteoriche – il carattere fondamentale per la scelta della zona di estrazione sarà la vicinanza al cantiere.

▷ *Ciclo di produzione*

Il ciclo di produzione dei laterizi (di massima) è il seguente:

- **estrazione della terra argillosa dalla cava**: si realizza con escavatrici meccaniche in cave che presentano terre con un alto contenuto di argilla;
- **stagionatura (ibernazione ed estivazione)**: le zolle estratte (possibilmente nel periodo autunnale) vengono stagionate all'aperto, ovvero subiscono il naturale processo dell'ibernazione (azione del gelo e disgelo del periodo invernale) e dell'estivazione (azione del sole e della pioggia del periodo estivo). Il tutto per ottenere una terra più sciolta, maggiormente plastica e di più facile lavorabilità;
- **omogeneizzazione mediante lavaggio, decantazione e galleggiamento**: l'argilla stagionata viene omogeneizzata (quando destinata a prodotti più fini) mediante il lavaggio, che

consiste nello spappolamento in vasche con molta acqua e nella separazione per decantazione della pasta argillosa fluida dalle impurezze (sabbia, ciottoli, ecc.) e per galleggiamento della pasta stessa dai pezzi di legno, radici, ecc.;

- **omogeneizzazione meccanica:** è sempre presente e si realizza con macine, molini a palle o con disintegratori, sia su argilla secca che su argilla bagnata;
- **correzione dell'impasto:** qualche volta si usano delle speciali impastatrici (o tagliatrici) per correggere la plasticità dell'argilla. Infatti, le argille – per la produzione dei laterizi – possono essere o troppo grasse o troppo magre. Le prime formano una pasta fine, tenace, ricca d'acqua; che durante l'essiccamento e la cottura si contrae in modo eccessivo deformandosi e screpolandosi. Le seconde (troppo sabbiose) danno dopo cottura dei materiali molto porosi, fragili e poco resistenti. La correzione delle terre grasse avviene con l'aggiunta di sabbia silicea, al contrario, le terre magre, si tagliano aggiungendo e mescolando terra grassa;
- **modellazione del mattone:** la pasta preparata viene modellata per configurarla nella forma e dimensioni volute. La lavorazione a macchina, con pasta molle, può essere compiuta con macchine (mattoniere) a **filiera** o a **stampo**. Nelle prime (usate per pezzi a sezione trasversale costante: mattoni, tavelloni forati, ecc.) la massa plastica viene forzata attraverso un'appropriata filiera da cui esce sotto forma di un pastone continuo che viene tagliato – per mezzo di un filo d'acciaio – in pezzi della lunghezza voluta. Nelle seconde (usate per pezzi a sezione variabile: tegole marsigliesi, ecc.) la massa plastica viene compressa fra due stampi. Il metodo di lavorazione ha influenza sul successivo ritiro: i materiali formati in filiera hanno un ritiro maggiore di quello dei materiali formati a stampo. Con la modellazione in filiera si ottengono superfici lisce e inadeguate all'adesione della malta, per cui si rimedia o cospargendo di sabbia il pastone in uscita dalla filiera stessa, oppure dentellando il profilo di quest'ultima onde ottenere un pastone ricoperto di sottili scanalature. Per avere manufatti compatti e resistenti (ad esempio mattonelle di pavimentazione) la modellazione si fa per stampaggio con forte compressione (usando delle presse) su un impasto quasi asciutto;
- **essiccazione:** dopo la formatura i manufatti devono essere lasciati essiccare per semplice esposizione all'aria libera (nei processi di tipo artigianale), sotto tettoie e per tempi relativamente lunghi; oppure (nei processi di tipo industriale) negli essiccatoi alimentati con aria calda recuperata dal forno di cottura o prodotta da una apposita sorgente di calore. L'essiccazione è un'operazione fondamentale, se troppo rapida porta a distorsioni, cricche e rottura dei manufatti;
- **cottura:** la temperatura di cottura dei laterizi varia da 900 a 1200 °C. La cottura viene fatta in forni a funzionamento continuo con recupero di calore: l'aria fresca di combustione viene preriscaldata a spese del calore posseduto dai mattoni già cotti (ed in fase di raffreddamento), mentre i prodotti di combustione (fumi, vapori, ecc.) vengono utilizzati per preriscaldare i mattoni ancora da cuocere. I tipi di forno più usati sono:
 - a) la fornace Hoffmann;
 - b) il forno a tunnel.
- La fornace Hoffmann è a fuoco mobile, nel senso che la zona di combustione si sposta da una camera all'altra del forno, man mano che la cottura procede, mentre la carica di materiale resta ferma. I forni a tunnel sono caratterizzati da una lunga galleria riverberante il

calore sul materiale; in questo caso il materiale si muove trasportato da carrelli su rotaia o da nastri continui. Dopo la cottura i mattoni sono pronti per l'imbballaggio.

✎ *Classificazione dei laterizi secondo la foratura*

I laterizi si possono classificare in funzione della foratura.

Per foratura (F) si intende il rapporto percentuale tra la somma delle aree dei fori e l'area (vuoto per pieno) ortogonale alla direzione dei medesimi.

La foratura – F – svolge la funzione di alleggerimento del mattone (o blocco) e di incremento delle proprietà termoisolanti del laterizio.

In sintesi, dal punto di vista della **foratura** abbiamo le seguenti categorie:

- **laterizi pieni**: mattoni e blocchi pieni con $F \leq 15\%$;
- **laterizi semipieni tipo A**: mattoni e blocchi semipieni con $15\% < F \leq 45\%$;
- **laterizi semipieni tipo B**: mattoni e blocchi semipieni con $45\% < F \leq 55\%$;
- **laterizi forati**: mattoni e blocchi forati con $55\% < F$.

Per quanto riguarda il **peso specifico**, per le varie classi, abbiamo:

- laterizi **pieni**: 1300÷1800 kg/m³;
- laterizi **semipieni**: 800÷1000 kg/m³;
- laterizi **forati**: 600÷800 kg/m³.

✎ *Il mattone unificato (o mattone UNI) o modulo*

È definito di massima da una consuetudine millenaria ed in modo rigoroso dalla UNI 8942:1986.

Le dimensioni sono:

- spessore: 5,5 cm;
- larghezza: 12 cm;
- lunghezza: 25 cm.

Nel caso di laterizi semipieni e forati – data la loro leggerezza – si producono i **blocchi di laterizio** che sono un multiplo del modulo rappresentato dal mattone UNI.

✎ *Classificazione dei laterizi secondo la tecnica di produzione*

I laterizi si possono suddividere in funzione del metodo di produzione:

- **estrusi**: ottenuti mediante il passaggio in pressione della massa di argilla attraverso una filiera della stessa sezione del laterizio;
- **pressati**: ottenuti per pressatura in appositi stampi;
- **formati a mano**: ottenuti mediante lavorazioni manuali, sia in ambito puramente artigianale, sia in ambito industriale per rispondere a particolari esigenze geometriche.

✎ *Ergonomia del mattone*

Le misure del mattone nel tempo sono state pressoché costanti. Pur tuttavia, in diverse regioni geografiche, si riscontravano piccole variazioni dovute a processi artigianali differenti e scarsamente unificati. In ogni caso – il vincolo fondamentale per un mattone all'incirca costante – è sempre stato l'approccio ergonomico nella fase di messa in opera del mattone stesso. Infatti, nonostante le piccole variazioni dimensionali non si ha riscontro di mattoni con larghezza maggiore di 14cm, in quanto era fatto (il mattone) per esser preso con una sola mano e posto in opera,

e questo, fino a tale larghezza, era possibile per la totalità dei mutatori. Inoltre, sempre per l'uso di una sola mano, il peso non doveva superare i 3 kg.

✎ *Laterizi semipieni alleggeriti in pasta*

Sono una tipologia speciale (laterizi alleggeriti) con funzione di chiusura e con un buon livello di resistenza termica. Sono anche denominati laterizi alveolati (o isolanti). Dal punto di vista della classificazione fanno parte della classe dei laterizi semipieni, con percentuale di foratura compresa nell'intervallo 15÷45% (tipo A) e 45÷55% (tipo B).

Per il peso specifico abbiamo:

laterizi semipieni alleggeriti in pasta **tipo A**: $\approx 800 \text{ kg/m}^3$;

laterizi semipieni alleggeriti in pasta **tipo B**: $650\div 800 \text{ kg/m}^3$.

Hanno un buon livello di isolamento termico e la sostenibilità dipende dal materiale usato per l'alleggerimento. In pratica si usano materiali come il polistirene espanso, la sansa di olive, i trucioli di legno, i granuli di perlite, ecc..

Nel caso del polistirene espanso – nonostante il livello d'isolamento termico ottenuto – il ciclo del laterizio diventa scarsamente sostenibile, diversamente, con i materiali di recupero indicati il ciclo diventa sostenibile. Sovente – per aumentare il livello d'isolamento termico – oltre all'inserimento in pasta di materiali leggeri e isolanti, si realizza il riempimento dei fori con lana di roccia, perlite, legno mineralizzato, ecc.

Anche in questo caso il diverso livello di sostenibilità dipende dal materiale usato per il riempimento.

3.3.11. Comparazione tra mattoni in terra cruda e mattoni in terra cotta

Il comportamento di una muratura in terra cruda è differente dal comportamento di una muratura in terra cotta, sia dal punto di vista tecnologico che dal punto di vista strutturale.

La criticità dei mattoni in terra cruda è **l'insufficiente stabilità della forma in presenza d'acqua**, con il conseguente progressivo scioglimento e perdita della resistenza meccanica.

In letteratura – ad esempio cfr. [19] – esistono analisi comparative delle due murature che conducono ad un impiego differente (non succedaneo) delle due tecnologie.

Il processo di produzione dei mattoni (crudi o cotti) è di massima il seguente:

- 1) estrazione dei materiali d'impasto (pozzolana, sabbia, ecc.);
- 2) frantumazione, raffinazione e omogeneizzazione;
- 3) stagionatura;
- 4) formatura del mattone con uno stampo;
- 5) essiccazione;
- 6) maturazione al sole (per i mattoni in terra cruda) oppure cottura in forno (per i mattoni in terra cotta).

In sintesi – ammessa la condizione *ceteris paribus* per la quasi totalità del processo – le differenze di comportamento tecnologico e meccanico dipendono essenzialmente dalla fase di cottura in forno o cottura al sole.

L'indagine statica che segue (cfr. [19]) è condotta sulla prova di compressione e sulla prova di flessione. La prima è finalizzata alla valutazione del comportamento a compressione, la seconda del comportamento a trazione. L'indagine tecnologica è anche finalizzata alla valutazione del comportamento del materiale in presenza di acqua.

▾ *Valutazione del comportamento a compressione*

La prova di compressione è stata eseguita su un determinato numero di provini cilindrici estratti dai mattoni mediante carotaggio con corona diamantata. Le dimensioni dei provini (spianati e rettificati) sono:

- $d = 70$ mm;
- $h/d = 1$;

dove:

- d : diametro del provino;
- h : altezza del provino.

Per la prova a compressione è stata utilizzata una pressa da 20.000 kg. I valori medi – ottenuti dallo schiacciamento di cinque provini in terra cruda (estratti da cinque differenti mattoni crudi) e di cinque provini in terra cotta (estratti da altrettanti differenti mattoni cotti) – sono indicati nella seguente tabella 3.2.

Tabella 3.2. *Resistenza alla compressione (cfr. [19])*

Resistenza alla compressione (schiacciamento del provino)		
Mattone n.	Mattone crudo (kg/cm²)	Mattone cotto (kg/cm²)
1)	30,9	43,5
2)	19,2	35,7
3)	14,7	41,6
4)	23,7	67,1
5)	27,0	72,9
Valore medio:	23,1	52,2

▾ *Modello statico per la prova a trazione: trave inflessa semplicemente appoggiata*

Trave su due appoggi semplici d'interasse l caricata in mezzeria con un peso P . La trave ha sezione rettangolare con base B e altezza H . Il momento flettente massimo (kg×cm) è dato dalla seguente formula:

$$M_{\max} = \frac{Pl}{4} \quad [3.1]$$

dove:

- P : carico in mezzeria (kg);
- l : interasse tra gli appoggi (cm).

Il modulo di resistenza (cm³) – per sezione rettangolare – vale:

$$W = \frac{BH^2}{6} \quad [3.2]$$

dove:

- B : base della sezione rettangolare (cm);
- H : altezza della sezione rettangolare (cm).

Infine abbiamo il seguente sforzo di trazione nelle fibre sottostanti il mattone inflesso:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \quad [3.3]$$

▾ *Valutazione del comportamento a trazione*

La valutazione del comportamento in condizioni di trazione (stiramento) è fatta mediante la prova di flessione, con il mattone posato di piatto su due appoggi A e B (posti a distanza $l = 20$ cm) e caricato in mezzeria con un peso P (normale alla dimensione longitudinale del mattone) mediante una pressa da 500 kg.

La prova di sollecitazione a flessione – su cinque distinti mattoni crudi e cinque cotti – ha dato i valori di rottura espressi nella seguente tabella 3.3.

Tabella 3.3. *Carico di rottura (cfr. [19])*

Carico di rottura in mezzeria (mattone inflesso)		
Mattone n.	Mattone crudo (kg)	Mattone cotto (kg)
1)	16,3	22,2
2)	11,6	22,4
3)	14,0	26,3
4)	10,6	26,5
5)	9,2	20,7
Valore medio:	12,3	23,6

Applicando la formula 3.1 otteniamo – per ogni carico di rottura della tabella 3.3 – il momento flettente massimo che ha determinato la rottura dei mattoni.

Tabella 3.4. *Momento flettente di rottura (cfr. [19])*

Momento flettente (massimo) di rottura		
Mattone n.	Mattone crudo (kg×cm)	Mattone cotto (kg×cm)
1)	81,5	111,0
2)	58,0	112,0
3)	70,0	131,5
4)	53,0	132,5
5)	46,0	103,5
Valore medio:	61,7	118,1

La prova di flessione è stata realizzata con il mattone posizionato di piatto, pertanto il modulo di resistenza (cfr. formula 3.2) sarà caratterizzato – in un mattone con dimensioni unificate – da:

- $B = 12$ cm;
- $H = 5,5$ cm;

ed avrà il seguente valore:

$$W = \frac{12 \times 5,5^2}{6} = 60,5 \text{ cm}^3$$

Il modulo di resistenza calcolato è teorico, infatti a fine prova il modulo di resistenza reale dipende dal tipo di stiramento/deformazione subito dal mattone inflesso. In parole diverse, il valore del modulo dovrebbe essere quello derivante dalla misura della sezione a seguito dello stiramento a rottura. Nonostante ciò – stante l'intento comparativo delle due famiglie di mattoni – riteniamo corretto l'impiego del modulo calcolato, infatti:

- si applica il principio del *ceteris paribus* rispetto alle due popolazioni di mattoni;
- il valore calcolato, essendo maggiore del valore reale, definisce una tensione di rottura minore e quindi più cautelativa.

Tenuto conto di quanto premesso, abbiamo le seguenti tensioni di rottura per flessione (cfr. tabella 3.5) ovvero tensioni di rottura per stiramento (trazione).

Tabella 3.5. Resistenza allo sforzo di trazione

Resistenza alla trazione indiretta (prova di flessione)		
Mattone n.	Mattone crudo (kg/cm ²)	Mattone cotto (kg/cm ²)
1)	1,35	1,83
2)	0,96	1,85
3)	1,16	2,17
4)	0,88	2,19
5)	0,76	1,71
Valore medio:	1,02	1,95

▾ *Valutazione del comportamento meccanico*

In sintesi, il complessivo comportamento meccanico – dato dal comportamento nella fase di schiacciamento (compressione) e da quello nella fase di stiramento (trazione) – è rappresentato dal quadro sinottico della seguente tabella 3.6, dove (delle prove sopra descritte) si presentano i soli valori medi.

Tabella 3.6. Resistenza meccanica dei mattoni crudi e cotti

Resistenza meccanica di un mattone unificato		
	Mattone crudo (kg/cm ²)	Mattone cotto (kg/cm ²)
Resistenza alla compressione:	23,1	52,2
Resistenza alla trazione:	1,02	1,95

▾ *Valutazione del comportamento all'acqua*

È stata realizzata la prova in immersione. Per quanto riguarda il comportamento dei mattoni cotti non ci sono osservazioni da fare: il mattone è rimasto integro e l'acqua (come del resto è ovvio) non è variata di limpidezza.

Viceversa, per quanto riguarda il comportamento del mattone in terra cruda immerso in acqua, abbiamo le seguenti osservazioni:

- 1) dopo circa 20 minuti l'acqua ha dato i primi segni di intorpidimento;
- 2) dopo circa 4 ore il mattone ha perso la propria consistenza di forma e meccanica.

↘ *Sintesi comparativa tra mattoni in terra cruda e mattoni in terra cotta*

Dal punto di vista del comportamento a compressione (fenomeno dello schiacciamento) la resistenza del mattone crudo è circa la metà della resistenza del mattone cotto (cfr. tabella 3.6). In concreto, dal punto di vista strutturale, una capacità portante dimezzata significa un raddoppiamento dello spessore della struttura resistente, in altre parole, un muro d'involucro portante di circa 40 cm – fatto in mattoni cotti – diventa, se realizzato in mattoni crudi, un muro portante di circa 80 cm. In questo caso, l'equivalenza statica tra mattoni crudi e cotti si ottiene a scapito di una minore superficie utile (quella di calpestio).

Per il comportamento a trazione – dove lo stiramento è valutato indirettamente con una prova di flessione – la resistenza del mattone crudo è circa la metà di quella del mattone cotto (cfr. tabella 3.6). In concreto, la realizzazione di aggetti, cornicioni, ecc. – dove si richiede la resistenza a flessione – è un fatto critico nel caso d'impiego dei mattoni crudi, ossia è un fatto da valutare con la dovuta attenzione e con gli strumenti della statica.

Per quanto riguarda la prova d'immersione in acqua, se da un lato il mattone cotto non ha dato segni di degrado, d'altro lato il mattone crudo ha dato evidenti segni di cedimento perdendo la consistenza e la forma nel volgere di poche ore. In concreto, volendo impiegare il mattone crudo, si dovrà curare la sua protezione dall'umidità ambientale – con lo scopo di evitare di imbibire d'acqua i mattoni stessi – sia mediante un deflusso e allontanamento razionale delle acque meteoriche, sia mediante l'uso di intonaci idrorepellenti (e traspiranti).

Comunque, per quanto riguarda le strutture di fondazione, che sono continuamente in contatto con l'acqua presente sul piano di fondazione stesso – e sono soggette all'umidità di risalita – è più opportuno l'uso di mattoni cotti o di pietrame.

In conclusione, l'uso del mattone crudo, stante il suo alto livello di sostenibilità, – se modulato con opportuni provvedimenti – può essere impiegato (anche in edifici a due o tre piani fuori terra) con funzione di tamponamento di strutture realizzate con materiali altrettanto sostenibili come (ad esempio) il legno, il mattone cotto, ecc..

3.3.12. Materiali lapidei

Per rocce si intendono gli aggregati naturali di minerali. Le rocce eterogenee sono costituite da più minerali. Quelle omogenee da un solo minerale.

Applicazioni: in edilizia, dal punto di vista applicativo, i materiali lapidei sono passati da un impiego prevalentemente strutturale ad un impiego prevalentemente ornamentale.

Classificazione: se ne può fare una classificazione meramente merceologica (in base alla destinazione d'uso), ovvero una classificazione in funzione della genesi del materiale stesso.

Dal punto di vista dell'uso abbiamo i seguenti tipi:

- 1) marmo;
- 2) granito;
- 3) travertino;
- 4) pietra.

Dal punto di vista delle genesi abbiamo:

- **rocce eruttive (graniti, porfidi, ecc.):** si originano dalla solidificazione del magma. Si distinguono in rocce intrusive (interne alla superficie terrestre a solidificazione lenta e formate da grandi cristalli) e rocce estrusive (sulla superficie terrestre a solidificazione veloce e formate da microcristalli). Le rocce eruttive sono anche denominate magmatiche o ignee;
- **rocce sedimentarie (calcari, arenarie, travertini):** derivano dall'erosione delle rocce di superficie da parte degli agenti esogeni (acqua, vento e ghiaccio) e dal trasporto e accumulo (sedimentazione) dei materiali erosi;
- **rocce metamorfiche (marmi):** derivano dalla trasformazione (per azione meccanica, termica e chimica) di rocce preesistenti (magmatiche, sedimentarie, metamorfiche).

↘ *Tecnologie di estrazione e lavorazione*

Le rocce vengono estratte dalle cave che si classificano in cave a cielo aperto e cave sotterranee. Per l'estrazione si utilizzano le seguenti tecnologie di tipo ciclico: taglio con esplosivi; perforazione continua; taglio con l'azione di cunei meccanici o idraulici; taglio con agenti chimici espansivi; taglio con acqua ad alta pressione. Oppure le seguenti tecnologie di tipo continuo: filo diamantato (elicoidale); taglio con fiamma.

Il materiale estratto (blocchi di pietra) viene stivato all'ingresso della cava e successivamente trasportato negli stabilimenti di lavorazione.

Nello stabilimento di lavorazione i blocchi di pietra vengono trasformati in lastre di differente spessore. Si utilizza la macchina da taglio denominata telaio, costituita da un insieme di lame in acciaio poste ad una distanza pari allo spessore voluto. L'operazione di taglio di un blocco, a seconda del tipo di materiale, può durare ininterrottamente per più giorni.

↘ *Proprietà dei materiali lapidei*

Per il corretto impiego delle rocce se ne devono conoscere le proprietà fisiche e tecnologiche. È fondamentale – per l'impiego in ambiente esterno – la conoscenza della resistenza agli agenti atmosferici.

Le altre caratteristiche principali ai fini di un corretto impiego sono le seguenti:

- **Peso specifico:** di massima abbiamo i valori della seguente tabella dove – per confronto – abbiamo anche riportato il peso specifico del calcestruzzo armato;

Tabella 3.7. *Peso specifico di alcuni materiali lapidei*

Materiale	Peso specifico (kg/m³)
Calcestruzzo armato	2000÷2500
Pomici	< 1000
Tufi vulcanici, calcareniti	1000÷1500
Calcari teneri, arenarie porose, peperini, travertini	1500÷2500
Calcari compatti, dolomie, porfidi	2500÷3000
Basalti, graniti, anfiboliti	> 3000

- **Durezza superficiale:** è la resistenza alla deformazione permanente della superficie del materiale lapideo. Presenta due caratteri importanti: la facilità di misura e la correlazione con la resistenza meccanica. Infatti, tanto maggiore è la durezza di un determinato materiale, tanto maggiore sarà la resistenza meccanica del medesimo materiale. La valutazione della resistenza alla scalfittura è una valutazione indiretta della durezza (metodo di Mohs) e consiste nel graffiare la roccia con materiali più duri con lo scopo di valutare la profondità del graffio o la polvere prodotta. I principali metodi di misura sono:
 - a) metodo **Brinell:** valuta la larghezza d'impronta di una sferetta d'acciaio caricata contro la superficie della roccia;
 - b) metodo **Rockwell:** valuta la profondità d'impronta di un cono di diamante molto piccolo (e caricato) o di una sferetta d'acciaio altrettanto piccola (e caricata);
 - c) metodo **Vickers:** valuta la larghezza d'impronta di una piramide di diamante;
 - d) metodo **Knoop:** valuta le successive larghezze d'impronta di una piramide di diamante caricata in modo variabile. La valutazione è fatta mediante un microscopio e si parla di micro-durezza;
- **Resistenza all'usura per attrito:** è la resistenza che rappresenta l'attitudine delle rocce a resistere alle azioni di attrito meccanico che tendono ad asportare materia dalla superficie della roccia stessa. Di fatto si intende essenzialmente la capacità di resistenza all'usura per attrito radente. Questa caratteristica – che è proporzionale alla durezza superficiale – è determinante nella scelta delle piastrelle da pavimentazione. La misura della resistenza all'usura si realizza mediante una prova di abrasione. Il risultato è espresso dal coefficiente relativo di abrasione che corrisponde al rapporto tra la perdita di spessore di un materiale di riferimento (il granito di San Fedelino) con la perdita di spessore del materiale in prova;
- **Tenacità:** rappresenta la resistenza agli urti ed è il contrario della fragilità. Di fatto rappresenta la capacità di assorbire l'energia – mediante la deformazione elastica – in seguito ad un urto. Una pietra fragile (che non assorbe energia) non si deforma e si rompe. La misura della tenacità (inverso della fragilità) si realizza valutando la resistenza all'urto, che consiste nel determinare l'altezza h dalla quale far cadere una sfera di ghisa di peso $P = 1$ kg per spezzare una lastra di roccia di $20 \times 20 \times 3$ cm che poggia su un letto di sabbia. La resistenza all'urto (tenacità) viene espressa dal lavoro di rottura L pari a $L = P \times h$. I materiali lapidei a tenacità crescente si possono ordinare come segue: arenarie a cemento non siliceo; calcari compatti e marmi saccoroidi; arenarie a cemento siliceo; graniti; dioriti; porfidi; basalti;
- **Gelività:** rappresenta il processo di degrado di un materiale **poroso** in conseguenza delle sollecitazioni prodotte dalla solidificazione dell'acqua (contenuta nei pori) e dal conseguente aumento di volume. Di fatto una roccia geliva ha una scarsa durabilità in un ambiente umido dove tende a degradarsi rapidamente;
- **Durevolezza:** misura la capacità di resistere nel tempo senza subire degrado per effetto degli agenti atmosferici o per cause chimiche od organiche. L'azione chimica si manifesta in presenza di vapore d'acqua e anidride carbonica, che rendono solubile la roccia, mentre quella organica si realizza ad opera di organismi, ad esempio i licheni, che si insinuano nelle cricche della roccia stessa;

- **Aderenza alle malte:** è un fenomeno meccanico e chimico. Si realizza attraverso la penetrazione della malta all'interno della porosità superficiale (effetto incastro) e attraverso le reazioni chimiche tra i componenti la malta e i componenti la roccia che generano una saldatura tra le parti in contatto. È importante – per favorire l'aderenza – bagnare la superficie della roccia prima della posa della malta
- **Lucidabilità:** possibilità di rendere la superficie speculare attraverso successive operazioni di sfregamento. Tra le rocce più lucidabili abbiamo i calcari cristallini, diversamente le rocce più dure (come il granito) sono lucidabili con difficoltà e con un costo elevato.
- **Carichi di rottura:** per quanto riguarda il comportamento a rottura abbiamo i valori unitari della seguente tabella 3.8.

Tabella 3.8. Carichi di rottura di vari materiali lapidei (cfr. [21])

Materiale	Carico unitario di rottura			
	Trazione σ (kg/cm ²)	Compressione σ (kg/cm ²)	Flessione σ (kg/cm ²)	Taglio σ (kg/cm ²)
Graniti	35	1.600	150	90
Sieniti	–	1.450	–	–
Dioriti	–	1.800	–	–
Porfidi	60	1.900	190	120
Trachiti	35	1.500	85	–
Basalti	–	3.200	–	–
Tufi calcarei	–	80	–	–
Tufi vulcanici	8	70	6	–
Calcari	50	900	120	110
Dolomie	20	1.100	100	70
Travertini	–	450	–	–
Quarziti	–	2.850	450	–
Conglomerati: Breccie, Puddinghe	–	750	–	–
Arenarie	20	800	55	45
Marmi	40	1.100	140	115
Gneis	–	1.100	180	260
Serpentini	80	1.550	470	250

Dalla precedente tabella notiamo che i materiali lapidei hanno un'elevata resistenza a compressione ed una trascurabile resistenza a flessione, trazione e taglio. Per questa loro proprietà (soprattutto in passato) sono stati usati per strutture portanti che lavorano a compressione (muri, pilastri, archi, ecc.).

I materiali lapidei – ancorché sollecitati in modo rilevante – non si snervano, ma semplicemente, ad un certo punto, collassano. Pertanto, il coefficiente di sicurezza – per un calcolo di massima con le tensioni ammissibili – è dato dal rapporto tra la sollecitazione di rottura e quella ammissibile in esercizio e vale $10 \div 15$.

↳ *Impiego dei materiali lapidei*

Ormai vengono usati raramente in campo strutturale. Gli impieghi più diffusi sono:

- a) rivestimenti per esterni;
- b) rivestimenti per interni;
- c) tamponamenti di strutture a gabbia;
- d) pavimentazioni;
- e) scale.

– **Rivestimenti per esterni:** abbiamo due tipologie di rivestimento:

- a) per esterni su strutture in muratura;
- b) per esterni su strutture prefabbricate.

In ogni caso si tratta di lastre applicate su un supporto in muratura (ad esempio in laterizio) o su quello prefabbricato. Nel primo caso le lastre di marmo, di pietra, ecc., di tipo e spessore adeguato (almeno 3 cm), vengono fissate alla sottostante muratura mediante apposite zanche di ferro zincato, rame od ottone, con interposto un letto di malta. Nel secondo caso la lastra di piccolo spessore (al più 7 mm) verrà fissata sul supporto autoportante (ad esempio fibre di legno legate da cemento magnesiaco) a mezzo di collanti speciali.

– **Rivestimenti per interni:** anche in questo caso abbiamo due tipologie di rivestimento:

- c) per interni su strutture in muratura;
- d) per interni su strutture prefabbricate.

Similmente al caso precedente si tratta di lastre applicate su un supporto in muratura (ad esempio in laterizio) o su un supporto prefabbricato. Rispetto all'impiego per esterni – ma in assenza di sollecitazioni dovute agli agenti atmosferici – le lastre possono avere uno spessore minore e sono fissate con zanche più piccole.

– **Tamponamenti:** sono costituiti da piccoli blocchi in pietra con funzione di tamponamento di strutture a gabbia (di solito in calcestruzzo armato).

– **Pavimentazioni:** il materiale lapideo viene scelto in funzione dell'attività del luogo da pavimentare, delle caratteristiche estetiche del materiale medesimo, nonché della sua resistenza e lucidabilità. È messo in opera in lastre su un sottostante massetto (sottofondo) in calcestruzzo.

– **Scale:** si possono avere due tipologie di scale:

- e) con struttura in pietra;
- f) con struttura in calcestruzzo.

Nel primo caso le scale sono a sbalzo (ad incastro), oppure con doppio appoggio e in massello, cioè con gradini e pianerottoli in struttura massiccia lapidea. Nel secondo caso, che corrisponde all'uso corrente, le scale hanno una struttura in calcestruzzo armato e sono rivestite di materiale lapideo (lastre) fissato con malta alla struttura sottostante.

Altri impieghi del materiale lapideo sono: davanzali; stipiti e contorni delle porte e finestre; mensole e varie opere di finitura di un edificio.

➤ *Materiali lapidei e sostenibilità*

I materiali lapidei – stante il ciclo produttivo e lo smaltimento – sono (in generale) un prodotto sostenibile. In realtà, per il loro corretto impiego, risulta fondamentale (a tutela della salute umana) analizzare la quantità di radon che possono emettere. Il radon è un gas pesante e radioattivo che una volta inalato continua ad emettere particelle α . Tra le fonti del radon – nell'ambito dei materiali lapidei – abbiamo soprattutto le rocce di origine vulcanica (eruttive) come il tufo ed il granito. In questi casi si deve parlare di insostenibilità. In sintesi, la sostenibilità o meno dei materiali lapidei è legata alla verifica dell'emissione di radon.

3.4. Funzione legante (e sostenibilità)

Definizione di materiale **legante**:

- prodotto usualmente impiegato per cementare (legare) materiali da costruzione per opere murarie (laterizi, pietre, ecc.), oppure prodotto che, dopo opportuna trasformazione, diventa esso stesso materiale da costruzione.

I leganti si possono classificare in due categorie:

- leganti di uso generale (calci e cementi);
- leganti di uso speciale (gesso, cemento Sorel, ecc.).

I leganti di uso generale si suddividono in due categorie:

- leganti **aerei** che induriscono solo all'aria (calci aeree);
- leganti **idraulici** che induriscono anche immersi in acqua (calci idrauliche, cementi, agglomerati cementizi).

Il legante è un materiale inorganico. Il legante impastato con acqua dà luogo alla formazione di una miscela plastica denominata **pasta**.

La **pasta** – nel tempo – subisce un progressivo indurimento e acquisisce una crescente resistenza meccanica.

I leganti, in generale, sono finalizzati a costituire il legame tra i diversi componenti – a granulometria differenziata – dei miscugli di materiali lapidei e si utilizzano nella composizione delle **malte** e dei **conglomerati**.

In sintesi:

- per **pasta** di un determinato legante si intende il miscuglio del legante stesso con acqua, ovvero: legante + acqua;
- per **malta** si intende il miscuglio costituito dall'impasto dei seguenti materiali elementari: legante + materiale lapideo a granulometria fine + acqua;
- per **conglomerato** si intende il seguente miscuglio: legante + materiale lapideo a granulometria fine + materiale lapideo a granulometria grossa + acqua.

➤ *Processo di irrigidimento della malta (o conglomerato)*

La malta (o conglomerato) nel tempo si rapprende e indurisce. La prima fase è denominata **presa** ed è caratterizzata dall'acquisizione della stabilità di forma e dall'assenza di una resistenza meccanica praticamente significativa. La seconda fase è denominata **indurimento**: la malta (o conglomerato) acquisisce la resistenza meccanica.

Diversamente, per quanto riguarda il processo di presa e indurimento della sola **pasta** – ossia del legante con acqua – abbiamo la formazione di crepe e fessurazioni.

Principali materiali leganti

- **calce aerea**: legante aereo che deriva dalla cottura di calcare a 800÷900 °C. Il prodotto è commercializzato in zolle (calce viva), polvere (calce spenta) o pasta (grassello);
- **gesso**: legante aereo che deriva dalla cottura di pietra da gesso a 150÷200 °C. Il prodotto è commercializzato in polvere per pasta o malta.
- **calce idraulica**: legante idraulico che deriva dalla cottura di calcare (e argilla) a 900÷1000 °C. Il prodotto è commercializzato in polvere per malta;
- **cemento**: legante idraulico che deriva dalla cottura di calcare (e argilla) a 1400÷1500 °C più macinazione e aggiunta di additivi. Il prodotto è commercializzato in polvere per pasta o malta o conglomerato.

Dal punto di vista della sostenibilità – ed in particolare del consumo energetico in fase di produzione – i leganti più appropriati sono la calce aerea e la calce spenta, ovvero (per impieghi non strutturali ed in ambienti asciutti) il gesso. Al contrario, il cemento – stante l'elevata temperatura di cottura – è un materiale poco sostenibile il cui impiego deve essere tecnicamente motivato.

3.4.1. Calce aerea

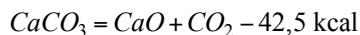
Vengono dette calci aeree le calci che danno luogo a malte capaci di indurire all'aria ma che si spappolano se immerse nell'acqua.

Dal punto di vista chimico sono costituite da ossido di calcio CaO (calci vive) ovvero idrossido di calcio Ca(OH)₂ (calci idrate o spente).

Le calci vive si ottengono per cottura di calcari in forni (a circa 900 °C); le calci idrate si ottengono trattando con acqua le calci vive.

↘ *Cottura dei calcari (calce viva)*

Le calci aeree derivano dai calcari secondo la seguente reazione chimica:



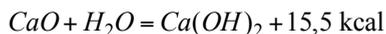
In altri termini, il carbonato di calcio (CaCO₃) – in forno a circa 900 °C – si scinde in ossido di calcio (CaO) e biossido di carbonio (CO₂). La reazione è di tipo endotermico, ossia richiede la fornitura di calore dall'esterno.

Il forno utilizzato (solitamente ma non necessariamente) è a tino disposto verticalmente: il calcare viene caricato dall'alto (alternato con strati di carbone) e la calce viene estratta dal basso sotto forma di zolle.

Dall'equazione stechiometrica abbiamo che da una mole di carbonato di calcio (CaCO₃) del peso di 100,09 g deriva una mole di ossido di calcio (calce viva) del peso 56,08 g, con una resa di materiale-obiettivo pari a ≈ 56%. In altre parole, una massa di calcare di ≈ 100 kg produce – tenendo conto della presenza di umidità e di impurezze nei calcari naturali – ≈ 50 kg di calce viva (ossido di calcio).

↘ *Calce idrata (o spenta)*

La calce a zolle (calce viva) si presenta come massa bianca e porosa. La calce viva – prima di poter essere usata come legante – si deve spegnere, ossia si deve trattare con acqua fino al prodotto idrato di calcio:



dove l'ossido di calcio (CaO) con acqua (H₂O) diventa idrato di calcio (Ca(OH)₂), ovvero calce spenta o idrata. La reazione è rapida e avviene con sviluppo di calore (esotermica).

Il processo di estinzione o spegnimento si può fare in abbondanza di acqua oppure con l'acqua strettamente necessaria. Con acqua abbondante si ottiene una pasta morbida e untuosa denominata **grassello**. Con l'acqua strettamente necessaria si ottiene la **calce idrata in polvere**.

↘ *Il grassello (pasta)*

Dall'estinzione o spegnimento con acqua abbondante si ha il grassello (pasta). La bontà di una calce viene valutata con la sua resa in grassello. La resa in grassello rappresenta la quantità finale di pasta rispetto alla quantità iniziale di calce viva.

Di solito abbiamo la seguente classificazione (cfr. [20]):

- **calce grassa**: 1 kg di calce viva trattiene da 1,7 a 2,8 litri di acqua e rende da 1,8 a 2,4 litri di grassello;
- **calce magra**: 1 kg di calce viva trattiene da 1,0 a 1,7 litri di acqua e rende da 1,4 a 1,8 litri di grassello.

La resa in grassello è influenzata dalle caratteristiche del calcare di partenza (tessitura e impurezze presenti) e dalla temperatura di cottura. Maggiori quantità di impurezze e maggiore temperatura di cottura determinano calci magre. Diversamente, un calcare tendenzialmente puro determina calci grasse.

In particolare (per quanto riguarda le impurezze) la presenza nel calcare di quantità significative di ossido di magnesio (MgO) determina una calce tendenzialmente più magra, in quanto l'ossido di magnesio è caratterizzato da un lento spegnimento e da uno scarso rigonfiamento.

Dopo la preparazione il grassello viene filtrato (per eliminare le impurezze) e lasciato stagionare in fosse dette calcinaie.

Lo scopo della stagionatura è il completamento dello spegnimento onde evitare che l'eventuale rimanenza di ossido di calcio non idratato si spenga successivamente nelle malte già indurite e produca rigonfiamenti e fessurazioni localizzate. In genere la stagionatura deve avere una durata di almeno 20 giorni per il grassello destinato alla malta da muratura e di almeno due mesi per il grassello destinato alla malta per gli intonaci.

↘ *La calce idrata in polvere*

Per ottenere calce spenta (o idrata) in polvere, anziché sotto forma di pasta (grassello), si dovrà impiegare la quantità d'acqua strettamente necessaria all'estinzione. In questo caso le zolle vengono frantumate e successivamente spente in tamburi rotativi chiusi nei quali l'acqua viene immessa finemente polverizzata.

L'ambiente chiuso e il calore di reazione fanno evaporare l'acqua in eccesso e rendono infine una calce spenta in polvere, la quale – per il confezionamento in sacchi di carta – viene prima classificata (in peso) mediante un separatore a vento.

Di fatto si ottengono due tipi di calce idrata:

- a) fiore di calce, usata nei laboratori chimici;
- b) calce da costruzione, impiegata per la preparazione del grassello (pasta) e per la confezione delle malte da muratura.

La calce idrata in polvere viene confezionata e trasportata in sacchi di carta e presenta il vantaggio – rispetto alla calce viva – di **non** richiedere lo spegnimento e la stagionatura, essendo pronta per la trasformazione in grassello mediante semplice spappolamento in acqua.

↳ *Le malte*

Impastando il grassello con sabbia ed acqua in opportuni mescolatori si ottiene la malta – una massa pastosa – da porre direttamente in opera.

La composizione della malta varia a seconda dell'impiego. La malta per la muratura, usata per il collegamento di mattoni o pietrame, ha all'incirca la seguente composizione:

- **1 parte in volume** di grassello con **3 parti** di sabbia e **0,5 parti** di acqua. Vale il criterio che la pasta di calce (il grassello) deve riempire i vuoti della sabbia.

Le sabbie adatte alla confezione delle malte di calce debbono essere silicee o calcaree con granulometria uniforme. Sono da evitare le sabbie argillose o terrose e la sabbia di mare (per il suo contenuto di cloruro di sodio e di magnesio). Le sabbie poco pulite si possono migliorare mediante lavaggio.

L'acqua impiegata non deve avere particolari requisiti. Non si può usare acqua di mare. Ed è comunque da evitare l'acqua che contiene il cloruro di sodio (il quale dà luogo ad efflorescenze nei muri) ed il cloruro di magnesio (che reagisce con la calce dando cloruro di calcio che ha effetto deliquescente).

Non si possono utilizzare le acque torbide, le quali – per il contenuto di sostanze organiche e argillose – rendono difficile la coesione tra le particelle costituenti la malta.

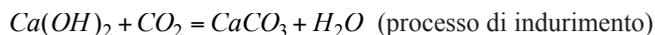
↳ *Umidità nelle murature*

Le efflorescenze nelle murature (salnitro o nitrato di potassio) sono dovute alla presenza di sali igroscopici (o deliquescenti) – nitrati e carbonati di sodio, potassio e ammonio, nitrati e cloruri di calcio, magnesio, ecc., solfati di calcio, potassio e sodio. Le sostanze enumerate derivano o dalle acque usate per la preparazione della malta o dai laterizi impiegati. Talvolta sono attribuibili a cause esterne come infiltrazioni dovute a rotture di tubazioni di scarico, ecc.

↳ *Presa e indurimento*

La presa della malta di calce aerea è piuttosto rapida e consiste nel processo di **evaporazione** dell'acqua e nella **crystallizzazione** dell'idrossido di calcio.

Il successivo indurimento è lento e consiste nel processo di **carbonatazione** dell'idrato di calcio mediante il biossido di carbonio presente nell'aria e nella conseguente formazione del carbonato di calcio. La lentezza del processo di carbonatazione dipende dalla scarsa concentrazione del biossido di carbonio in aria.



Come si evince dall'equazione stechiometrica, durante la carbonatazione si ha la formazione d'acqua – pertanto i muri freschi rimangono umidi per molto tempo ovvero per il tempo necessario al processo di indurimento. Ne consegue che l'edificio non è utilizzabile se non quando il livello di umidità delle pareti diventa inferiore al 5%. Una parete è completamente asciutta quando il livello d'acqua è inferiore all'1%.

Il processo di indurimento – oltre la formazione ed espulsione d'acqua – porta ad un aumento di volume di circa il 10%.

La presenza di sabbia nel processo di indurimento – che rende più poroso l'impasto – da un lato permette la carbonatazione degli strati interni e d'altro lato ne limita l'aumento volumetrico. Purtroppo, una pasta molto porosa, pur essendo completamente carbonata risulta essere meccanicamente debole. Pertanto risulta particolarmente importante porre la dovuta attenzione al dosaggio grassello-sabbia.

✎ *La resistenza meccanica*

La resistenza meccanica è dovuta alla formazione della struttura cristallina (intrecciata) del carbonato di calcio e alla contrazione delle particelle colloidali dell'idrossido di calcio.

Le malte di calce grassa sono utilizzate nelle murature di pietrame e di laterizio e per intonaci di muri interni. Dal punto di vista meccanico induriscono molto lentamente, hanno scarsa resistenza alla compressione e scarso potere adesivo. Sono sensibili al gelo. Pur tuttavia, il loro impiego – a motivo dell'elevato livello di sostenibilità e traspirabilità delle malte – è raccomandato nella produzione di intonaci interni.

✎ *Esecuzione di un intonaco a calce*

Per intonaco a calce si intende un intonaco con una malta dove l'unico legante è la calce: calce aerea o calce idraulica. L'intonaco – finalizzato alla finitura e protezione delle pareti – è una struttura costituita da uno o più strati (stesure).

Sui supporti tradizionali (muri in pietra, mattoni o misti pietra-mattoni) è dato dall'applicazione (solitamente a mano) di tre strati così denominati:

- 1) rinzaffo;
- 2) arriccio;
- 3) stabilitura:

- **Rinzaffo**: è il primo strato a contatto del muro grezzo. È costituito da malta con inerti a granulometria **grossa** ed elevato contenuto di legante (calce). Ha la funzione di regolarizzare il supporto per aumentare l'aderenza degli strati successivi. Il rinzaffo viene eseguito a cazzuola gettando con forza la malta contro la parete. Lo spessore della malta dipende dagli avvallamenti della superficie del muro stesso. Dove esistono cavità accentuate si inseriscono frammenti di mattoni.
- **Arriccio**: è il secondo strato a contatto con il rinzaffo che dovrà essere completamente asciutto. L'arriccio dovrà penetrare nelle rugosità del rinzaffo onde ottenere una superficie piana. È costituito da malta con inerti a granulometria **media** e sufficiente contenuto di legante (calce). Ha la funzione di tenuta e di impermeabilità. Il minore dosaggio di legante limita il processo di ritiro. Lo spessore dell'arriccio dipende dalle caratteristiche del muro allo stato grezzo e dovrà essere di **almeno** 0,5 cm. La superficie sarà rifinita a frattazzo (in legno) in modo che l'intonaco risulti con grana omogenea, senza sbavature, ecc.
- **Stabilitura**: è lo strato (stesura) finale ed ha funzione prevalentemente estetica. È costituito da malta con inerti a granulometria **fine** ed elevato contenuto di legante (calce).

Lo spessore della stabilitura dovrà essere **al più** di 0,5 cm. La stesura deve esser data sul corpo dell'arriccio ancor fresco con lo scopo di creare uno stabile collegamento.

La realizzazione di un intonaco a calce richiede diversi accorgimenti onde evitare la formazione di cricche da ritiro (cavillature) ed il distacco dell'intonaco medesimo.

In particolare si raccomanda:

- valutare le condizioni ambientali, onde evitare di operare con temperature elevate, vento e scarsa umidità. Le condizioni ideali – in assenza di vento – sono: temperatura tra i 5 e i 20 °C, umidità relativa di circa il 50%;
- bagnare il muro prima della stesura del rinzafo;
- attendere l'indurimento del rinzafo prima di stendere l'arriccio e la stabilitura;
- ad intonaco concluso (per alcuni giorni) nebulizzare acqua sulla superficie dell'intonaco medesimo;
- attendere non meno di 10 giorni per l'applicazione della tinteggiatura.

3.4.2. Gesso

Si ottiene dalla cottura della pietra da gesso che si trasforma in gesso cotto che una volta macinato (e finemente polverizzato) dà un prodotto legante a rapida presa di tipo aereo.

↘ *Cotture della pietra da gesso*

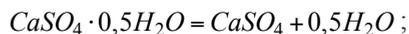
Il materiale di partenza – comunemente definito gesso – è il **solfato di calcio bi-idrato** $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ presente nella pietra da gesso.

La cottura (e disidratazione) del solfato di calcio bi-idrato, con differenti livelli di temperatura, porta a gessi con diverse caratteristiche tecnologiche

- per cottura a 120-150 °C si ottiene il **solfato di calcio semi-idrato** (gesso da modellatore: rapido indurimento e aumento di volume):



- per cottura a 200 °C si ottiene il **gesso anidro o anidride solubile** (gesso da costruzione: lento indurimento e stabilità del volume):



- per cottura a temperature superiori si ottengono **gessi morti** e insolubili, inadatti al confezionamento degli impasti.

↘ *Presa e indurimento del gesso cotto*

La presa (e indurimento) del gesso avviene per assorbimento d'acqua da parte del solfato di calcio disidratato durante il processo di cottura, con la conseguente formazione del reticolo cristallino del materiale di partenza.

L'acqua in eccesso evapora successivamente (e rapidamente) lasciando un solido poroso e igroscopico.

▷ *Impieghi del gesso (e sostenibilità)*

Non trova applicazione – per il suo carattere igroscopico – nelle strutture murarie esterne, in quanto assorbe l'umidità ambientale, aumenta di volume e genera le cricche.

Presenta buone qualità di resistenza meccanica e non dà ritiro. È leggero ed ha un buon comportamento in tema di isolamento termico ed acustico. Si presta facilmente ad essere tinteggiato. Per queste caratteristiche trova largo impiego come elemento decorativo (stante la facilità di modellazione) per le finiture interne e per gli intonaci interni.

Il gesso per come è prodotto – soprattutto in relazione alle basse temperature di cottura e allo smaltimento senza problemi di sorta – è un materiale altamente sostenibile.

3.4.3. *Calce idraulica*

La calce idraulica è un prodotto che si perde nei primordi della storia, se ne hanno tracce in Gerusalemme – durante il Regno di Salomone nel decimo secolo a.C. – per la costruzione di cisterne dell'acqua, dove venne impiegata (mescolata a polvere di mattone cotto) per l'intonaco delle medesime. Fu molto usata nel periodo romano dove la preparazione seguiva modalità a regola d'arte.

La calce idraulica, a differenza della calce aerea, dà una malta che rapprende e indurisce anche in presenza dell'acqua (idraulicità).

L'idraulicità dipende dal fatto che durante la cottura i costituenti dell'argilla – come silice e allumina – reagiscono con il carbonato di calcio formando dei prodotti (silicati e alluminati) che rapprendono anche in contatto con l'acqua.

In conclusione, il processo di presa e indurimento delle calce idrauliche non avviene solo per **carbonatazione** – come nel caso delle calce aeree – ma anche attraverso un insieme di reazioni chimiche che conferiscono al prodotto finale una resistenza meccanica maggiore di quella delle calce aeree.

Le calce idraulica si suddivide in:

- 1) calce idraulica **naturale**;
- 2) calce idraulica **artificiale**.

La prima proviene dalla cottura di calcari argillosi naturali (marne). Dai quali si ottiene la calce idraulica in zolle che, spenta con acqua e macinata, costituisce la calce idraulica naturale in polvere.

La seconda proviene dalla cottura (e successivo spegnimento) di una miscela artificiale di calcari e argilla o di differenti calcari argillosi. Oppure è ottenuta per semplice macinazione di calce aerea idrata con pozzolana ovvero di calce aerea idrata con loppe basiche granulari di altoforno.

In sintesi, per la calce idraulica abbiamo i seguenti componenti:

- **Marna**: roccia sedimentaria costituita da carbonato di calcio e argilla;
- **Pozzolana**: roccia sedimentaria prodotta dalla sedimentazione di sostanze eruttate da vulcani, ricca di silice e minerali contenenti alluminio;
- **Loppa**: prodotto della fusione di scorie del minerale ferroso.

Per le calce idrauliche si definisce il seguente **indice di idraulicità** (I):

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}$$

dove SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO e MgO rappresentano le percentuali in peso dei vari composti. In altre parole, l'indice di idraulicità – che misura la capacità dell'impasto di fare presa anche in acqua – è dato dal rapporto fra la quantità di argilla (espressa in percentuale) e la quantità di calcare (sempre espressa in percentuale).

L'idraulicità è tanto più marcata quanto maggiore è la percentuale di argilla. Non solo, è anche funzione della temperatura di cottura della calce (delle marne), infatti per temperature non superiori a 800-900 °C il prodotto ha un comportamento simile a quello della calce aerea, diversamente – per temperature superiori – i componenti dell'argilla reagiscono e formano prodotti che conferiscono alla calce un comportamento idraulico.

In funzione dell'indice di idraulicità abbiamo la seguente classificazione:

calci **debolmente** idrauliche: $I = 0,10 \div 0,16$;

calci **mediamente** idrauliche: $I = 0,16 \div 0,31$;

calci idrauliche **propriamente dette**: $I = 0,31 \div 0,42$;

calci **eminentemente** idrauliche: $I = 0,42 \div 0,50$;

cementi: $I = 0,50 \div 0,58$.

In sintesi – per quanto riguarda le calci idrauliche – abbiamo il seguente schema:

- **calce idraulica naturale in zolle**: deriva dalla cottura di calcari argillosi naturali;
- **calce idraulica naturale in polvere**: deriva dalla cottura di calcari argillosi naturali e successiva estinzione e macinazione. In funzione del valore di I si classifica in:
 - a) **debolmente** idraulica;
 - b) **mediamente** idraulica;
 - c) **eminentemente** idraulica;
- **calce idraulica artificiale comune**: deriva dalla cottura (e successiva estinzione) di miscele artificiali di calcare e argilla o di miscele di differenti calcari argillosi;
- **calce idraulica artificiale pozzolanica**: deriva dalla macinazione di calce aerea idrata (o spenta) e pozzolana;
- **calce idraulica artificiale siderurgica**: deriva dalla macinazione di calce aerea idrata (o spenta) e loppe basiche granulate di altoforno.

↘ *Modalità di fornitura dei leganti idraulici*

Le norme prescrivono che i cementi, gli agglomeranti cementizi e le calci idrauliche in polvere siano forniti alla rinfusa o in sacchi sigillati (da 25 kg) o in imballaggi speciali con chiusura automatica a valvola.

Nelle confezioni devono essere riportate le seguenti informazioni: fabbricante; stabilimento; denominazione del legante; quantità d'acqua per la formazione della malta normale; resistenze minime a flessione e compressione dei provini dopo 28 giorni.

3.4.4. *Cemento con funzione di legante*

Il calcestruzzo di cemento è un conglomerato artificiale formato dall'impasto di tre elementi: cemento, inerti (sabbia, ghiaia o pietrisco) e acqua che, indurendosi (all'aria o nell'acqua) danno luogo ad una **pietra artificiale**. La qualità e la resistenza del calcestruzzo dipende da diversi fattori: qualità dei singoli componenti; modalità di confezionamento, trasporto e posa in opera; dosatura dei materiali componenti; costipazione del getto; temperatura ambientale. Lo scarso controllo dei precedenti fattori determina un calcestruzzo di scarsa qualità e di scarsa resistenza meccanica.

▸ *Produzione del cemento*

Il cemento che si usa per il calcestruzzo armato è un legante idraulico. La materia prima per ottenere il cemento è una miscela di calcare e argilla. In natura si possono trovare dei calcari marnosi che, con l'aggiunta di pochi elementi, contengono gli ingredienti richiesti per la produzione del cemento. L'uso dei calcari marnosi porta al cemento **naturale**, diversamente l'uso di miscele di calcari, argilla e prodotti intermedi porta al cemento **artificiale**.

Il processo di produzione è il seguente:

- escavazione di calcare e argilla;
- frantumazione del materiale estratto (a mezzo di frantoi e mascelle) e successiva macinazione per la formazione di una **miscela** omogenea;
- cottura della **miscela** in forni rotativi (circa 1500 °C) fino ad un inizio di vetrificazione e precisamente fino al color bianco. Il prodotto di questa cottura è denominato «clinker» e si presenta sotto forma di particelle all'incirca sferiche. Il clinker – scaricato dai forni rotativi – viene velocemente raffreddato ed esposto all'aria aperta ed infine viene finemente macinato e polverizzato. Il livello di polverizzazione è tale che – al setaccio di 900 maglie/cm² – il residuo è inferiore al 2÷5%.

Aumentando il livello della macinazione migliora la qualità del cemento. Nella fase di macinazione si aggiunge – in misura del 2÷5% – gesso o anidrite (pietra di solfato di calcio anidro) che ha lo scopo di regolarizzare la presa. La polvere finale (il cemento) è impalpabile e di color grigio-azzurro o leggermente verdastro.

▸ *Classificazione tecnologica del cemento*

Dal punto di vista tecnologico abbiamo i seguenti tipi:

- 1) cemento portland;
 - 2) cemento pozzolanico;
 - 3) cemento d'alto forno;
 - 4) cemento alluminoso.
- **Cemento portland**: si intende il prodotto ottenuto per macinazione del clinker con aggiunta di gesso (o anidrite) per ottimizzare il processo di idratazione.
 - **Cemento pozzolanico**: si intende il prodotto ottenuto per macinazione del clinker portland con aggiunta di pozzolana (o di altro materiale equivalente) e con aggiunta di gesso (o anidrite) per ottimizzare il processo di idratazione.
 - **Cemento d'alto forno**: si intende il prodotto ottenuto per macinazione del clinker portland con aggiunta di loppe basiche granulate d'alto forno e con aggiunta di gesso (o anidrite) per ottimizzare il processo di idratazione.
 - **Cemento alluminoso**: si intende il prodotto ottenuto per cottura e macinazione di calcari, argilla e alluminati idrati di calcio. Il prodotto ha un basso livello di silice ed un alto livello di allumina. È un cemento a rapido indurimento per cui è consigliato nei seguenti casi:
 - a) lavori urgenti ed opere dove occorre un'alta resistenza meccanica ed una breve stagionatura;

- b) opere in contatto con acque chimicamente aggressive;
 - c) opere gettate a bassa temperatura.
- **Cemento ferrico:** si intende il prodotto ottenuto per cottura e macinazione di calcari, argilla e ossidi di ferro (ceneri di pirite). È un cemento resistente alle acque solfatiche e alle aggressioni chimiche in genere ed è particolarmente adatto per le costruzioni marine.

↘ *Classificazione meccanica del cemento*

Dal punto di vista meccanico abbiamo i seguenti tipi:

- 1) cemento normale;
 - 2) cemento ad alta resistenza;
 - 3) cemento ad alta resistenza e rapido indurimento.
- I carichi di rottura sono espressi nella seguente tabella.

Tabella 3.9. *Carico di rottura di un provino standard in malta di cemento*

	Resistenza a flessione	Resistenza a compressione
Cementi normali:	60 kg/cm ²	325 kg/cm ²
Cementi ad alta resistenza:	70 kg/cm ²	425 kg/cm ²
Cementi ad alta resistenza e rapido indurimento:	80 kg/cm ²	525 kg/cm ²

Le prove di rottura a compressione e flessione (cfr. tabella precedente) si realizzano su un provino di malta di cemento – al 28esimo giorno di maturazione – di dimensioni 40×40×160 cm, confezionato con le seguenti proporzioni: una parte di cemento, tre parti di sabbia (a granulometria normalizzata) e mezza parte di acqua potabile (ossia priva di sostanze organiche e di zuccheri).

3.4.5. Cemento magnesiaco

I cementi magnesiaci sono di due tipi:

- a) cemento al cloruro (o di Sorel);
- b) cemento al solfato.

↘ *Cemento al cloruro o cemento Sorel*

Si intende il prodotto ottenuto impastando – con una soluzione concentrata di cloruro di magnesio – una miscela di ossido di magnesio e inerti di vario tipo (segatura e trucioli di legno, materiali organici fibrosi, ecc.). La massa ottenuta indurisce in poche ore ed assume una buona resistenza meccanica (400÷600 kg/cm²).

Il cemento Sorel è un legante aereo e viene usato per la fabbricazione dei materiali isolanti, per i sottofondi dei pavimenti, ecc..

- **Ambienti umidi:** il cemento Sorel è sensibile all'umidità. Quando l'esposizione è prolungata il manufatto in cemento è soggetto ad un processo di idrolisi con la relativa perdita di resistenza meccanica. Al contrario, per esposizioni limitate nel tempo, non si hanno effetti sulla resistenza meccanica del materiale. Il cemento Sorel in opera – in ambienti