

Capitolo 4

CARATTERI COSTRUTTIVI E TECNICHE PER INTERVENTI DI CONSERVAZIONE E RECUPERO

4.1 - I MATERIALI LAPIDEI	4-3
<i>Massimo Marian</i>	
4.2 - IL COMPORTAMENTO STATICO DEGLI EDIFICI IN PIETRA, LA “STRUTTURA SCATOLARE”, LE FONDAZIONI. IL MIGLIORAMENTO STATICO STRUTTURALE	4-19
<i>Alessandro Grazzini</i>	
4.2.1 - Introduzione	4-19
4.2.2 - Statica degli edifici murari	4-20
4.2.3 - Meccanismi di danno	4-29
4.2.4 - Principi di miglioramento sismico	4-34
4.3 - MURATURE DI PIETRA	4-37
<i>Riccardo Nelva, Marco Zerbinatti</i>	
4.3.1 - Caratteri costruttivi e classificazione delle murature	4-37
4.3.2 - Tecniche di intervento	4-43
4.4 - BALCONI	4-57
<i>Riccardo Nelva</i>	
4.4.1 Criteri di dimensionamento di massima di lastre e mensole di balconi di pietra	4-57
4.5 - TETTO CON MANTO “DI PIODE”	4-61
<i>Sara Fasana, Paolo Scarzella</i>	
4.5.1 - La struttura portante	4-62
4.5.2 - Varietà nei modi di disporre le capriate “di testata”	4-64
4.5.3 - Richiami di materiali e tecniche tradizionali per il taglio delle lastre da tetto	4-68
4.5.4 - Il manto tradizionale in lastre di pietra di elevato spessore	4-70
4.5.5 - Caratteristiche e comportamento di manti tradizionali: accorgimenti per la lavorazione e la disposizione in opera delle lastre	4-72
4.5.6 - Valutazione della stabilità dei manti: proposta di un metodo	4-74
4.5.7 - Scelta di materiali attualmente disponibili	4-79
4.5.8 - Linee risolutive per interventi di recupero e conservazione di tetti con manto di piode	4-80

4.6 - VOLTE <i>Marco Zerbinatti</i>	4-83
4.6 - SOLAI <i>Riccardo Nelva, Marco Zerbinatti</i>	4-91
4.8 - INTERVENTI PER MIGLIORARE LE PRESTAZIONI ENERGETICHE E RIDURRE I DISPERDIMENTI	
TERMICI <i>Riccardo Nelva, Marco Zerbinatti</i>	4-99
4.8.1 - Introduzione	4-99
4.8.2 - Soluzioni praticabili per l'isolamento	4-101
4.8.3 -Valutazione della quantità di vapor d'acqua condensata e verifica della sua rievaporazione in un ciclo stagionale	4-104
4.9 - LE SUPERFICI ESTERNE: MALTE, INTONACI A VISTA, SUPERFICI TITNTEGGIATE, DECORAZIONI	
PITTORICHE O A GRAFFITO <i>Marco Zerbinatti</i>	4-117
4.9.1 - Introduzione	4-119
4.9.2 - Fenomeni di degrado "endemici"	4-123
4.9.3 - Fenomeni di degrado provocati da interventi errati o inadatti	4-127
4.9.4 - Criteri di intervento e soluzioni tecniche compatibili	



4.1 - I MATERIALI

MASSIMO MARIAN

4.2 - IL COMPORTAMENTO STATICO DEGLI EDIFICI DI PIETRA: LA “STRUTTURA SCATOLARE”, LE FONDAZIONI, IL MIGLIORAMENTO STATICO STRUTTURALE

ALESSANDRO GRAZZINI

4.2.1 - Introduzione

Il progetto di recupero dei tradizionali edifici in pietra a secco dovrà necessariamente affrontare il tema del consolidamento statico e del miglioramento sismico delle strutture, alla luce sia dell'attuale stato di degrado nel quale versa una vasta parte di queste costruzioni, sia dei requisiti di sicurezza richiesti dalle nuove normative tecniche¹⁻².

Nota 4.2-1 D.M. 14/01/2008 Norme tecniche per le costruzioni.

Nota 4.2-2 Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008.

Nella letteratura scientifica nazionale e internazionale esiste pochissimo materiale tecnico di supporto alla progettazione di interventi di recupero statico e sismico su strutture murarie in pietra a secco, come ulteriore conferma dell'*unicum* costruttivo che questi edifici rurali dell'architettura della parte nord dell'Insubria rappresentano, invece meritevoli di un approfondito studio ingegneristico.

Gli indirizzi operativi che questo manuale vuole offrire a professionisti e tecnici chiamati a intervenire per la messa in sicurezza di questi edifici sono impostati sul massimo rispetto e sulla conservazione delle peculiarità strutturali e architettoniche del costruito storico, in sintonia con la Direttiva del 9 febbraio 2011 recante “*Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato*” con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14/01/2008. Infatti, sebbene la maggior parte degli edifici rurali e civili non siano sottoposti a vincoli diretti del Ministero per i beni e le attività culturali, essi esprimono un elevato valore storico-architettonico da tutelare con i medesimi criteri di conservazione previsti per gli edifici posti sotto vincolo ministeriale.

Gli interventi proposti all'interno del manuale sono basati su tecniche semplici, alcune tradizionali altre eseguite con materiali innovativi già utilizzati positivamente. Una delle principali finalità è quella di contemperare in modo soddisfacente, per quanto possibile, due esigenze apparentemente contrastanti quali:

- da un lato, quella di preservare le peculiarità architettonico costruttive degli edifici e i loro connotati funzionali,
- d'altro canto, la necessità di ottemperare alle richieste di messa in sicurezza sotto il profilo strutturale proposto dalle attuali normative tecniche per le costruzioni.

Particolare attenzione sarà prestata alla valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture in pietra, in ottemperanza a quanto richiesto

dalle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni in occasione di ristrutturazioni globali degli edifici. In particolare gli autori sono concordi nel sostenere interventi di solo miglioramento sismico, ben consapevoli che la tipologia costruttiva di questi edifici difficilmente potrà raggiungere i medesimi livelli di sicurezza sismica (adeguamento) previsti per le nuove costruzioni.

4.2.2 - Statica degli edifici murari

Gli edifici tradizionali di pietra della Valle Ossola e del Ticino sono caratterizzati da geometrie semplici, solai lignei, coperture con struttura portante di legno e manto di *piode* molto pesanti, come visibile in Fig.4.2-1. Sono riscontrabili diversi modi di apparecchiare le murature: a secco, con allettamento in malta di calce (a giunti sottili e a giunti spessi), con intonaco raso pietra, intonacate. La tessitura muraria risulta solitamente ben ammorsata nello spessore, con diatoni diffusi. Solo nelle costruzioni più importanti le pietre sono accuratamente sbazzate o risquadrate: il loro grado di lavorazione diminuisce col diminuire della rilevanza della costruzione, per essere quasi nullo nei casi dei muriccioli poderali o nei muri di terrazzamento di modeste dimensioni³. Come tutti gli edifici costruiti con muratura portante, anche per queste costruzioni è necessario valutare la struttura mediante uno schema scatolare costituito da elementi “indipendenti” efficacemente collegati:

- le pareti che svolgono una funzione portante rispetto ai carichi verticali e/o di controventamento rispetto ai carichi orizzontali (vento e sisma);
- solai sufficientemente rigidi e resistenti per sopportare i carichi



4.2-1

Nota 4.2-3 Paragrafo 4.3.1 “Caratteri costruttivi e classificazione delle murature”.

Fig. 4.2-1 Tipica casa rurale in pietra a secco con tetto in piode (Veglio).

verticali e per ripartire le azioni orizzontali tra i muri di controventamento (azione di diaframma).

Gli edifici di muratura sono infatti strutture complesse tridimensionali, costituite da pareti disposte secondo due direzioni mutuamente ortogonali, e da un sistema di elementi orizzontali che - mutuamente vincolati - costituiscono l'organismo strutturale. Gli elementi resistenti devono essere efficacemente connessi in modo da garantire un comportamento statico di natura scatolare, atto a resistere a sollecitazioni provenienti da qualsiasi direzione. Pertanto tutti i muri devono avere, per quanto possibile, sia la funzione portante che di controventamento. Inoltre, i solai devono essere sufficientemente rigidi e ben vincolati a tutte le pareti su cui poggiano, in modo da legarle e da ripartire sulle pareti di controventamento i carichi orizzontali (vento e sisma) secondo la direzione ad esse longitudinale. La capacità dei muri di resistere alle azioni orizzontali è favorevolmente influenzata dalla presenza di forze verticali stabilizzanti⁴.

Nota 4.2-4 In tal senso, la presenza di sistema di coperture come quelle tradizionali col manto di *piode* può giocare un ruolo positivo se il sistema di copertura stesso è correttamente impostato sui muri di appoggio, ovverosia non genera spinte orizzontali e l'orditura lignea riconduce a soli carichi verticali le forze in gioco.

Tale concezione strutturale, corrispondente al "*comportamento scatolare*" richiesto dalle normative stesse¹⁻², fornisce al fabbricato un'ottima resistenza d'insieme, comprovata dal buon comportamento che hanno gli edifici di muratura, anche in zona sismica, se correttamente costruiti. In Fig. 4.2-2 è illustrato come la resistenza dei muri a forze agenti nel piano sia maggiore rispetto a quella di forze agenti ortogonalmente al piano, e quindi è maggiore la loro efficacia come elementi di controventamento. I muri ortogonali fra loro devono essere efficacemente ammassati lungo le intersezioni verticali, mediante un'opportuna disposizione degli elementi. Il buon ammassamento tra le pareti tende a realizzare una maggiore redistribuzione dei carichi verticali fra i muri ortogonali anche nel caso di solai ad orditura prevalente in una direzione.

La Fig. 4.2-3 illustra infatti il buon comportamento che deriva da un efficace collegamento tra solai sufficientemente rigidi e pareti quando l'edificio è sollecitato da una azione orizzontale (vento o sisma). Come si vede la rigidità del solaio, che svolge l'azione di diaframma, unita all'efficace collegamento tra il solaio e le pareti e delle pareti fra di

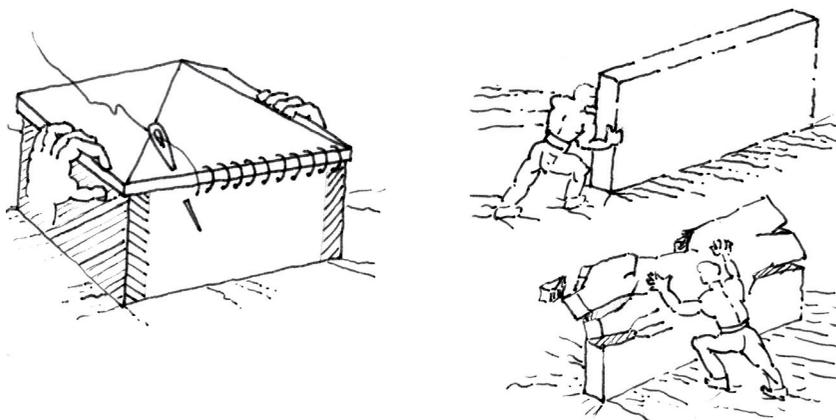
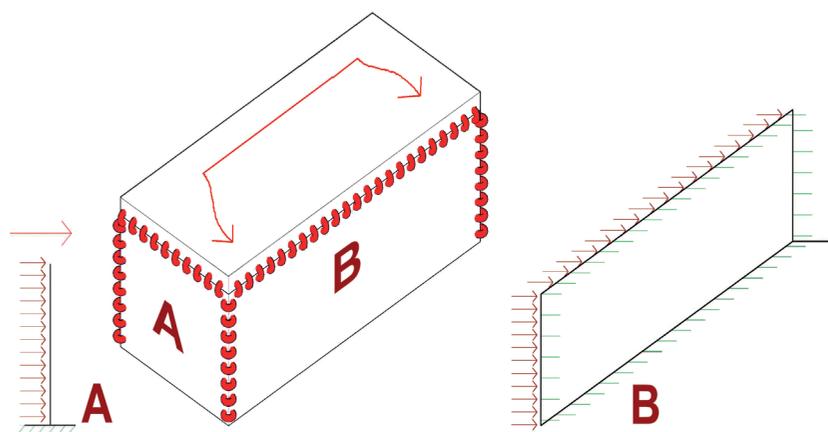


Fig. 4.2-2 Illustrazione della resistenza delle murature a seconda della direzione di applicazione dei carichi orizzontali e importanza dell'efficace collegamento tra tutte le strutture per raggiungere il comportamento scatolare.

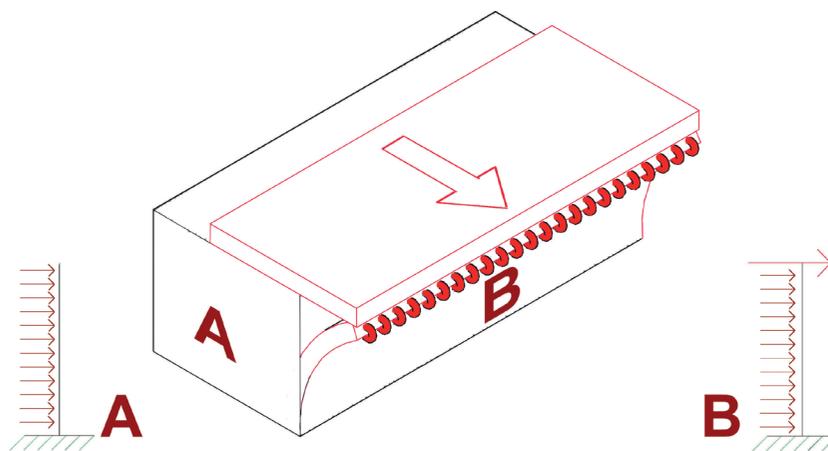


4.2-3

Fig. 4.2-3 - Corretta distribuzione delle forze orizzontali verso le pareti di controventamento se viene raggiunto un buon comportamento scatolare che collega tutte le strutture.

loro, permette di distribuire le azioni orizzontali verso le pareti a maggior inerzia nella medesima direzione di sollecitazione (controventi); nello stesso tempo consente di non far gravare tali azioni sulle pareti ad esse ortogonali, le quali, data la scarsa rigidità nella direzione trasversale, rischierebbero il ribaltamento. In questa situazione ottimale le pareti ortogonali all'azione orizzontale risultano vincolate come una piastra che può garantire una sufficiente resistenza fuori dal piano per la minima quota parte di azioni orizzontali ad esse attribuite. Al contrario, come è visibile in Fig. 4.2-4, la mancanza di uno o più di questi requisiti (solai non sufficientemente rigidi, collegamenti non efficaci tra solai e pareti, o delle pareti tra di loro) non garantisce più la corretta distribuzione delle azioni orizzontali lungo le pareti di controventamento. Pertanto le pareti ortogonali a queste non efficacemente collegate al solaio o alle altre pareti, saranno gravate da un'azione orizzontale di intensità non compatibile con la loro scarsa resistenza nella direzione ad esse ortogonale, generando labilità e vulnerabilità per il rischio di potenziali ribaltamenti fuori dal piano.

La muratura, in generale, è un manufatto composito le cui principali caratteristiche sono la disomogeneità, l'anisotropia, il diverso com-



4.2-4

Fig. 4.2-4 - Distribuzione non corretta delle forze orizzontali generata da una mancanza di comportamento scatolare dell'edificio.

portamento a compressione e a trazione, la non linearità nel legame sforzi-deformazioni. Pertanto la muratura, come aggregato di diversi componenti, risulta spesso di difficile definizione meccanica. E' solo possibile schematizzarla con una resistenza a compressione e modulo elastico quanto mai vari, scarsissima duttilità e ancora più esigua (e quindi trascurabile) resistenza a trazione. La tabella C.8A.2.1 della Circolare 617 del 2 febbraio 2009² fornisce alcuni utili valori indicativi, compresi tra un minimo cautelativo e un massimo, delle principali caratteristiche meccaniche di alcune tessiture murarie, non riuscendo ovviamente a coprire il vasto panorama di diverse tessiture presenti nel patrimonio storico-architettonico italiano. La particolare tessitura muraria della pietra a secco rientra tra quelle non sufficientemente studiate e indagate, sulla quale si può presupporre una più che buona resistenza a compressione in considerazione dei pesanti elementi lapidei che la compongono, ma nulla si conosce a livello quantitativo riguardo il comportamento a taglio e pressoflessione nel piano.

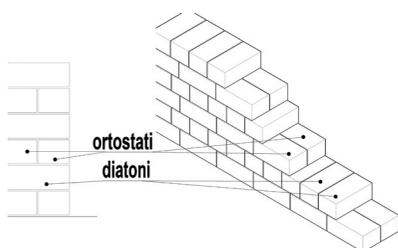
La difficile quantificazione delle caratteristiche meccaniche delle singole murature presenti anche nel medesimo fabbricato e l'accumulo di danni conseguenti a decenni di abbandono rendono quanto mai problematica l'analisi dell'affidabilità nelle verifiche statiche. Il giudizio sulle reali condizioni di salute di una costruzione di muratura, specialmente se antica, è da fare conseguire ad una valutazione di sintesi, nella quale le verifiche analitiche danno un supporto tanto più affidabile quanto più queste sono recepite con spirito critico⁵. Nello studio e nel calcolo delle strutture murarie perdono in parte di significato i numeri e l'affinamento ossessivo ed accanito dei metodi di calcolo. Quando possibile, è meglio affidarsi a schemi di calcolo chiari, isostatici, a rottura, che spesso non hanno bisogno della conoscenza dei legami costitutivi dei materiali e seguono le leggi dei corpi rigidi della meccanica razionale.

La tessitura muraria di pietre a secco degli edifici presenta diverse varietà e tecniche costruttive, a seconda dell'area geografica e delle condizioni economiche nel contesto di edificazione. La maggior parte delle murature ossolane è costruita con pietre a secco disposte regolarmente con giunti verticalmente sfalsati e comprendono la presenza fondamentale di elementi ortostati e di diatoni trasversali, come evidenziato nelle Figg. 4.2-5,-6.

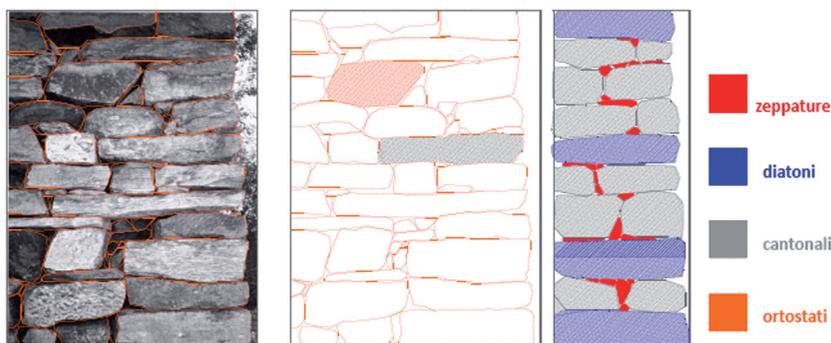
Nota 4.2-5 - CANGI G.; *Manuale del recupero strutturale e antisismico*, DEI, Roma 2005.

Figura 4.2-5 - Posizione degli ortostati e dei diatoni all'interno della tessitura muraria.

Figura 4.2-6 - Stratigrafia di una muratura in pietra a secco eseguita seguendo la regola d'arte.



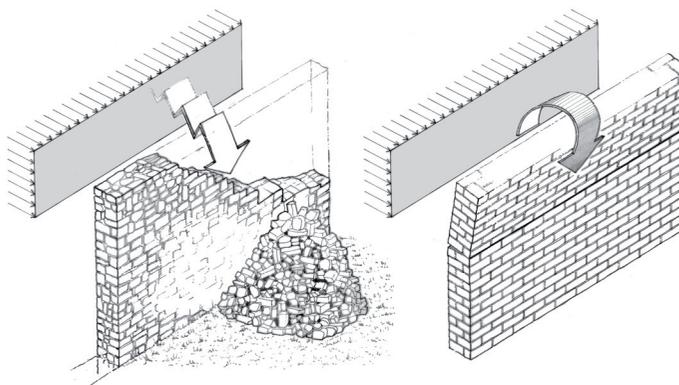
4.2-5



4.2-6

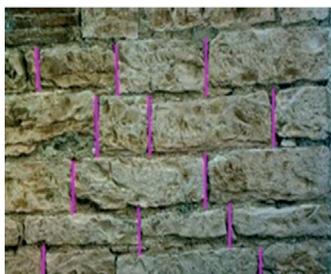


4.2-7



Gli ortostati sono blocchi posti con il loro lato più lungo nella direzione del muro ed hanno la funzione di legare l'apparecchio murario nel piano della parete, in modo da conferire un comportamento monolitico per azioni che sollecitano la parete nel proprio piano. I diatoni sono invece i blocchi posti con il loro lato più lungo ortogonalmente alla direzione del muro in modo da consentire un comportamento monolitico nei confronti delle azioni che tendono a ribaltare la parete fuori del proprio piano. La regolarità e la simmetria orizzontale dei giunti favoriscono una migliore resistenza della parete ad azioni orizzontali ad essa ortogonali che possono innescare pericolosi ribaltamenti fuori dal piano, come illustrato in Fig. 4.2-7. Lo sfalsamento verticale dei giunti garantisce inoltre una migliore distribuzione dei carichi verticali e una migliore risposta della parete sottoposta ad azioni orizzontali nel proprio piano, come evidenziato in Fig. 4.2-8. I vuoti tra le pietre sono spesso riempiti con piccole zeppe lapidee, come illustrato in Fig. 4.2-6. Gli spigoli erano rinforzati con i cantonali per garantire maggior rigidità lungo le fondamentali intersezioni tra le pareti perimetrali ortogonali, ai fini di un buon comportamento scatolare dell'intero fabbricato come visibile nelle Figg. 4.2-9,-10.

Tuttavia alcune tipologie murarie non risultano eseguite a regola d'arte e denotano una sezione multistrato dove i due paramenti murari sono slegati essendo assenti i diatoni trasversali, come visibile nelle Figg. 4.2-11,-12 presso alcune sezioni murarie rilevate a Veglio. Queste sezioni risultano particolarmente vulnerabili in corrispondenza di azioni orizzontali fuori dal piano poichè tendono a disgregarsi in modo



4.2-8

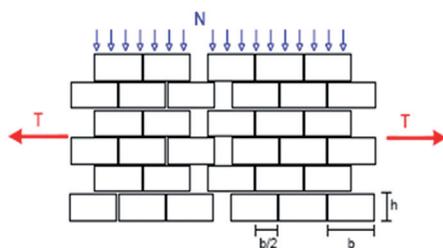


Fig. 4.2-7 - Importanza della linearità dei giunti orizzontali ai fini di una maggior resistenza che la parete muraria può offrire per contrastare il ribaltamento fuori dal piano in corrispondenza di azioni orizzontali ad essa ortogonali.

Figg. 4.2-9 e 4.2-10 Presenza di poderosi cantonali lungo gli spigoli degli edifici di Veglio.

Figg. 4.2-11 e 4.2-12 - Sezioni murarie multistrato con paramenti esterni non connessi (Veglio).

Fig. 4.2-8 - Effetto benefico della disposizione sfalsata dei giunti verticali sia per la buona resistenza ai carichi verticali sia per quella a carichi orizzontali nel piano della parete.



4.2-9



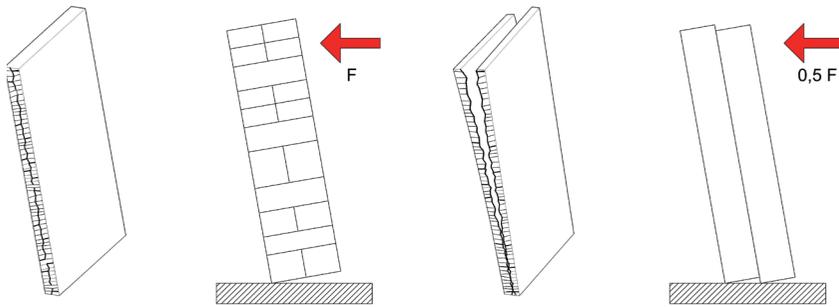
4.2-10



4.2-11



4.2-12

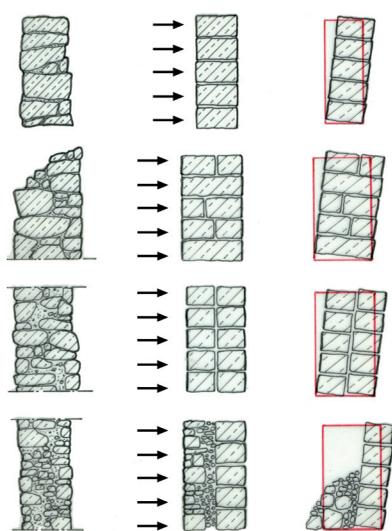


4.2-15

caotico, come illustrato nelle Figg. 4.2-13,-14. Infatti, in queste situazioni non è assolutamente garantito l'auspicabile comportamento monolitico che la parete deve dimostrare per garantire resistenza sia nel piano sia fuori da piano. Occorre infatti ricordare che l'azione sismica fuori dal piano, cioè in direzione ortogonale alla parete (quindi lungo la direzione di minor rigidità), può essere ulteriormente gravosa quando il sistema strutturale non è sufficientemente "scatolare", e pertanto la maggior parte dell'azione sismica non viene correttamente ripartita sulle sole pareti longitudinali, bensì una quota si riversa in direzione ortogonale causandone il crollo. Come illustrato in Fig. 4.2-15, occorre un'azione sismica molto più grande per generare il ribaltamento di una parete a tessitura monolitica, al contrario è sufficiente una bassa azione sismica per determinare il collasso fuori dal piano di una muratura multistrato trasversalmente disconnessa.

Infatti la *regola d'arte* ha un ruolo fondamentale per il comportamento statico e dinamico dell'edificio. Essa prevede, per esempio, la presenza dei diaconi trasversali. Una tessitura a comportamento monolitico oppure multistrato non connessa può notevolmente influenzare la resistenza statica della struttura muraria sotto sollecitazione sismica, come illustrato in Fig. 4.2-16.

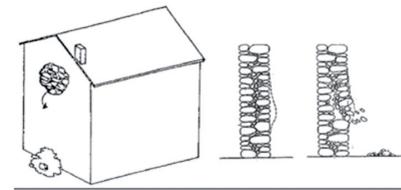
Gli edifici di pietra a secco della Val d'Ossola sono altresì carat-



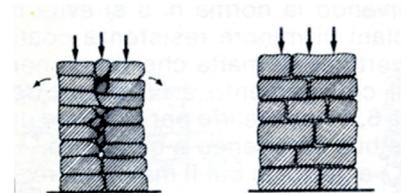
4.2-16a



4.2-16b



4.2-13



4.2-14

Figg. 4.2-13 e 4.2-14 - Differenti comportamenti statici tra tessitura monolitica e muratura caotica non ammorzata trasversalmente

Fig. 4.2-15 - Importanza del comportamento monolitico della tessitura muraria ai fini di una migliore resistenza della parete ad azioni ortogonali

Fig. 4.2-16 - a) Confronto della risposta statica di quattro tessiture murarie diverse, da quella compatta e monolitica fino a quella più caotica e disomogenea (multistrato); b) Particolare di una buona tessitura in pietra a secco presso Veglio.

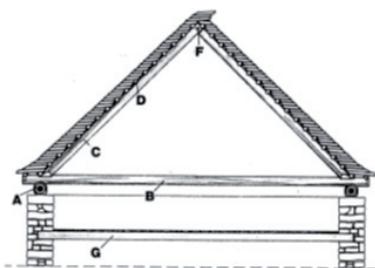


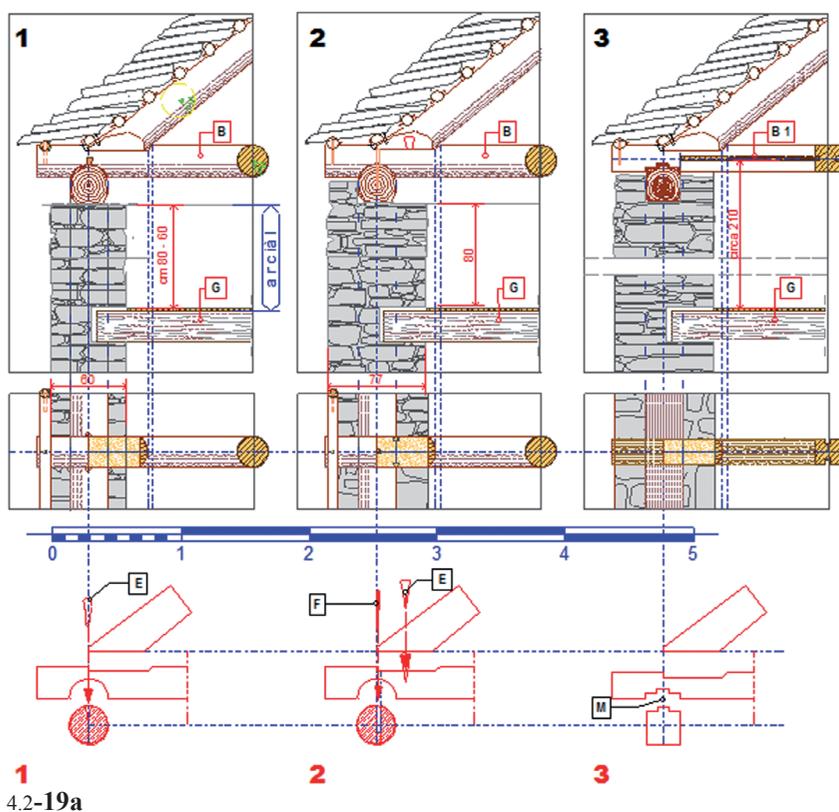
Fig. 4.2-17 - Elementi tipologici e strutturali del sistema di copertura a *piode*.

teristici per le loro pesanti coperture di *piode*. La struttura del tetto è costituita da capriate di legname, spesso tondo, di larice o castagno. La Fig. 4.2-17 ne illustra il funzionamento statico come una struttura costituita da dormienti (A), tiranti (B), puntone (C), correnti orizzontali (D) e caviglie di collegamento (F). La descrizione approfondita e dettagliata della composizione strutturale è rimandata al capitolo 4.5. Queste coperture sopportano carichi enormi, dell'ordine di 4-5 quintali ogni metro quadro di peso proprio, più i carichi spesso asimmetrici della neve (la neve bagnata pesa 9-10 quintali al metro cubo) e quelli dinamici prodotti dal vento e dal sisma. Le falde del tetto si avvicinano più ad un'apparecchiatura muraria a "falsa volta" che ad un semplice strato di copertura. Il materiale di copertura è costituito da lastre di pietra (in ossolano *piode*) di gneiss di circa 60-100 centimetri di lunghezza per 40-60 centimetri di larghezza, spesse dai 5 ai 10 centimetri. Una *pioda* pesa circa 50 chilogrammi, per coprire un solo metro quadrato ce ne vogliono da sette a otto. Occorrono dai 3 ai 4 metri quadri di *piode* per formare 1 metro quadro di coperto. Il tetto tradizionale ossolanoticese non è formato da lastre adagiate secondo la pendenza del tetto e disposte su di un assito, bensì le *piode* sono posate quasi in orizzontale come se formassero un muro a secco, rifinito, inclinato e armato con legno.

Il sistema statico spaziale costituisce una capriata reticolare come illustrato in Fig. 4.2-18, dove in alcuni esempi si trovano anche dei controventi di falda. Le capriate centrali sono sempre collegate a due controventi che puntano nel medesimo verso della chiusura del nodo a "mezzo legno" del colmo; se così non fosse, quando i controventi lavorano tenderebbero ad aprire il nodo di colmo tra puntone e puntone (l'unione a mezzo legno è chiodata con un perno passante di legno maggiociondolo). In Fig. 4.2-19 sono illustrate le diverse tecniche costruttive rilevate per un efficace collegamento delle strutture della capriata sul dormiente inferiore. Nell'esempio 1 si evidenzia l'alternanza del controvento sul tirante e il sottostante solaio ligneo; l'esempio 2 è



Fig. 4.2-18 - Esempio di capriata lignea che sorregge il manto di *piode* (Veglio).



4.2-19b

Fig. 4.2-19 - (a, b) Sistema di appoggio e incastro della capriata sul dormiente.

analogo al precedente con la sola differenza di possedere un dente sommitale di muratura; nell'esempio 3 il dormiente è squadrato e inglobato interamente nella muratura sommitale, costituendo un vero e proprio "cordolo". Infatti una delle carenze di queste tipologie costruttive è l'assenza di un efficace cordolo sommitale che possa meglio legare le pareti e la pesante copertura. Anche se la tipologia di copertura non è



4.2-20

Fig. 4.2-20 - Esempio di solaio con travi in legno (orditura principale), travicelli (orditura secondaria) e tavolato semplice (Veglio).

staticamente spingente per la presenza della catena, tuttavia ai fini di un migliore comportamento sismico occorre prevedere l'inserimento di un cordolo sommitale, dalle caratteristiche non invasive e compatibili con la tipologia muraria storica, per "cerchiare" e legare meglio le pesanti murature tra di loro e queste con la struttura di copertura.

I solai sono costruiti prevalentemente con travi in legno e soprastante tavolato semplice, come visibile in Fig. 4.2-20. Al di là dello stato di degrado e abbandono che ha generato notevoli inflessioni delle orditure principali e secondarie, risulta evidente che tale tipologia di solaio non può costituire un efficace diaframma per la corretta distribuzione delle azioni orizzontali verso le pareti di controventamento, a causa della sua scarsa rigidezza. Esso necessiterà di compatibili ed efficaci tecniche di rinforzo (descritte al capitolo 4.6) con lo stesso materiale e con l'eventuale ausilio dell'acciaio per garantire un adeguato collegamento dell'intero solaio alle murature perimetrali e svolgere pertanto la funzione di solaio rigido.

Le fondazioni di questi edifici sono superficiali - date le esigue altezze che li contraddistinguono - e sono a tipologia continua della stessa muratura che caratterizza le pareti di elevazione.

4.2.3 - Meccanismi di danno

Il collasso delle costruzioni di muratura avviene in genere per perdita di equilibrio di porzioni strutturali piuttosto che per il raggiungimento della tensione di rottura del materiale. Il DM 14 gennaio 2008, come illustrato anche in Fig. 4.2-21, stabilisce al punto 8.7.1 la distinzione fra:

- meccanismi locali: *quelli che interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione e sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti tra pareti e orizzontamenti e fra i pannelli murari;*
- meccanismi globali: *quelli che coinvolgono l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano.*

Il comportamento delle murature storiche, oltre che dalle caratteri-

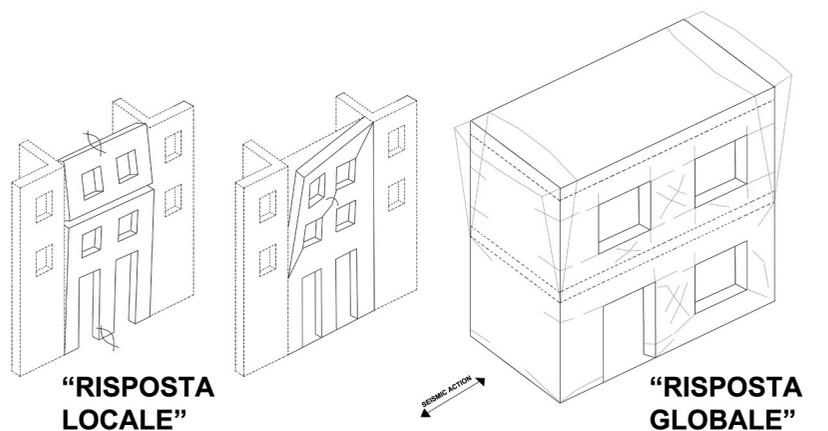


Fig. 4.2-21 - Distinzione tra risposta locale e globale di danneggiamento dell'edificio in muratura.

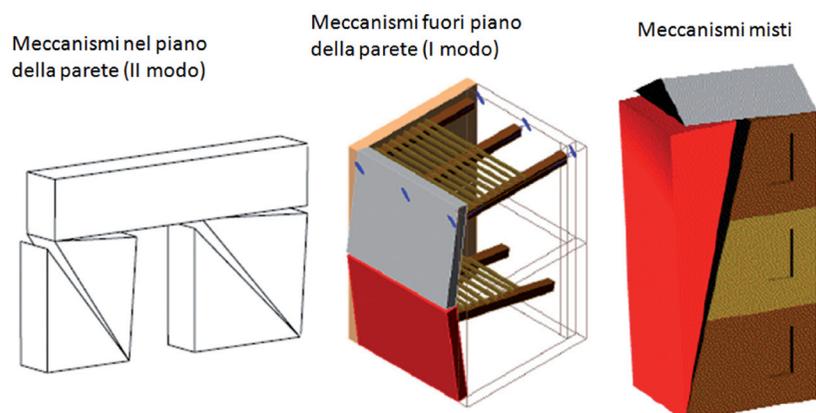


Fig. 4.2-22 - Meccanismi di danno per azioni orizzontali.

4.2-22

stiche dei singoli elementi costruttivi, è influenzato dal sistema delle connessioni verticali e orizzontali, la cui presenza può garantire il comportamento scatolare d'insieme e tenere unito l'intero organismo strutturale in condizioni statiche e dinamiche. Le connessioni migliorano il funzionamento dei vincoli, trasformandoli da monolateri a bilateri, ossia da elementi capaci di esercitare un'azione di solo contrasto a dispositivi capaci anche di trattenere e quindi di assicurare una resistenza a trazione. La maggior parte delle carenze strutturali rilevabili nell'edilizia storica derivano proprio dall'assenza o dalla scarsità della capacità di contrasto dei vincoli. In campo sismico si distinguono pertanto due differenti modalità di danneggiamento, illustrati in Fig. 4.2-22, la cui attivazione dipende molto dal grado di comportamento scatolare dell'edificio murario.

I meccanismi di danno di modo I si innescano nelle pareti murarie investite da azioni sismiche ortogonali che tendono a produrre il ribal-



Fig. 4.2-23 - Lesione per compressione (Torre di Beura-Cardezza).

4.2-23

tamento; questo avviene quando tali pareti non sono sufficientemente legate a quelle ortogonali o quando la mancata azione di diaframma rigido del solaio comporta un valore molto elevato di azione sismica ortogonale, incompatibile con la resistenza della parete investita. La vulnerabilità sismica dell'edificio risulta fortemente condizionata dai meccanismi di danno di primo modo, molto frequenti e responsabili di dissesti rovinosi: il loro controllo rappresenta il primo obiettivo di qualsiasi intervento di prevenzione.

I meccanismi di modo II interessano invece le pareti sollecitate da azioni sismiche complanari. Si innescano facilmente ma in genere comportano valori di moltiplicatore di collasso elevati. Il muro lesionato dall'azione orizzontale agente nel suo piano scorre su se stesso o ruota rispetto ad un punto di cerniera per effetto dell'azione sismica. Per evitare che i meccanismi di secondo modo siano rovinosi è necessario che la tessitura muraria possieda un regolare ammorsamento trasversale. Se il muro è eseguito secondo le regole dell'arte, tale modalità di danno può essere definita duttile, in analogia con le costruzioni di cemento armato e acciaio: le lesioni nelle pareti murarie possono raggiungere la larghezza di diversi centimetri, senza produrre pericolose perdite di equilibrio.

Di seguito sono illustrati alcuni esempi di danneggiamento delle murature a secco. Innanzitutto, come visibile in Fig. 4.2-23, il danneggiamento può avvenire anche per il superamento della resistenza a compressione per carichi verticali, spesso dovuta a fenomeni di instabilità pressoflessionale generati dalla mancanza di solai intermedi di collegamento.

In Fig. 4.2-24 è illustrato un classico esempio di ribaltamento della parete fuori dal piano, dovuto a elevati valori di azioni sismiche ad essa ortogonali poichè l'elevata deformabilità dei solai non ha garantito una

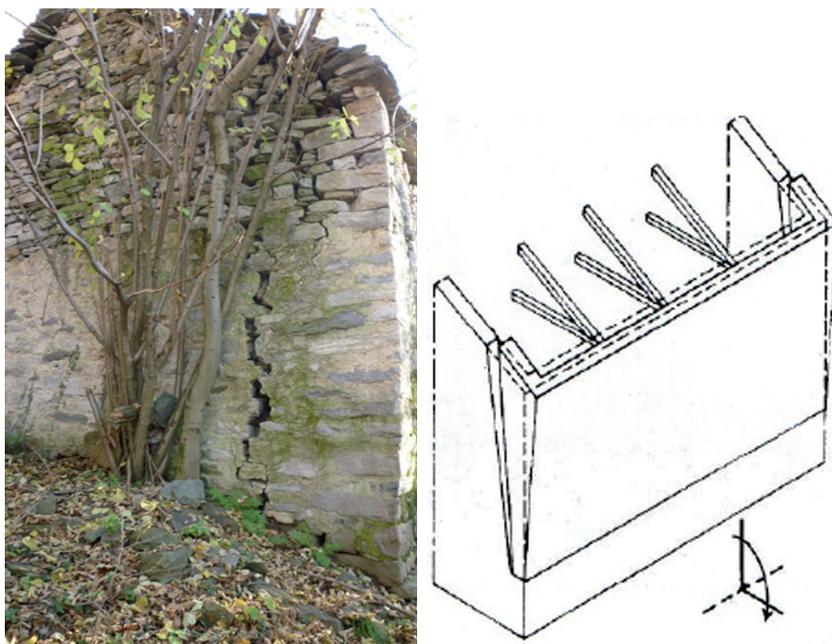


Fig. 4.2-24 - Foto e schema di ribaltamento fuori dal piano (Montecrestese).



4.2-25a



4.2-25b

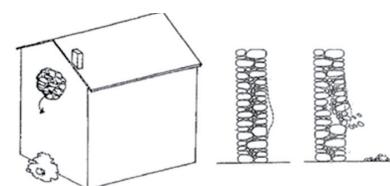
azione di diaframma, alla mancanza di adeguati collegamenti tra le pareti.

Medesima situazione è rilevabile nelle Figg. 4.2-25a-b-c e 4.2-26 dove la causa principale è anche la grande decoesione della tessitura muraria che conferma inequivocabilmente la scorporazione dell'edificio strutturale in macroblocchi da analizzare dal punto di vista cinematico. Un'altra tipologia di danno ricorrente può essere quella di flessione verticale o orizzontale che interessa il pannello murario tra due vincoli (solai sufficientemente collegati alle pareti o presenza di catene di trattenuta), come visibile nell'esempio della Torre di Beura-Cardezza in Fig. 4.2-27.

L'assenza di cordoli sommitali e la carenza di efficaci collegamenti tra le murature può gravemente contribuire al ribaltamento a cuneo come descritto in Fig. 4.2-28 quando si ha la presenza di un solaio ligneo con travi non vincolate efficacemente alle murature e pertanto



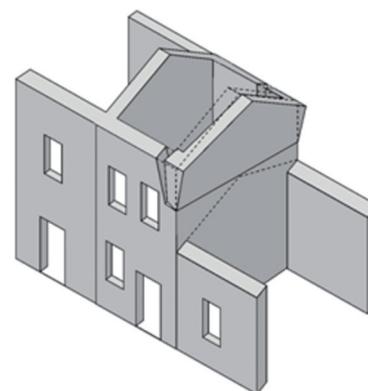
4.2-26a



4.2-25c

Figg. 4.2-25 - Ribaltamento fuori dal piano. a) Crevola d'Ossola; b) Montecrestese; c) Schema illustrativo.

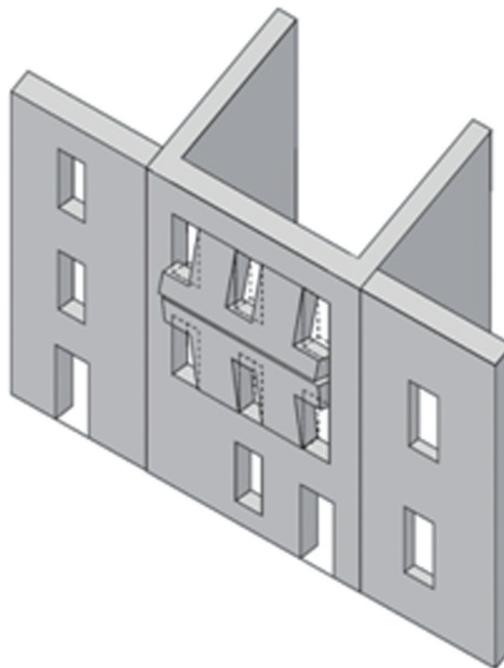
Figg. 4.2-26 - Foto (a) e schema illustrativo (b) del ribaltamento fuori dal piano del timpano presso la Torre dei Lossetti di Beura-Cardezza.



4.2-26b



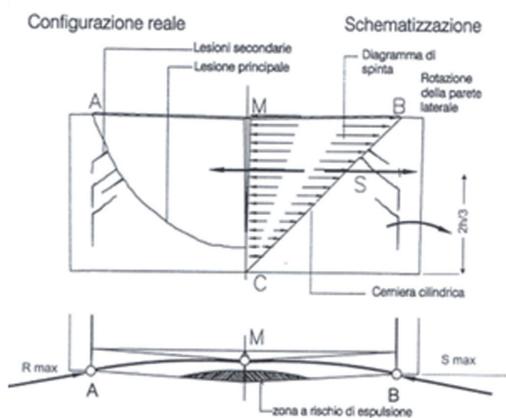
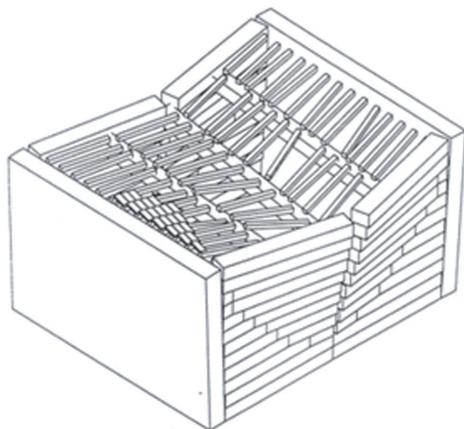
4.2-27a



4.2-27b

Figg. 4.2-27 - Foto (a) e schema illustrativo (b) del danneggiamento per flessione verticale e/o orizzontale sulle pareti della Torre dei Lossetti di Beura-Cardezza.

Fig. 4.2-28 - Esempio di ribaltamento sommitale di una porzione di parete generata dalle spinte e dallo sfilamento del solaio ligneo o dalla copertura sommitale.



4.2-28



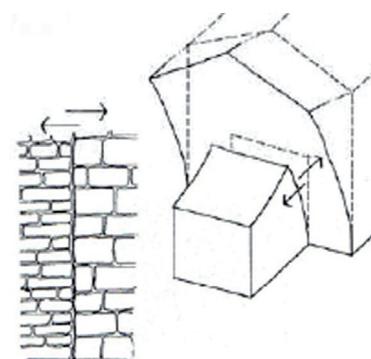
4.2-29



4.2-30

soggette allo sfilamento. Tale situazione comporta anche il crollo del solaio stesso con grave situazione per la conservazione interna dell'edificio. La presenza di alcuni semplici tiranti può già contribuire a contrastare e limitare il danneggiamento collegato a tale vulnerabilità.

Non meno importante è anche l'analisi dell'interazione tra edifici adiacenti, spesso non ammortati nelle diverse fasi di edificazione, come visibile nelle Fig. 4.2-29-30-31. In occasione di un evento sismico si possono instaurare eventuali fenomeni di martellamento soprattutto se i solai degli edifici si trovano a differenti livelli.



4.2-31

4.2.4 - Principi di miglioramento sismico

Alla luce dei fallimenti, oramai accertati dagli ultimi eventi sismici, di tecniche invasive basate sulla demolizione di solai e tetti lignei esistenti con la sostituzione di analoghe strutture di cemento armato che hanno portato soltanto a comportamenti ibridi, gli autori desiderano riflettere su soluzioni del tutto compatibili con il fabbricato storico e con il suo originario schema strutturale. Al termine "adeguamento" che spesso ha comportato interventi con materiali inadeguati che nulla hanno a che fare con la tipologia costruttiva e con i caratteri connotanti degli edifici storici, finalmente le "Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato" (Direttiva del 9 febbraio 2011) hanno confermato l'esigenza per il costruito storico di fermarsi al solo termine "miglioramento" nei confronti del comportamento strutturale, mediante riparazioni minime non invasive. Per quanto possibile, la riabilitazione strutturale non deve stravolgere la condizione originaria di equilibrio. La maggior capacità di assorbimento delle sollecitazioni sismiche è stata dimostrata da quelle murature, orizzontamenti, coperture (anche lignee) che erano state ben realiz-

Fig. 4.2-29, 4.2-30 e 4.2-31- Foto e schema descrittivo di possibili vulnerabilità sismiche derivanti dalla mancanza di ammortamento tra edifici adiacenti (Veglio).

manufatto, contenendone il più possibile l'estensione ed il numero, e comunque evitando di alterare in modo significativo l'originale distribuzione delle rigidità negli elementi. Gli interventi dovranno, per quanto possibile, rispettare la concezione e le tecniche originarie della struttura, nonché le trasformazioni significative avvenute nel corso della storia del manufatto.

Nei successivi capitoli saranno descritti, per ogni tipologia strutturale, gli interventi che gli autori propongono come ventaglio di possibili soluzioni per il miglioramento sismico degli edifici in pietra a secco, ricordando che nella pratica non esiste "la migliore tecnica in assoluto" bensì quella che in rapporto con le caratteristiche specifiche dell'edificio e delle sue potenziali vulnerabilità rappresenta la migliore soluzione nei confronti anche della conservazione del valore storico-architettonico del manufatto.

BIBLIOGRAFIA Cap. 4.2

CANGI G., *Manuale del recupero strutturale e antisismico*, DEI, Roma 2005

CIRCOLARE 2/02/2009 n.617, *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008*, Gazzetta ufficiale 26/02/2009 n. 47. Ministero delle Infrastrutture: Roma, 2009.

D.M. 14/01/2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*. Gazzetta ufficiale 04/02/2008 n. 29. Ministero delle Infrastrutture: Roma, 2008



4.3-1

Fig. 4.3-1. Veglio di Montecrestese. Muro in stato rudereale: sono bene evidenti sia l'impostazione a doppio paramento (interno ed esterno) sia la presenza di elementi di collegamento (in senso orizzontale) per lo spessore della muratura (*diatoni*).

Fig. 4.3-2 - Veglio di Montecrestese. Muratura realizzata con scapoli di pietra semi lavorati, eretta con contemporaneità di azione tra interno ed esterno. I vuoti tra i blocchi grandi sono stati colmati con piccoli scapoli o frammenti di lavorazione. In questo caso, la fotografia documenta l'assenza di *diatoni*.



4.3-2

4.3 - MURATURA DI PIETRA

RICCARDO NELVA, MARCO ZERBINATTI

4.3.1 - Caratteri costruttivi e classificazione delle murature

Per la conservazione e per le finalità di recupero descritte, l'architettura rurale oggetto di studio necessita di adeguate tecniche per interventi di: manutenzione, consolidamento di murature di pietra (prevalentemente a secco), inserimento di aperture (per soddisfare requisiti normativi), concomitanti inserimenti di strutture orizzontali (solai mancanti), ripristino di parti murarie crollate o compromesse.

Nello sviluppo della ricerca sono in corso di definizione insiemi sistematici di soluzioni tecniche e di indicazioni operative allo scopo destinate, in modo da favorire il recupero di tali edifici con nuovi usi e nuove funzioni. Per procedere in tale direzione, è stato necessario definire una classificazione delle murature più diffuse in relazione alle caratteristiche costruttive.

I criteri di analisi dei diversi generi di muratura, sono basati sui seguenti elementi di valutazione:

1) piani di posa orizzontali della pietra (giunti orizzontali). I corsi orizzontali possono essere rigorosamente rispettati, parzialmente rispettati o non rispettati;

2) sfalsamento dei giunti verticali, con piani di posa orizzontale bene individuabili. È opportuno specificare che lo sfalsamento dei giunti verticali, buona regola tecnica del costruire nei muri di laterizio, nei muri di pietra va intesa come sfalsamento sia rispetto agli elementi superiori e inferiori dello stesso paramento murario, sia come sfalsamento rispetto ai conci di pietra che compongono il paramento murario sulla faccia opposta della muratura nel caso di murature a doppio paramento (Fig. 4.3-1). Infatti, bisogna ricordare che la procedura di costruzione dei muri di pietra studiati, portava spesso alla esecuzione in contemporanea, da parte di due muratori, del paramento interno e di quello esterno lungo il perimetro dell'edificio, in modo da farlo crescere contemporaneamente;

3) conformazione e dimensione degli elementi resistenti, per esempio:

3.1 blocchi squadrati lavorati (con lavorazione mediamente o finemente curata, ma con evidenti i segni del trattamento degli scalpelli sulle facce di lavorazione); sono i blocchi più regolari per forma e classi di dimensione,

3.2 blocchi "sbozzati", semilavorati da spacco; si tratta di blocchi di cava sui quali le lavorazioni sono ridotte al minimo, prevalentemente per conferire dimensioni e conformazione adatte a una determinata collocazione nell'edificio,

3.3 blocchi a spacco impiegati in opera tal quali, senza alcuna la-

vorazione aggiuntiva atta a modificarne dimensioni o geometrie, compresi piccoli elementi (“scapoli”) atti a colmare o riempire gli spazi tra gli elementi maggiori.

Ingranamento trasversale con presenza di *diatoni* (elementi di maggiore dimensione, con funzione di legatura, attraversanti la sezione muraria per tutto lo spessore, in particolare presenti presso le aperture o nei risvolti angolari delle maniche degli edifici), oppure parziale ingranamento tra elementi con conci di pietra con sovrapposizione a 2/3 dello spessore della sezione muraria.

Sulla base di questi quattro criteri di valutazione delle caratteristiche costruttive, sono state definite le caratteristiche di quattro grandi insiemi di tipologie murarie, così classificate:

A) murature con blocchi squadrati accuratamente lavorati¹, caratterizzate da piani di posa orizzontali ben delineati e regolari, con sfalsamento dei giunti verticali, con blocchi sfalsati negli spigoli e nei risvolti angolari, presenza di diatoni parziali (a 2/3 dello spessore del muro) oppure passanti (questi ultimi poco frequenti o sporadici). I giunti di malta sono sottili. Cfr. Figg. 4.3-3 e 4.3-4, rispettivamente relativi alla torre campanaria di Montecrestese e alla base di un campanile non terminato presso Vanzone con S. Carlo);

B) murature con blocchi sbazzati (semi lavorati) da pietra a spacco (provenienti da cave o da “trovanti” = massi erratici) con le seguenti varianti:

B.1 – murature connotate dalla presenza di grandi cantonali (*pietre*

Nota 4.3-1 - Le murature con questa lavorazione sono definite da Giovanni Chevalley come murature realizzate con “pietra da taglio” [Cfr. CHEVALLEY G., *Elementi di Tecnica dell'Architettura. Materiali da costruzione e grosse strutture*, Torino, 1924, p. 108].

Fig. 4.3-3 - Montecrestese. La torre campanaria romanica di borgata Chiesa è stata rinfasciata con grandi blocchi regolari all'inizio del XVI secolo [cfr. BERTAMINI T., *Storia di Montecrestese*, p. 209], in analogia con altri campanili del territorio. Oggi il paramento si presenta costituito esternamente da grandi elementi di “pietra da taglio” e giunti di malta relativamente sottili.

Fig. 4.3-4 - Vanzone con San Carlo (Valle Anzasca). Base della torre campanaria incompiuta presso il cimitero. La costruzione è stata fondata su affioramenti rocciosi e il paramento murario della parte inferiore è caratterizzato da blocchi segati molto regolari, giunti di allettamento sottili e perfettamente orizzontali.

Figg. 4.3-5 e 4.3-7 - Vanzone con San Carlo. Fianco ovest della chiesa Parrocchiale. Le cappelle aggettanti presentano cantonali lavorati in modo grossolano. Il resto del paramento murario è costituito da elementi più piccoli a spacco, non lavorati. Sullo stesso lato, un altro avancorpo presenta lo stesso genere di muratura, ma eseguita con blocchi più grandi e meno lavorati a guisa di “pietra da cantone”. Contrariamente alle cappelle precedenti (solo



4.3-3



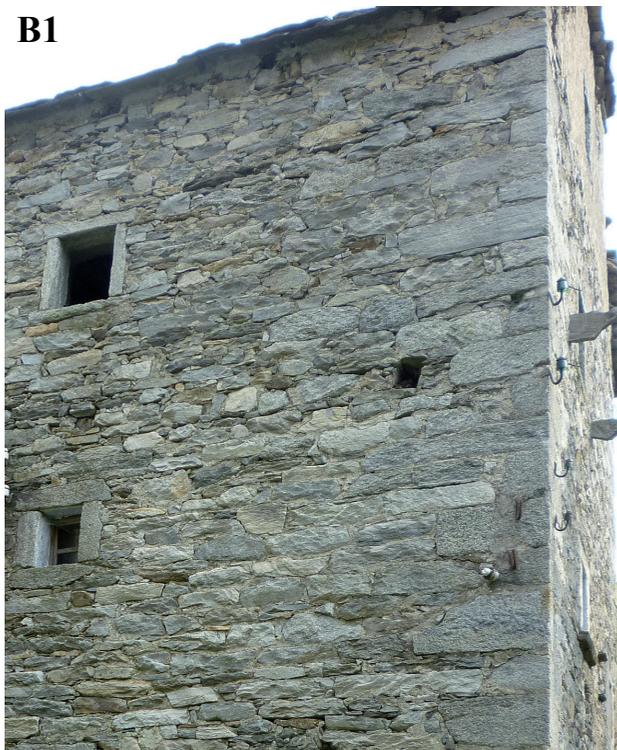
4.3-4



4.3-5

puntualmente collegate al muro della navata), in questo caso il muro è ammassato con quello principale della chiesa.

Fig. 4.3-6 - Veglio di Montecrestese. Edificio residenziale con cantonali rifiniti in modo grossolano, ma ben tagliati per comporre uno spigolo regolare al risvolto della muratura. Anche in questo caso il resto del paramento è stato eretto con elementi a spacco di dimensioni eterogenee e contenute.



4.3-6

da cantone) più o meno rifiniti, nelle quali la tessitura intermedia (tra i cantonali) è stata eseguita con elementi più piccoli a spacco. I piani di posa orizzontali sono normalmente bene individuabili, frutto delle modalità esecutive del doppio paramento (interno ed esterno) eretto contemporaneamente. Questo genere di muratura è stato osservato in particolare su diversi edifici religiosi della Valle Anzasca. La variante con tutti gli elementi di pietra aventi dimensioni proporzionalmente più piccole coincide con il tipo C.

B.2 – murature con piani orizzontali bene individuabili ma senza la presenza di più grosse pietre angolari o “cantonali”, con blocchi di grandi dimensioni (di lunghezza fino a 50 – 60 cm, altezza pari a 20-30 cm, spessore tra i 20 ed i 30 cm);

B.3 – murature con blocchi a spacco di dimensioni e forme non regolari, con piani di posa orizzontali abbastanza evidenti, sebbene non sempre ben regolari. In questi casi, gli spigoli e i risvolti angolari della manica sono risolti con l’incrocio degli elementi lapidei correnti, non con i cantonali. Le murature sono in prevalenza più grossolane che nel caso B.1, sebbene sempre costruite con la procedura della esecuzione contemporanea del doppio paramento (Cfr. figg. 4.3-11, 4.3-12 e 4.3-13);

C) muratura “ottocentesca”, costruita con blocchi cantonali semi-lavorati, più regolari negli spigoli che in prossimità delle aperture; il paramento murario è abbastanza eterogeneo, è realizzato con pietre di più piccola dimensione rispetto alle categorie precedenti, anche con l’impiego di scaglie e di elementi derivati dalla lavorazione di pietre



4.3-7



4.3-8

più grandi. Queste murature mostrano dei ricorsi orizzontali di regolarizzazione in prossimità di aperture (funzionali all'inserimento di architravi per porte e finestre) e di solai (funzionali alla realizzazione di appoggi il più possibile regolari per orizzontamenti interni. Figg. 4.3-14 e 4.3-15);

D) muratura realizzata con blocchi a spacco o “trovanti” eterogenei, per forma e per dimensione; i blocchi non appaiono lavorati, bensì utilizzati tal quali dall'estrazione. La muratura non ha, in genere, dei corsi orizzontali facilmente individuabili (talvolta accennati o sporadici) e presenta dei blocchi di più grande dimensione nei risvolti angolari. Delle murature analizzate è, complessivamente, la meno raffinata e dal punto di vista statico la meno affidabile (Figg. 4.3-16 e 4.3-17).

La classificazione operata è strumentale alla definizione di soluzioni tecniche di intervento; pertanto la sua validità è limitata al contesto nel quale è utilizzata. In relazione a ciò, gli aspetti sperimentali sulle murature, siano essi di carattere esplorativo (come per esempio l'inserimento di capochiave e prove di trazione) o di approfondimento analitico per la definizione di modelli di comportamento di questi muri di pietra, richiedono ulteriori approfondimenti specifici, attualmente in fase di studio.

Tuttavia, questa parziale classificazione redatta (non esaustiva e ampliabile) trova un parziale riscontro nella manualistica storica, ove possiamo reperire chiari e attenti riferimenti ai modi costruttivi tradizionali in questione. Per esempio è il caso del testo di Giovanni Chevalley² nel quale l'individuazione di “categorie” è analoga a quella qui presentata, sebbene i termini propri o quelli gergali attribuiti talvolta parzialmente differiscono.



4.3-9

Figg. 4.3-8 e 4.3-9 - Frazione Pontetto di Montecrestese. Due esempi di edifici caratterizzati da muri con blocchi di grandi dimensioni lavorati in modo grossolano, ma senza cantonali. I corsi orizzontali sono ben individuabili; in numerosi casi non sono completati dalla malta (muratura a secco).

Fig. 4.3-10 - Alpe Soi. Edificio con lo stesso genere di muratura osservata a Pontetto (classificata come B2), ma con blocchi un po' più grandi.

Figg. 4.3-11 e 4.3-12 - Pianezza di San Carlo. Edifici realizzati con blocchi a spacco o “trovanti” mediamente di grandi dimensioni (più grandi nei risvolti angolari). I corsi orizzontali non sono regolari, per lo più sono accennati. Questo genere di muratura (classificato come B3) è il meno raffinato.

Fig. 4.3-13 - Frazione Piane di Bannio Anzino. Esempio di edificio rustico del genere B3, caratterizzato dalla presenza di “trovanti” di grandissime dimensioni.

Nota 4.3-2 - CHEVALLEY G., cit.



4.3-10



4.3-11



4.3-12



4.3-13



4.3-14



4.3-15

Figg. 4.3-14 e 4.3-15 - Veglio di Montecreste e Alpe Biscià (Craveggia). Due esempi di muratura “ottocentesca” costituita con cantonali semilavorati e paramento murario abbastanza eterogeneo. Le pietre del paramento sono generalmente più piccole che nei casi sinora illustrati.

Figg. 4.3-16 e 4.3-17 - Vanzone con San Carlo (IT) e San Carlo in Val Bavona (CH). Esempi di murature costruite con “trovanti” o blocchi a spacco di forma e dimensioni eterogenee. I ricorsi orizzontali talvolta sono bene individuabili, altre volte non sono presenti. Per ottenere un effetto di maggiore planarità gli spazi tra i giunti e i blocchi erano riempiti con piccoli elementi di scarto. I giunti di malta sono talvolta molto più spessi rispetto alle murature di tipo C.



4.3-16



4.3-17

4.3.2 - Tecniche di intervento

Il recupero degli edifici tradizionali montani richiede il soddisfacimento di requisiti normativi attuali; questi possono essere più o meno stringenti, in rapporto alle diverse finalità e ai quadri esigenziali definiti con i progetti di recupero.

Per esempio il raggiungimento di determinati valori di resistenza in relazione a interventi di miglioramento del comportamento all'azione sismica può essere raggiunto - o meno - in relazione a diversi fattori, tra cui i caratteri costruttivi (per esempio: tessitura delle murature, solai di legamento orizzontali, presenza di strutture spingenti, conformazione e possibile comportamento "scatolare" delle membrature verticali portanti).

Tuttavia una delle ragioni che rende alquanto difficoltoso il raggiungimento di determinati valori di resistenza (per l'adeguamento all'azione sismica, in particolare) va posto in relazione con la necessità di conservare i caratteri connotanti del patrimonio in questione (in rapporto ai valori architettonici e ambientali). La necessità di temperare esigenze tra loro anche contrastanti, impone al progettista la definizione di una gerarchia degli obiettivi da raggiungere (basata su sensibilità progettuale, solida preparazione e vincoli normativi cogenti).

Per tali ragioni sembra evidente che per salvaguardare i valori storici e architettonici in gioco siano da prediligere gli interventi di miglioramento strutturale quando l'adeguamento richiede interventi eccessivamente invasivi³. Considerato che gli interventi di miglioramento strutturale sono attuabili senza riserve sugli edifici vincolati secondo il Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 *Codice dei beni culturali e del paesaggio*, occorre fare chiarezza su ciò che si intende, in senso generale, per *vincolo*⁴, poiché non è stato sufficientemente dibattuto se i vincoli paesaggistici, ambientali o analoghi possono assumere la stessa rilevanza per gli effetti applicativi della normativa antisismica.

Il comportamento complessivo degli edifici in muratura agli effetti delle azioni sismiche è illustrato al capitolo 4.2.

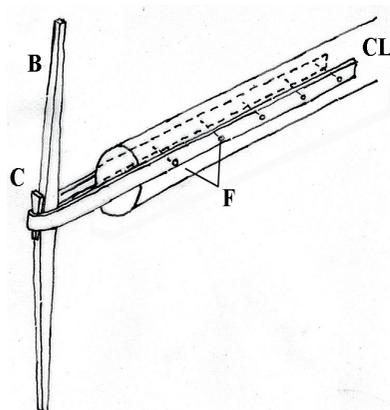
I principali interventi attuabili sugli edifici in questione per avvicinarli ad un comportamento di tipo scatolare, migliorandone complessivamente anche il comportamento sismico, sono illustrati nei paragrafi seguenti.

4.3.2.1 - Controventamenti per migliorare l'effetto scatolare degli edifici

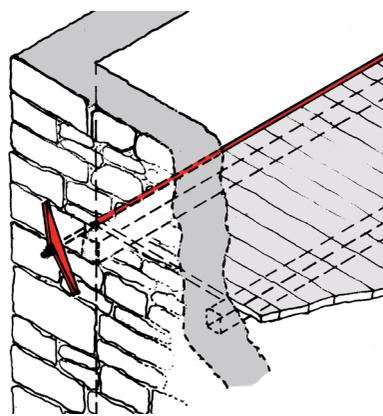
Lo scopo di questi interventi è quello di realizzare dei collegamenti sufficientemente rigidi tra le strutture verticali in modo da conseguire un comportamento il più possibile "scatolare", evitando pericolosi danneggiamenti delle strutture portanti come i ribaltamenti fuori dal piano di giacitura verticale di murature o distacchi di murature di facciata in corrispondenza di muri di controvento (per rotture a taglio o a

Nota 4.3-3 - Questo argomento è trattato in modo approfondito dal D.P.C.M. 9 febbraio 2011, *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008*. Direttiva Presidente Consiglio dei Ministri, alla quale si rimanda.

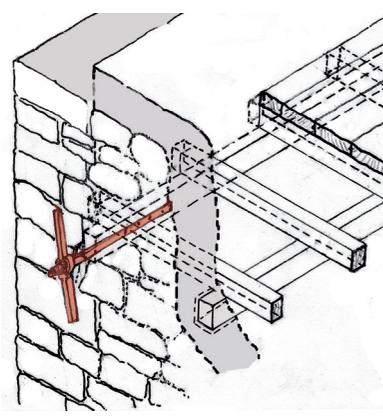
Nota 4.3-4 - Nelle aree oggetto di studio vi sono zone sottoposte a vincoli di tipo paesaggistico con richiami al D. Lgs 42/2004, altre comprese all'interno dei confini di Parchi Nazionali di grande importanza. Trattando qui di edifici inseriti in ambienti di elevato pregio fortemente connotati dalle costruzioni stesse, il problema di individuare quale genere di intervento sia più indicato privilegiare si evidenzia in tutta la sua rilevanza.



4.3-18



4.3-19



4.3-20

trazione), per esempio. In tal senso è importante provvedere al posizionamento di tiranti (o catene) vincolati alle murature. Le catene possono essere metalliche, vincolate con appositi capochiave alle murature da legare insieme; oppure le catene possono essere gli stessi travi portanti di solai lignei presenti nell'edificio adeguatamente collegati ai muri sempre mediante dei capochiave. L'inserimento di tiranti metallici tra muri opposti, generalmente è risolto ponendo la catena in posizione orizzontale in corrispondenza dei solai. Il posizionamento prevede che i tiranti siano ortogonali ai muri di facciata, corrano in aderenza ai muri di controventamento ortogonali alla facciata, magari inclusi negli spessori dei solai interpiano ma con la libertà di deformarsi indipendentemente rispetto a questi (mediante l'uso di guaine o fodere). I capochiave di completamento del sistema hanno l'evidente scopo di distribuire la forza di trazione sulla muratura e possono essere circolari, quadrati o con forma "a paletto". Il loro posizionamento sulla facciata esterna deve essere tale da offrire la maggiore resistenza conseguibile, coinvolgendo una porzione di muratura più ampia e più resistente possibile⁵. L'effetto scatolare può essere raggiunto predisponendo una "maglia" di catene in posizioni ortogonali tra loro (a due a due).

Le travi dei solai come catene trasversali sono collegate di solito a capochiavi esterni a staffa, resi solidali ai fianchi delle travi laterali di collegamento alla trave.

4.3.2.2 - Prove esplorative di valutazione della resistenza delle murature in corrispondenza dei capochiave dei tiranti

Nell'ambito degli interventi per migliorare il comportamento statico degli edifici di pietra esistenti, particolarmente utile e diffuso è l'impiego di tiranti metallici come innanzi illustrato. È importante conoscere la resistenza dei diversi generi di muratura in corrispondenza delle teste dei tiranti, in modo da valutare la forza che può essere sviluppata dal tirante stesso.

Una prima valutazione è stata effettuata con prove sperimentali esplorative su edifici reali confrontando i risultati con valutazioni ana-

Fig. 4.3-18 - Un modo storico ricorrente di fissare un capochiave a una trave di solaio era quello di utilizzare staffe metalliche forgiate, piegate e inchiodate al trave ligneo. Spesso, con il permanere di condizioni di umidità nella muratura e la presenza di insetti xilofagi, questo sistema di fissaggio perdeva di efficacia a causa del degrado ligneo, rendendo vana la presenza del capochiave.

Fig. 4.3-19 - Esempio di inserimento di tirante con capochiave a paletto in prossimità di un muro di controvento, con solaio interno a orditura semplice.

Fig. 4.3-20 - Esempio di inserimento di capochiave su trave principale di solaio con doppia orditura.

Nota 4.3-5 -

(a) I capochiave a paletto sono solitamente posizionati in diagonale per entrare in contrasto con solai e muri interni di controventamento (fig. 4.3-19). Nel caso sia scelto l'utilizzo di questi capochiave, essi non dovranno essere posizionati:

- orizzontalmente, per evitare di trovarsi in corrispondenza di giunti di malta di allettamento,
- nemmeno verticalmente,

bensi dovranno essere inclinati tra 30° e 60° (circa 45°) per avere la reazione sia del muro di controvento sia del solaio interpiano.

(b) Con il capochiave a forma quadrata o circolare è opportuno predisporre delle nervature diagonali di rinforzo (fig. 4.3-21). Possibilmente occorre operare in modo da ottenere superfici omogenee di appoggio dei capochiave sui muri (evitando appoggi per punti); per conseguire tale risultato, se necessario occorre preliminarmente sigillare i giunti di muratura con malta e con scaglie di pietra (non solo malta, per forti spessori) per evitare accentuati fenomeni di ritiro e per ottenere una adeguata resistenza a compressione), sigillare i lembi laterali di contatto tra la piastra e la muratura (per evitare fuoriuscite di materiale dai lati) e colare nello spazio tra la piastra e il

muro malte fluide lievemente espansive, con adeguata resistenza meccanica a compressione (in relazione alle previsioni di progetto. Fig. 4.3-22)).

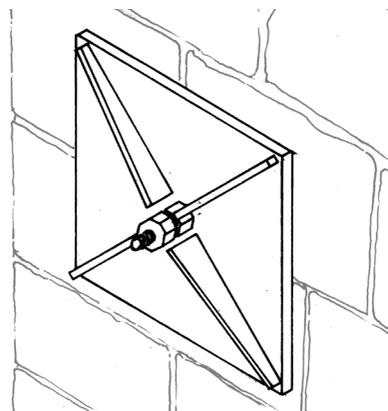
Il posizionamento delle catene metalliche può essere eseguito in alcuni modi fra loro alternativi. Tra i casi possibili sono proposti:

- con il posizionamento del tirante a filo del pavimento o al di sotto di questo. In tal caso, il tirante dovrà essere isolato dal sottofondo o dagli elementi che compongono la stratigrafia del pavimento, in modo da garantire la autonoma deformazione del tirante posto in opera,
- in pianta, nelle zone di innesto tra i muri verticali di controventamento ortogonali alla facciata, oppure in corrispondenza dei risvolti d'angolo delle facciate,

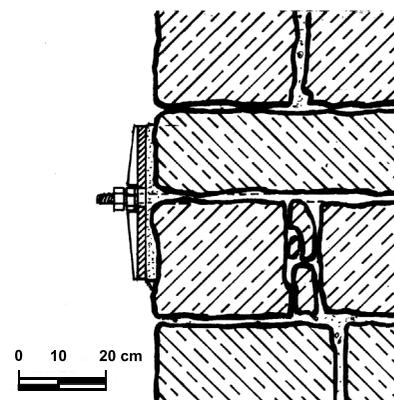
- sul piano verticale, in corrispondenza delle travi dei solai,

- nel caso delle volte di pietra, solitamente impiegate nelle parti interrato o seminterrate (per esempio, come strutture sopra le cantine) i tiranti possono essere inseriti in zona estradossale, nei rinfianchi,

La catena va sempre posizionata dove c'è un contrasto (non si mettono i capochiave nella zona centrale delle murature per evitare di indurre flessioni nella muratura stessa).



4.3-21



4.3-22

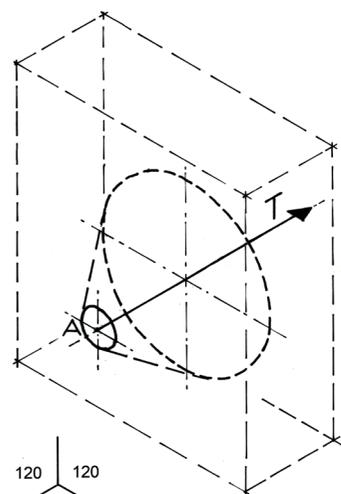
Fig. 4.3-21 e 4.3-22 - Esempi di inserimento di capochiave a piastra quadrata snervata.

Fig. 4.3-23a e 4.3-23b - Schematizzazione del solido teorico di distacco della muratura in prossimità del capochiave circolare soggetto ad una forza crescente di trazione T.

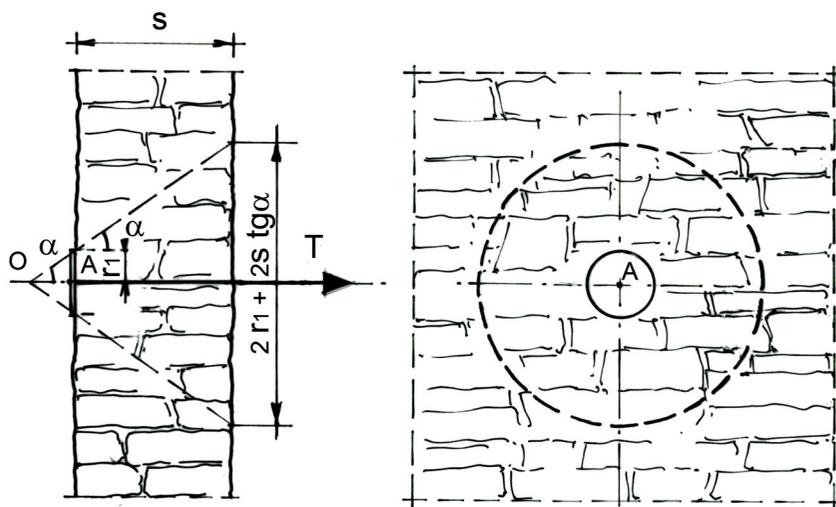
litiche. È stato scelto un tipo di tirante con capochiave circolare da applicare sulla superficie esterna di muri verticali e soggetto ad una forza orizzontale di trazione. Mastrodicasa⁴ ricorda che possono svilupparsi due fenomeni: il distacco per attrito tra i blocchi di pietra e il distacco per superamento della coesione tra i giunti di malta interposti tra i conci. I due fenomeni possono essere concomitanti.

Nel caso in oggetto è stato ipotizzato che il solo effetto che si oppone alla forza del tirante sia l'attrito tra i conci, poiché le murature esaminate o sono a "secco" o presentano solo parziali strati di malta poco consistente, posta in opera per chiudere le fessure e fermare le pietre piccole, ma non per avvolgere e collegare i blocchi lapidei più grandi.

Nel caso di murature abbastanza omogenee è plausibile l'ipotesi che applicando una forza crescente di trazione T al tirante si inneschi il distacco di una porzione di muratura con conformazione simile a un tronco di cono, con asse coincidente con il tirante, con base minore corrispondente al capochiave sulla superficie esterna del muro e base maggiore sul lato interno del muro (Fig. 4.3-23a e b). L'angolo di apertura del cono dipende dalla regolarità della muratura, dalla presenza dei giunti di malta, dall'ingranamento tra loro dei blocchi lapidei. Per



4.3-23a



4.3-23b

murature omogenee di mattoni o di blocchi regolari con giunti di buona malta, con elementi posti sfalsati e immorsati trasversalmente si può ipotizzare un angolo di apertura di 45° dall'asse di trazione⁶. Tenendo conto che su un elemento infinitesimo di superficie del tronco di cono di distacco della muratura incombe un carico verticale unitario σ_v il valore massimo di T è stato determinato con l'integrale estesa al primo quadrante ($0 \div \pi/2$) e a tutto lo spessore s del muro (poi per simmetria moltiplicata per 4), che ha portato alla seguente formula:

$$T = 2 \sigma_v \mu s (2 r_1 + s)$$

dove μ è il coefficiente d'attrito statico.

Se si segue il ragionamento che la forza T è proporzionale alla componente verticale (σ_v) del carico che agisce sulla superficie inclinata del tronco di cono (superficie rivolta verso l'alto e superficie rivolta verso il basso) si giunge alla precedente medesima formula, che considera l'area della proiezione ortogonale sul piano orizzontale della porzione tronco conica di distacco:

$$T = 2 \sigma_v \mu s [2r_1 + 2(r_1 + t)] / 2 = 2 \sigma_v \mu s (2r_1 + 2r_1 + 2t) / 2 = 2 \sigma_v \mu s (2r_1 + 2stg\alpha)$$

Nel caso si adotti un angolo di aperture del cono diverso da 45° la formula diventa:

$$T = 2 \sigma_v \mu A,$$

dove A è l'area del trapezio che è proiezione sul piano orizzontale del tronco di cono di strappo.

Sono state svolte tre prove esplorative su muri di edifici presso la frazione Veglio del Comune di Montecrestese, in Val d'Ossola. È stata realizzata una semplice apparecchiatura costituita da un capochiave circolare ($\varnothing = 2 r_1 = 25.0$ cm) collegato a un tirante filettato passante attraverso un foro ricavato nel muro in esame. È stata realizzata anche una struttura di contrasto costituita da profilati metallici collegati da una piastra, di lunghezza tale da non interferire con il cono di strappo ($L = 114.5$ cm) posizionata dal lato interno del muro. La forza di trazione è generata dalla rotazione manuale, con chiave, di un bullone in-



4.3-24

Nota 4.3-7 - Legenda:

σ_v ; σ = tensione di compressione verticale [N/mm²].

T = forza orizzontale di trazione [N]

μ = coefficiente di attrito statico [-]

f = rapporto $T / \sigma V A$, $f < \mu$ [-] A = area [m²]

s = spessore (del muro) [m]

r = raggio [m]

γ = peso specifico (muratura di pietra) [N/m³]

h = altezza [m]

Figg. 4.3-24-26 - Veglio, Montecrestese. Edificio ottocentesco oggetto della prima prova sui capochiave. La muratura è del genere C (cfr. Cap. 4.3.1)



4.3-25

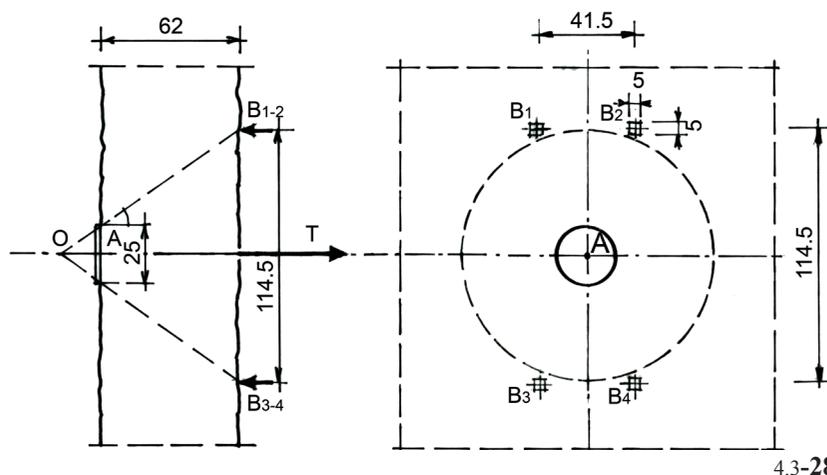


4.3-26



4.3-27

Fig. 4.3-27 - Veglio, Montecrestese. Esecuzione della seconda serie di prove, su muro non sormontato da sistema di copertura.



4.3-28

granato sulla barra filettata ed è stata misurata tramite cella dinamometrica ad anello Ø 31-16 mm (tipo KMR 200-HBM; incertezza di misura $\pm 2\%$).

La prima prova è stata svolta in corrispondenza del primo piano di un edificio a tre piani fuori terra costruito nel 1876 (Figura 4.3-24), con muratura spessa 55,0 cm e con un'altezza di muro sovrastante il punto di trazione A di $h = 500,0$ cm (Figg. 4.3-25 e 4.3-26). Poiché la muratura di pietra era piuttosto disomogenea e senza giunti di malta efficaci, è stato ipotizzato un tronco di cono di muratura strappata con un angolo rispetto all'asse del cono di circa 36° (rapporto semiapertura cono/spessore muro = 0.72). La forza massima applicata è stata di $T_A = 36,20$ kN (pari a 3620 daN) senza spostamenti delle pietre. La prova è stata interrotta per ragioni tecniche. Poiché la tensione media dovuta al peso del muro sovrastante è pari a:

$$\sigma_{VA} = \gamma \cdot h = 2300 \text{ daN/m}^3 \cdot 5,00 \text{ m} = 11500 \text{ daN/m}^2 = 1,15 \text{ daN/cm}^2,$$

$$\text{con un'area } A = 55,0 \cdot \left[\frac{(25 + (0,72 \cdot 55 \cdot 2) + 25,0)}{2} \right] =$$

$$55,0 \cdot (104,0 + 25,0) \cdot 1/2 = 3553 \text{ cm}^2,$$

la forza è:

$$T_A = 3620 \text{ daN} = 2 \cdot 1,15 \text{ daN/cm}^2 \cdot f \cdot 3553 \text{ cm}^2$$

e risulta $f = 0,44 < \mu$ (la forza applicata è inferiore alla massima forza di attrito statico e quindi $f < \mu$).

La seconda prova è stata eseguita con una strumentazione lievemente migliorata (con profilati a "C" e piedini di appoggio regolabili) (Figg. 4.3-27 e 4.3-28) su un muro di spessore $s = 62,0$ cm e tirante in un punto con muratura sovrastante di $h_A = 102,0$ cm. È stata raggiunta una forza $T_A = 16,20$ kN (pari a 1620 daN) con movimento di un blocco lapideo in uno dei quattro punti di contrasto B_1 con muratura sovrastante di $h_{B1} = 43,0$ cm.

$$\text{Con } \sigma_{VB1} = 2300 \cdot 0,43 = 989 \text{ daN/m}^2 = 0,0989 \text{ daN/cm}^2$$

e l'area $AB = [62,0 \cdot (44,6 + 44,6 + 5,0) \cdot 1/2] - [26,5 \cdot 36,5 \cdot 1/2] = 2597 \text{ cm}^2$, il coefficiente d'attrito è ricavabile dalla:

$$TB_1 = 1620/4 = 405 \text{ daN} = 2 \cdot 0,0989 \text{ daN/cm}^2 \cdot \mu \cdot 2597 \text{ cm}^2$$



4.3-29



4.3-30

e risulta $\mu = 0,79$.

La terza prova sperimentale (Fig. 4.3-29 e 4.3-30), con il tirante nel medesimo punto A della precedente prova ($h_A = 102,0$ cm dalla sommità del muro) ma con apparecchiatura posta orizzontalmente con punti B_{1-2} a $h_B = 81,5$ cm dalla sommità del muro, si è raggiunta una forza $T_A = 32,20$ kN (pari a 3220 daN). Non sono stati registrati spostamenti di pietre (la prova è stata interrotta per la deformazione di un piedino di appoggio). L'aderenza è raggiunta nel punto A con:

$$\sigma_{VA} = 2300 \text{ daN/m}^3 \cdot 1,02 \text{ m} = 2346 \text{ daN/m}^2 = 0,2346 \text{ daN/cm}^2$$

$$\text{Area AA} = \{[(44,7 \cdot 2) + 25,0 + 25,0] \cdot 1/2\} \cdot 62,0 = 4321 \text{ cm}^2,$$

La forza applicata è dunque:

$$T_A = 3220 = 2 \cdot 0,2346 \text{ daN/cm}^2 \cdot f \cdot 4321 \text{ cm}^2$$

con $f = 1,58 < \mu$ (la forza applicata è inferiore alla massima forza di attrito statico e $f < \mu$).

I valori dei coefficienti ottenuti nelle prove esplorative possono essere considerati in accordo con i valori che si ritrovano in bibliografia e possono essere presi in considerazione tenendo conto dei seguenti aspetti:

- Mastrodicasa⁸ riporta nei calcoli un coefficiente di attrito $\mu = 0,75$ per muratura generica e un angolo di strappo di 45° .

- Borri e al.⁹ ricordano che per murature in pietra non perfettamente squadrate nasce un fenomeno di "ingranamento" tra i blocchi e lo spostamento richiede maggior energia rispetto al semplice scorrimento tra superfici piane a contatto poiché è necessario il sollevamento dei blocchi o la rottura a taglio delle asperità degli stessi. È riportato il valore di attrito $\mu = 0,3 \div 0,8$.

- Brencich¹⁰ riporta valori variabili di u compresi tra $0,3 + 1,6$ in relazione al modo di apparecchiare la muratura, con media $\mu = 1$ e coefficiente di variazione tra 30% e 50%.

- Le NTC 2008 (DM 14/01/2008) [16] indicano di assumere $\mu = 0,4$ nei calcoli per murature di mattoni con giunti di malta (piano di scori-

Figg. 4.3-24 e 4.3-26 - Veglio, Montecrestese. Esecuzione delle terza serie di prove.

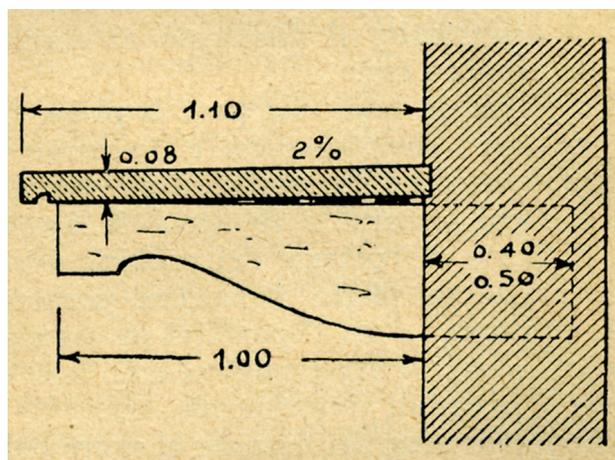
Nota 4.3-8 - MASTRODICASA S., cit., p. 625.

Nota 4.3-9 - BORRI A., CANGI G., DE MARIA A., *Caratterizzazione meccanica delle murature (anche alla luce del recente sisma in Emilia) e interpretazione delle prove sperimentali a taglio*. In www.ingenioweb.it, website of the Ingenio, 11/09/2013.

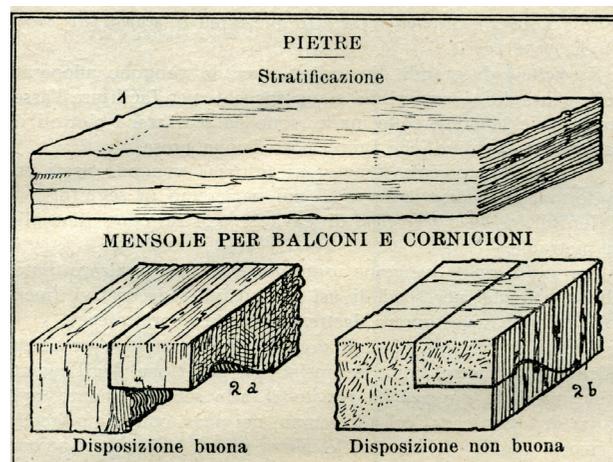
Nota 4.3-10 - BRENCICH A., *Tecniche Diagnostiche e loro analisi, course of Costruzioni di Infrastrutture per i trasporti - Laurea Specialistica in Ingegneria dei Trasporti e Logistica*, Università degli Studi di Genova - DISEG, Genova, p. 27.

Nota 4.3-11 - Circolare n. 617 - 02.02.2009, *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma 2009.

Nota 4.3-12 - HOEK K., BRAY J., *Rock slope Engineering*, Inst. of Mining and Metallurgy, II edition, 1977.



4.3-31



4.3-32

mento la malta).

-Hoek¹² riporta il coefficiente d'attrito teorico tra «roccia fratturata di granito» valutato con $\mu = \text{tg}\Phi$ e con $\Phi = 45^\circ - 50^\circ$ pari a $\mu = 1 \div 1,19$.

- In sperimentazioni presso il DISEG - Politecnico di Torino (S. Fasana) sono stati ottenuti, per lastre di copertura a spacco naturale in gneiss sovrapposte, valori di $\Phi = 30^\circ \div 41^\circ$ pari a $\mu = 0,7 \div 0,9$.

Il valore del coefficiente d'attrito ottenuto nelle prove esplorative in Val d'Ossola è compatibile con i valori in bibliografia e il valore del coefficiente ottenuto nella terza prova $f = 1,58$ è in relazione al fenomeno di "ingranamento" tra i blocchi di pietra.

4.3.2.3 - Modiglioni di pietra e lastre per balconi. Prime prove statiche

Il recupero delle architetture alpine richiede indicazioni per migliorare la sicurezza statica nel tempo delle mensole lapidee di sostegno dei balconi (modiglioni). Sono stati infatti registrati casi di rottura di modiglioni lapidei sia da molto tempo in opera (edilizia vetusta) sia relativamente recenti. Le dimensioni delle mensole da incastrare nei muri riportate nei manuali tecnici storici [ASTRUA, LEVI] corrispondono ai valori riscontrati negli edifici tradizionali: sbalzo 100 cm, incastro nel muro circa $40 \div 50$ cm, sezione del modiglione all'incastro altezza circa 30 cm e base 18 cm. Le dimensioni delle lastre sono: larghezza 110 cm, luce tra gli assi degli appoggi (= passo dei modiglioni) circa 150 cm, spessore lastra $8 \div 10$ cm.

Sono stati svolti calcoli di verifica statica per questi elementi dimensionati come innanzi illustrato e sono stati ottenuti valori in accordo con le resistenze proprie del litotipo Serizzo riportate nelle bibliografie. Tensioni per la mensola a sbalzo:

$$\sigma = 2,96 \text{ N/mm}^2; \tau = 0,40 \text{ N/mm}^2.$$

Per le lastre in flessione poste su due appoggi:

$$\sigma = 1,98 \text{ N/mm}^2; \tau = 0,11 \text{ N/mm}^2.$$

Per la parte di muro che è soggetto a pressoflessione per via delle

Nota 4.3-13 - Le prove sulle mensole e sui materiali lapidei naturali sono state eseguite presso il MASTRLAB (Laboratorio di Materiali e Strutture) del Dipartimento ISEG dall'ing. arch. Elisa GENNA, con la collaborazione di docenti, ricercatori e tecnici.

Un particolare ringraziamento all'ing. Marco C. ALESSIO e a Giuseppe PROVENZANO per la loro disponibilità.

mensole incastrate (di 0,35 cm) si è ottenuto: $\sigma_{\max} = 2,34 \text{ N/mm}^2$.

Con la ricerca Interreg sono state svolte serie di prove di laboratorio per analizzare le caratteristiche del materiale lapideo, in particolare è stato testato materiale lapideo Serizzo Antigorio proveniente da Cave di San Rocco (in seguito indicato CSR) e da Rivasco Cave (in seguito indicato RC). Le prove sono state svolte con le procedure riportate nelle norme UNI EN 1926:2007 su provini standard.

Nelle tabelle che seguono sono riportati alcuni valori medi ottenuti.

Prove di compressione (su provini 300 x 50 x 50 mm)		
Compressione ortogonale alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 10 provini CSR	$\sigma_{\text{media}} = 172,23 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 11,29$
Su 10 provini RC	$\sigma_{\text{media}} = 185,25 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 8,90$
Compressione parallela alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 10 provini CSR	$\sigma_{\text{media}} = 200,91 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 18,50$
Su 10 provini RC	$\sigma_{\text{media}} = 183,86 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 12,15$

Prove di flessione sotto carico concentrato (su provini 300 x 50 x 50 mm)		
Flessione con direzione del carico ortogonale alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 10+10 provini RC	$\sigma_{\text{media}} = 16,32 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 1,13$
Flessione con direzione del carico parallela alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 10+10 provini RC	$\sigma_{\text{media}} = 16,02 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,91$

Figg. 4.3-33 e 4.3-34 - MASTRLAB del DISEG, Politecnico di Torino. Campioni standard sottoposti a prove di compressione.



4.3-33



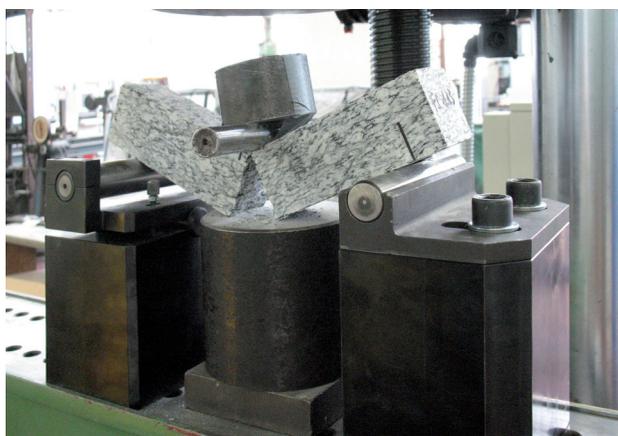
4.3-34

Prove di flessione sotto carico concentrato (su provini 600 x 100 x 100 mm)		
Flessione con direzione del carico ortogonale alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 5 provini RC	$\sigma_{\text{media}} = 14,00 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 1,60$
Flessione con direzione del carico parallela alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 5 provini RC	$\sigma_{\text{media}} = 13,39 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,40$
Prove di flessione sotto momento costante (su provini 300 x 50 x 50 mm)		
Flessione con direzione del carico ortogonale alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 6 provini CSR	$\sigma_{\text{media}} = 5,99 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,96$
Flessione con direzione del carico parallela alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 6 + 6 provini CSR	$\sigma_{\text{media}} = 15,01 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 1,00$
Prove di flessione sotto momento costante (su provini 600 x 100 x 100 mm)		
Flessione con direzione del carico ortogonale alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 5 + 5 provini CSR	$\sigma_{\text{media}} = 7,47 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,57$
Flessione con direzione del carico parallela alle giaciture dei piani di scistosità		
Su 5 provini CSR	$\sigma_{\text{media}} = 9,40 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,35$

Sono state inoltre svolte prove di flessione su modiglioni di dimensioni molto vicine a quelle reali (200 x 200 x 1100 mm)

Prove di flessione su modiglioni (su provini 200X200X1100 mm)				
Su 3 provini con piani di scistosità orizzontali	$\sigma_{\text{media}} = 13,31 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,35$	$\tau = 1,13 \text{ N/mm}^2$	Deviazione standard = 0,006
Su 4 provini con piani di scistosità verticali	$\sigma_{\text{media}} = 11,12 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,35$	$\tau = 0,93 \text{ N/mm}^2$	Deviazione standard = 0,080
Su 4 provini con piani di scistosità ortogonali agli assi maggiori dei modiglioni (soluzione chiaramente da evitare)	$\sigma_{\text{media}} = 3,91 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{\text{deviazione standard}} = 0,35$	$\tau = 0,33 \text{ N/mm}^2$	Deviazione standard = 0,046

Figg. 4.3-35 e 4.3-36 - MASTRLAB del DISEG, Politecnico di Torino. Campioni sottoposti a prove di flessione sotto carico concentrato.



4.3-35



4.3-36

Dall'analisi dei risultati riportati nelle tabelle precedenti è possibile avanzare alcune considerazioni:

- è opportuno tener conto dei valori riferiti alle cave poiché emergono differenze nelle resistenze a seconda delle provenienze;
- occorre usare i dati ottenuti dalle prove in maniera prudentiale, ovvero adattare nei calcoli valori inferiori;
- nelle prove si è osservato che più i provini utilizzati sono di grandi dimensioni e più si riducono le resistenze caratteristiche, questo anche poiché possono essere presenti difetti localizzati nel materiale e questo è più eterogeneo. Quindi è logico tener conto di questo fatto nei dimensionamenti degli elementi in grandezza reale (generalmente nettamente più grandi dei provini del materiale testato in laboratorio).

Si è constatato che uno dei provini testati ha fornito valori di resistenza molto al di sotto della media e dopo attento esame, si è riscontrata la presenza di un piano di sfaldamento preferenziale.

Ciò conferma il grave pericolo, indotto dalla presenza di piani preferenziali di scistosità non visti e/o di altre discontinuità (nodi di mica) di cui talvolta non si tiene conto nella produzione seriale.

4.3.2.3 - Cordoli di muratura armata in sommità delle pareti

Scopo: per ridurre la deformabilità della parte estrema superiore della muratura, che potrebbe flettersi o tendere a ribaltarsi (specialmente per quanto riguarda i timpani di pietra in testa alle maniche degli edifici).

La realizzazione può avvenire mediante un parziale smontaggio della parte superiore della muratura, predisponendo una specie di cassatura composta con elementi di pietra (con lavorazioni da riferire alla tipologia esistente di costruzione, cfr. Cap. 4.3-1, p. 4.3-7) posti lateralmente al muro (lungo le facciate) in modo che all'interno di questo spazio possa trovare alloggiamento il cordolo.

Il cordolo, in genere di sezione quadrata o pseudo-rettangolare, dispone di armature longitudinali di acciaio ad aderenza migliorata, con eventuali staffe (o rete metallica) anche per mantenere in posizione l'armatura longitudinale. Sono posti in opera dei connettori longitudinali (in genere di metallo protetto anti corrosione) reso solidale alla muratura inferiore tramite colatura di boiacche o di malte.

Il getto del cordolo può essere realizzato con:

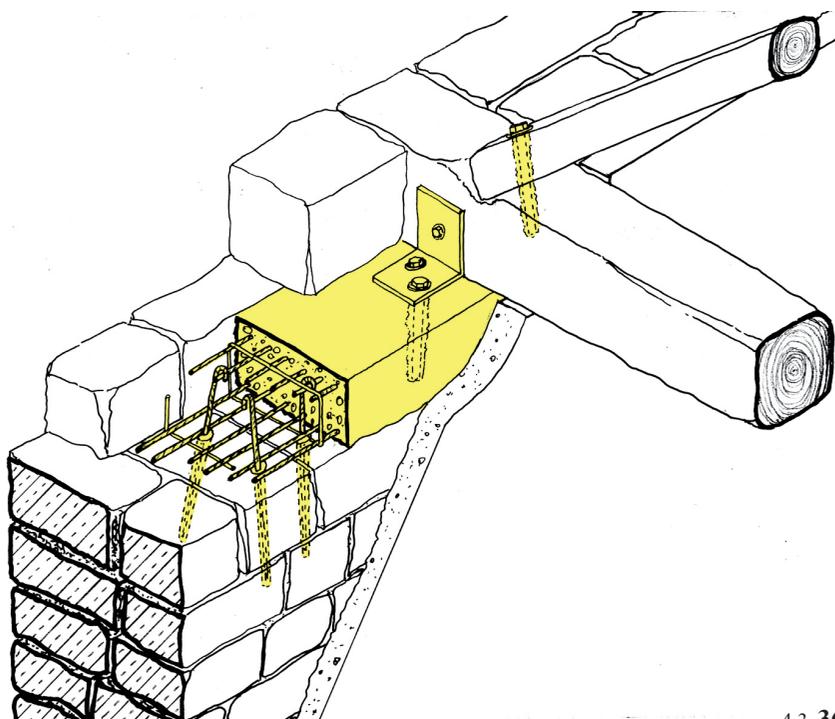
- calci idrauliche (naturali - NHL - o formulate - FL)¹⁴ con aggregati selezionati sino ad un centimetro di dimensione, con curve granulometriche appropriate per conseguire una adeguata resistenza meccanica.
- legante cementizio tipo Portland (con Rck 32.5 o 42.5) con valutazioni da effettuare su ogni specifico caso.

Un altro tipo di irrobustimento può essere realizzato mediante ricorsi di malta armata con ricorsi di pietra. Il posizionamento di maglie

Nota 4.3-14 - Cfr. nota 4.8-6, p. 4-86 e nota 4.9-9, p. 4-129.

Fig. 4.3-37 - Ipotesi per soluzione di cordolo armato in sommità di pareti; le variabili alla soluzione possono essere indotte dalla possibilità con regolarità fori per l'inghisaggio, consistenza della muratura, tipo di apparecchio murario, ecc.

(Schizzo assonometrico fuori scala, originale in scala 1:10).



4.3-36

metalliche a trama più o meno fine, posizionate in modo da seguire l'andamento superiore della muratura e annegata in uno strato di alcuni centimetri di malta a base minerale (preferibilmente calce idraulica naturale).

I ricorsi sono formati con:

- strati di malta a base minerale (preferibilmente NHL) armata con tele metalliche (a maglia più o meno fine) dallo spessore variabile a seconda dei casi, ma almeno di alcuni centimetri;
- ricorsi di elementi lapidei orizzontali, apparecchiati come la muratura esistente;
- è possibile inserire elementi/connettori verticali metallici di collegamento tra diversi strati di malta e tela metallica.

4.3.2.4 - Interventi per irrigidire i solai rinforzandoli con doppio tavolato incrociato

Sul tavolato esistente viene posato un nuovo tavolato ligneo disposto a 45° rispetto all'originario. Le tavole utilizzate per l'intervento preferibilmente dovranno essere maschiate.

- Il nuovo tavolato è incollato nel seguente modo: le nuove tavole sono incollate tra loro e anche con il tavolato preesistente, con collanti vinilici o con resine acriliche.

- Inoltre il nuovo tavolato è avvitato alle tavole sottostanti (con viti di

4 mm di diametro a lunghezza variabile in ragione degli spessori di tavole in opera); il numero delle viti può variare da 16 a 25 per m² di tavolato. Le viti devono essere posizionate in opera prima della presa del collante.

- Il posizionamento delle viti deve essere effettuato tracciando e perforando il tavolato superiore precedentemente al fissaggio definitivo (ovviamente il foro guida deve essere di dimensione inferiore al diametro della vite).

- Sono poste in opera anche viti di solidarizzazione nelle travi con un interasse di circa 20cm.

- Per ancorare perimetralmente il tavolato alla muratura è possibile disporre staffe a “y” avvitate sul tavolato e inserite nei giunti della muratura di pietra con un gambo singolo di acciaio ad aderenza migliorata.

- Inoltre, parallelamente ai muri perimetrali ad una distanza compresa tra 20 e 50 cm, è possibile posare delle bandelle metalliche forate, avvitate al tavolato.

Gli scopi principali di questi interventi sono quelli di:

- migliorare la ripartizione dei carichi accidentali;

- migliorare la resistenza del tavolato creando un funzionamento a lastra dell'impalcato secondario, con conservazione degli schemi statici originari.

Descrizione dell'intervento:

- Posa di un tavolato ligneo, sopra il tavolato esistente, posta a 45° rispetto ad esso

- Il nuovo tavolato è maschiato

- Il nuovo tavolato è incollato tra tavole e tavole e tra nuovo ed esistente sottostante (con resina vinilica)

- Il nuovo tavolato è avvitato alle tavole sottostanti (con viti di 4 mm di diametro, in quantità da 16 a 25 per m²). Le viti sono avvitate prima della presa del collante (esempio HBS 440)

- Sono poste anche viti di solidarizzazione nelle travi (con interasse 20 cm)

- Sono poste staffe a “y” ancorate con il gambo singolo dentro la muratura, mediante resina epossidica, e con le due braccia avvitate sul

tavolato

- Sono posati parallelamente ai muri mastri (bandelle) metallici continui avvitati al tavolato.

4.3.2.5 - Interventi per irrigidire i solai con bandelle metalliche (o FRP)

Scopo:

- irrigidire il solaio sul piano orizzontale
- migliorare la ripartizione dei carichi accidentali

Descrizione dell'intervento:

Sul tavolato originario possono essere applicate delle bandelle metalliche orientate a 45° (rispetto al tavolato), avvitate con viti da legno in modo analogo alla soluzione precedente.

E' possibile collegare i tavolati di ambienti limitrofi mediante bandelle a croce di Sant'Andrea attraverso i vani delle porte.

E' possibile anche posare bandelle in tessuto FRP incollato al tavolato, posto a 45°.

4.3.2.6 - Interventi di rinforzo di solaio con tavolato collaborante

Scopo:

- aumentare la capacità portante ai carichi verticali del solaio
- aumentare la rigidità sul piano orizzontale per trasmettere forze orizzontali
- migliorare la ripartizione dei carichi verticali
- collegare orizzontalmente gli elementi portanti verticali (muri, ecc..)

Descrizione dell'intervento:

Sul tavolato esistente vengono posati pannelli di compensato in tre strati, ognuno dello spessore di 21 mm. Gli strati sono tra loro incollati in continuo con colle apossidiche ed avvitati in fase di incollaggio. I pannelli, di dimensione standardizzate, devono essere posati con i giunti sfalsati.

La nuova struttura a lastra viene collegata alle travi portanti mediante connettori metallici ad aderenza migliorata, inseriti nelle travi dopo foratura, e fissati a questa con colatura fino a rifiuto di resina epossidica.

Sull'ultimo strato sono fissati elementi metallici a "y" analoghi a

BIBLIOGRAFIA Cap. 4.3

BERTAMINI T., *Storia di Montecrestese*, Oscellana, Domodossola, 1991 p. 209

BORRI A., CANGI, G., DE MARIA A., *Caratterizzazione meccanica delle murature (anche alla luce del recente sisma in Emilia) e interpretazione delle prove sperimentali a taglio*. In www.ingenioweb.it, website of the Ingenio, 11/09/2013.

BRENCICH A., *Tecniche Diagnostiche e loro analisi*, corso di Costruzioni di Infrastrutture per i trasporti – Laurea Specialistica in Ingegneria dei Trasporti e Logistica, Università degli Studi di Genova – DISEG, Genova, p. 27

CHEVALLEY G., *Elementi di Tecnica dell'Architettura. Materiali da costruzione e grosse strutture*, Torino, 1924, p. 108

Circolare n. 617 - 02.02.2009, *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma 2009

D.P.C.M. 9 febbraio 2011, *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008*, Direttiva Presidente Consiglio dei Ministri

HOEK K., BRAY J., *Rock slope Engineering*, Inst. of Mining and Metallurgy, II edition, 1977

MASTRODICASA S., *Dissesti statici delle strutture edilizie*, Hoepli, Milano, 1943

4.4 - BALCONI

RICCARDO NELVA

4.4.1 Criteri di dimensionamento di massima di lastre e mensole di balconi di pietra

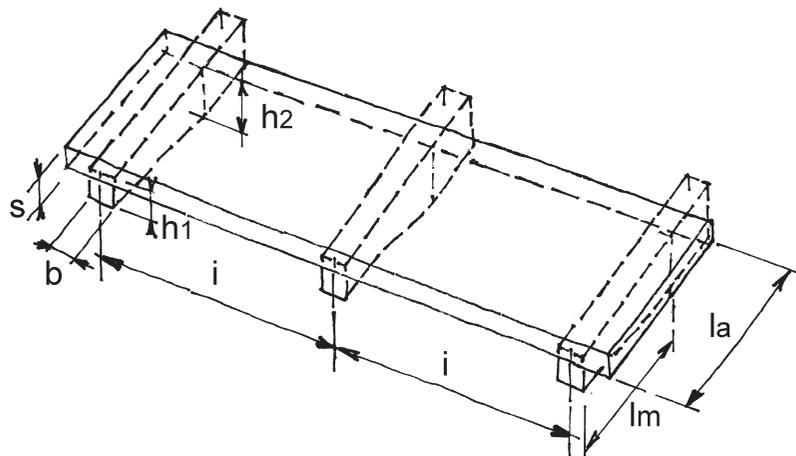


Fig. 4.4- 1 - Schema di un balcone formato da lastre su mensole incastrate sul muro di facciata.

4.4-1

Nota 4.4-1 - Le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) ammettono il metodo di verifica alle tensioni ammissibili (paragrafo 2.7) per le costruzioni tipo 1 e tipo 2 (opere ordinarie con vita nominale ≥ 50 anni) e classe d'uso I e II (costruzioni in cui si preveda normali affollamenti) limitatamente ai siti ricadenti in zona sismica 4.

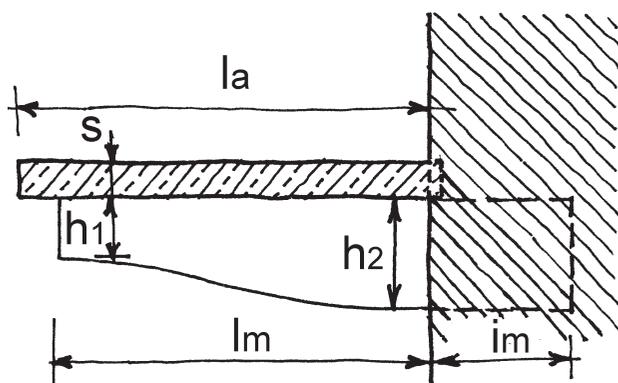
In questo paragrafo vengono presi in considerazione balconi realizzati con lastre lapidee piane posate su mensole incastrate nella muratura di facciata.

Per la verifica delle mensole e delle lastre si potrebbero impiegare metodi agli stati limite nel caso in cui si potesse disporre di una vasta base di dati sperimentali di rilevanza statistica per i diversi materiali impiegati, provenienti da differenti località di estrazione, e per l'incidenza delle diverse lavorazioni.

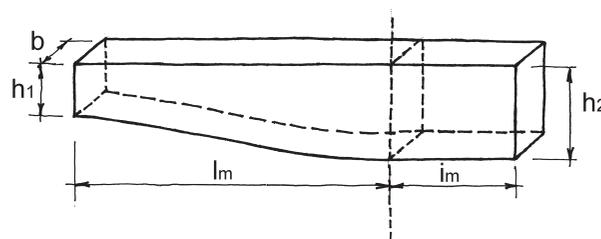
Nel caso specifico dell'esempio esaminato, mancando tale supporto statistico di dati, vengono impiegati gli usuali metodi di dimensionamento di massima, basati sulle tensioni ammissibili¹ e su coefficienti di sicurezza ponderati. Essi tengono conto della difficoltà, a livello dia-

Fig. 4.4- 2 - Sezione trasversale di un balcone in lastre di pietra su mensole incastrate.

Fig. 4.4- 3 - Schema delle dimensioni di una mensola.



4.4-2



4.4-3

gnostico, di valutare la presenza di eventuali difetti strutturali occulti nei materiali lapidei. Sarà in futuro necessario avviare delle campagne di prove sulle caratteristiche meccaniche dei materiali impiegabili nelle diverse condizioni di esposizione e di esercizio.

4.4.1.1 - Dimensioni del balcone e degli elementi costituenti

- Lastra in pietra di gneiss

larghezza $l_a = 1,10$ m, spessore $s = 0,09$ m, interasse di posa sulle mensole $i = 1,80$ m.

- Mensola

lunghezza totale $l_m + i_m = 1,45$ m, sbalzo della mensola $l_m = 1,00$ m, parte incastrata nel muro $i_m = 0,45$ m, altezza all'estremità dello sbalzo $h_1 = 0,18$ m, altezza all'incastro $h_2 = 0,30$ m, larghezza della base della mensola $b = 0,18$ m.

ANALISI DEI CARICHI SUL BALCONE

Carico variabile verticale uniformemente distribuito DM 14/01/2008 (folla compatta): $4,00$ kN/m²

Peso proprio lastra a metro quadrato: 27 kN/m³ · $0,09$ m = $2,43$ kN/m²

Peso ringhiera: $0,20$ kN/m

Peso proprio mensola (parte a sbalzo) a metro:
 $(0,30+0,18)$ m · $\frac{1}{2}$ · $0,18$ m · 27 kN/m³ = $1,17$ kN/m

4.4.1.2 - Verifica di massima a flessione della lastra

Carico sulla lastra inflessa a metro:

$$q_{\text{lastra}} = 4,00 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,10 \text{ m} + 2,43 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,10 \text{ m} + 0,20 = 4,40 \text{ kN/m} + 2,67 \text{ kN/m} + 0,2 \text{ kN/m} = 7,27 \text{ kN/m}$$

l (teorica, a vantaggio della sicurezza) = $1,80$ m

$$M_{\text{max}} = q \cdot l^2 \cdot 1/8 = 2,944 \text{ kN m}$$

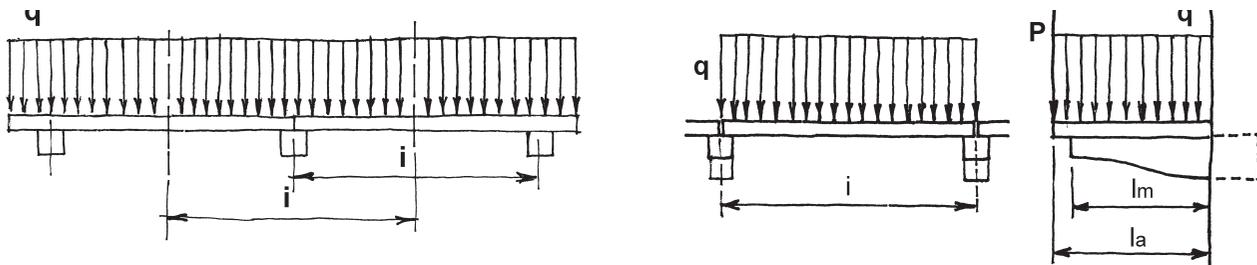
$$W = b \cdot h^2 \cdot 1/6 = 1,10 \cdot 0,09^2 \cdot 1/6 = 1,485 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\sigma = M/W = 2,944 \text{ kNm} / 1,485 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,98 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 1,98 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max}} = 3 \cdot T / (2 \cdot l_a \cdot s) = 3 (7,27 \text{ kN} \cdot 1,80/2) / (2 \cdot 1,10 \cdot 0,09) = 3 \cdot 6,54 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 1,10 \cdot 0,09) = 0,10 \text{ MPa}$$

Fig. 4.4- 4 - Schemi di carico di un balcone lapideo.

Questi risultati, confrontati con i valori sperimentali e con i dati in bibliografia, corrispondono a un coefficiente di sicurezza dell'ordine di 6



per la flessione e dell'ordine di 9 per il taglio e rientrano nei limiti delle tensioni ammissibili.

4.4.1.3 - Verifica di massima a flessione della mensola incastrata

Carichi su una mensola intermedia, al m:

$$q_{\text{mensola}} = (4,00 + 2,43) \text{ kN/m}^2 \cdot 1,80 \text{ m} = 11,57 \text{ kN/m}$$

Carico concentrato ringhiera all'estremo dello sbalzo:

$$P = 0,20 \text{ kN/m} \cdot 1,80 \text{ m} = 0,36 \text{ kN}$$

Momento flettente all'incastro:

$$M_{\text{max}} = P \cdot l + q \cdot l^2 \cdot 1/2 = 0,36 \text{ kN} \cdot 1,10 \text{ m} + 11,57 \cdot 1,10^2 \cdot 1/2 + 1,17 \text{ kN/m} \cdot 1,00^2 \text{ m} \cdot 1/2 =$$

$$= 0,40 \text{ kN m} + 7,00 \text{ kN m} + 0,58 \text{ kN m} = 7,98 \text{ kN m}$$

Momento resistente mensola:

$$W = b \cdot h^2 \cdot 1/6 = 0,18 \text{ m} \cdot 0,30^2 \text{ m} \cdot 1/6 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\sigma = M/W = 7,98 \text{ kN m} / 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 2,96 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max}} = 3 T / 2 b h_2 =$$

$$= (3/2) \cdot (1,17 \text{ kN} + 0,36 \text{ kN} + 11,57 \text{ kN/m} \cdot 1,10 \text{ m}) / 0,054 \text{ m}^2 =$$

$$= 3/2 \cdot 14,26 \text{ kN/m} / 0,054 = 0,40 \text{ MPa}$$

Questi risultati, confrontati con i valori sperimentali e con i dati in bibliografia, corrispondono a un coefficiente di sicurezza dell'ordine di 4 per la flessione e dell'ordine di 2,5 per il taglio.

4.4.1.4 - Verifica all'incastro nella muratura in pietra

Area di impronta orizzontale dell'incastro nel muro:

$$0,45 \text{ m} \times 0,18 \text{ m} = 0,081 \text{ m}^2;$$

Momento resistente impronta orizzontale:

$$W = b \cdot h^2 \cdot 1/6 = 0,18 \times 0,45^2 \times 1/6 = 6,075 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Momenti di incastro $M_i = 7,98 \text{ kN m}$

Carico verticale $P_v = 14,26 \text{ kN}$

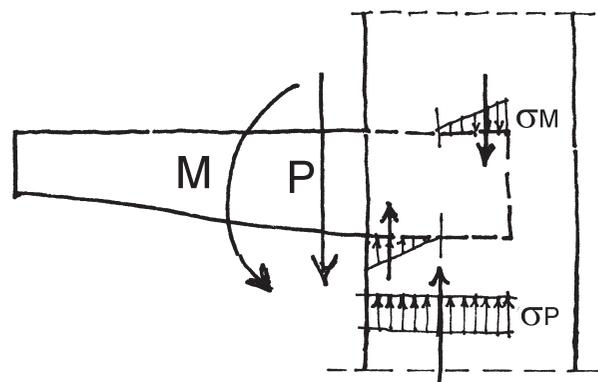
Carico della muratura verticale ipotizzata alta 3 m:

Fig. 4.4- 5 - Domodossola. Esempio di mensola lapidea sagomata.

Fig. 4.4- 6 - Schema delle condizioni di incastro nel muro di una mensola di balcone.



4.4-5



4.4-6

$$0,081 \text{ m}^2 \times 24 \text{ kN/m}^3 \times 3 \text{ m} = 5,83 \text{ kN}$$

$$\sigma = P/A \pm M/W =$$

$$= (14,26 + 5,83) \text{ kN}/0,081 \text{ m}^2 \pm 7,98 \text{ kN m} / 6,075 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 =$$
$$20,06 \text{ kN}/0,081 \text{ m}^2 \pm 1,31 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 0,25 \text{ MPa} \pm 1,31 \text{ MPa} =$$
$$= + 1,56 \text{ MPa}; - 1,06 \text{ MPa}$$

I risultati ottenuti consigliano di verificare che nei punti di incastro delle mensole le murature siano ben legate con tessiture omogenee e blocchi di ripartizione dei carichi.

La staticità della mensola viene garantita dalla muratura sovrastante gravante verticalmente che viene coinvolta dalla parte di mensola inserita nel tessuto murario. È ragionevole pensare che la parte di muratura interessata sovrastante la mensola sia ben maggiore dell'area dell'incastro, il fenomeno è analogo a quello che avviene nel caso di un capochiave di tirante che interessa un'area ben maggiore di muratura rispetto al solo capochiave.

È evidente che la mensola deve essere incastrata in un punto del muro di facciata dove vi è sovrastante una sufficiente altezza di muratura (occorre evitare le zone degli architravi delle finestre ed è necessario posizionarsi a distanza dalle aperture).



4.4-7

4.5 - IL TETTO CON MANTO “DI PIODE”

SARA FASANA, PAOLO SCARZELLA

Nota 4.5-1 - CONTI G. M., ONETO G., *cit.* 2008.

Fig. 4.5-1 - Naviledo. Edificio con “tetto-scala” realizzato su volume accessorio per l’accesso ai livelli superiori.

Fig. 4.5-2 - Tetto tradizionale a Veglio (Montecrestese): connotano l’immagine l’elevata pendenza e il volume del comignolo.

Fig. 4.5-3 - Naviledo, Montecrestese. Scorcio sui caratteristici tetti di pietra della borgata.



4.5-1



4.5-2

Il tetto costituisce un elemento fortemente connotante il paesaggio dell’architettura Ossolana e Ticinese (Fig. 4.5-3), quasi simbolico. La sua immagine è storicamente legata alla disponibilità di materiali locali, che ha determinato alcune varietà, sinteticamente, ma non esaustivamente, riconducibili ai tre generi che seguono e alle rispettive aree di pertinenza¹:

- l’area dei tetti con manto in lastre di pietra di elevato spessore, corrispondente alla Valle Ossola e alle sue valli laterali (Fig. 4.5-1);

- l’area dei tetti con manto in lastre di pietra di piccolo spessore o in scandole di legno, corrispondenti alle parti alte delle Valli Anzasca, Divedro, Formazza e Strona, generalmente indicata come zona Walser;

- l’area dei tetti con manto in lastre di pietra di piccolo spessore, in tegole di laterizio o, limitatamente ad aree più ristrette, di paglia di segale, corrispondente alle zone dei laghi (lago Maggiore e lago d’Orta).

Questo capitolo tratta in particolare i tetti con manto di lastre di pietra di elevato spessore, realizzati con spesse lastre di gneiss scistoso, anche note come *beole* (ad indicare un litotipo) o *piode* (ad indicare la singola lastra).

L’immagine immediatamente riconoscibile di questi tetti si caratterizza per i) struttura portante realizzata da capriate semplici, generalmente senza unica trave di colmo, ii) elevata pendenza delle falde (Fig. 4.5-2), e iii) manto in lastre di pietra di elevato spessore, posate con minima pendenza (7 - 8 %) e appoggiate sulla struttura lignea.

Tali strutture possono sopportare carichi notevoli.



4.5-3

4.5.1 - La struttura portante

La struttura portante dei tetti con manto di piode è generalmente costituita da capriate semplici, realizzate con elementi di legno di larice o castagno, non lavorati o grossolanamente riquadrati all'ascia, che costituiscono la *struttura primaria*. I puntoni (PU), sono uniti al vertice con giunzione a mezzo legno, fissati con un chiodo (BI, *birol*) di legno di maggiociondolo e sono vincolati inferiormente alla catena (CA) con incastro a dente semplice (ds, Fig. 4.5-6). La catena è generalmente vincolata con unione a sella, più raramente a incastro, a due dormienti (o banchine laterali - BA) che collegano le capriate ripartendone il carico verticale sulla muratura di pietra. Le capriate, così costituite, sono poste tradizionalmente ad interasse di poco superiore al metro e sono, come è noto, una struttura semplice di tiranti (CA) e puntoni (PU). Il sistema del tetto diviene un sistema statico spaziale, costituito da una capriata reticolare, grazie alla presenza di ulteriori elementi che ne rappresentano la *struttura secondaria*. I correnti orizzontali (CO, *tempiare*) sono posati sui puntoni (Fig. 4.5-4) parallelamente alla linea di gronda, ad interasse circa di 15 cm e costituiscono l'orditura di sostegno alle lastre del manto (PI, *piode*). Gli elementi di rinforzo (SA) nel piano di falda

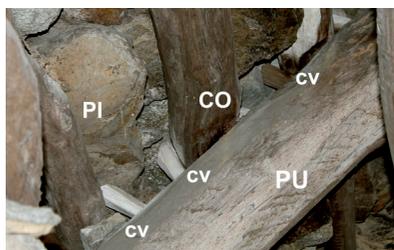
Figg. 4.5-4,7 - Veglio (Montecrestese).

-4- Particolare del nodo con i chiodi (CV, *ka-vic*) di supporto dei correnti, infissi entro fori praticati sul dorso dei puntoni; tali elementi erano tradizionalmente realizzati con legno duro, resistente e durevole, come il maggiociondolo o il castagno.

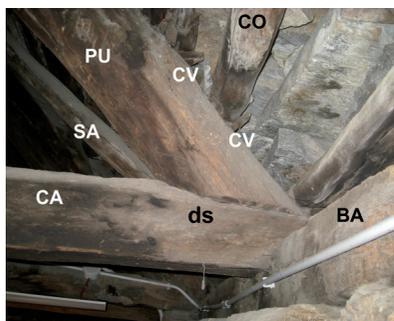
-5 - Struttura di un tetto tradizionale, con traverse (TV) caratteristiche delle capriate di notevole ampiezza;

-6 - Particolare della giunzione a dente semplice (ds) tra puntoni (PU) e catena (CA);

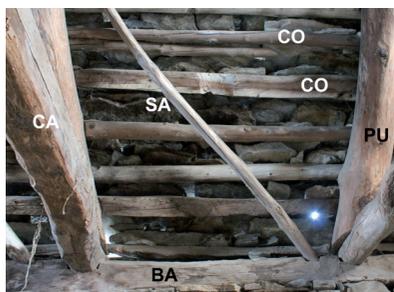
-7 - Vista della struttura del tetto con la saetta (SA) nel piano della falda.



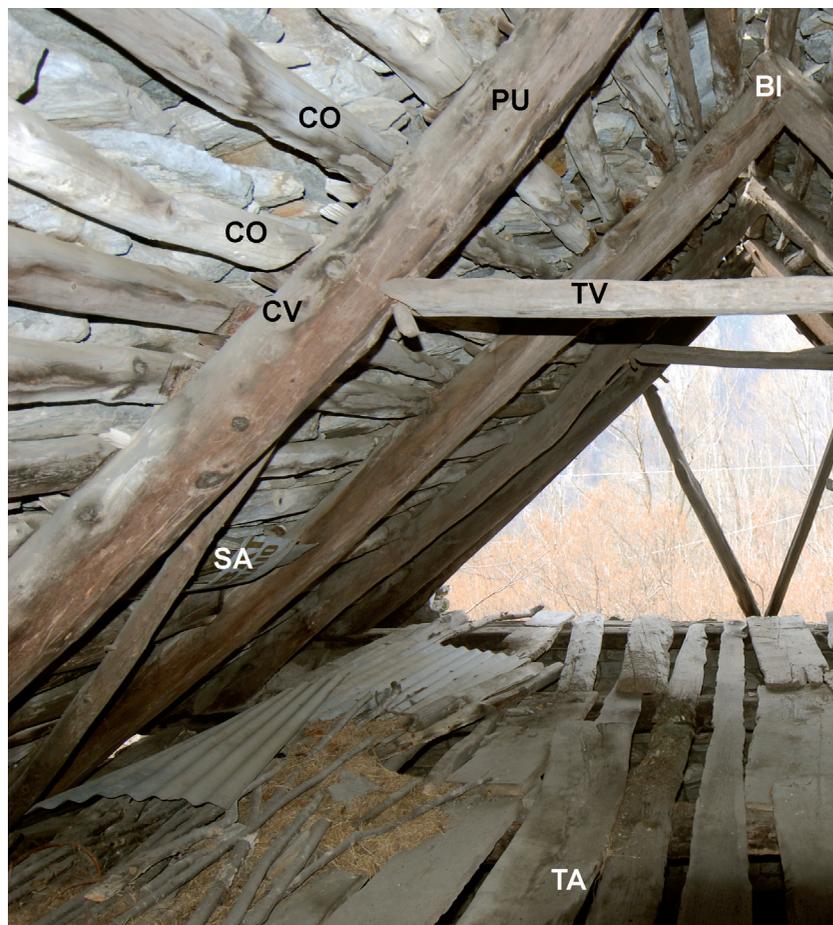
4.5-4



4.5-6



4.5-7



4.5-5

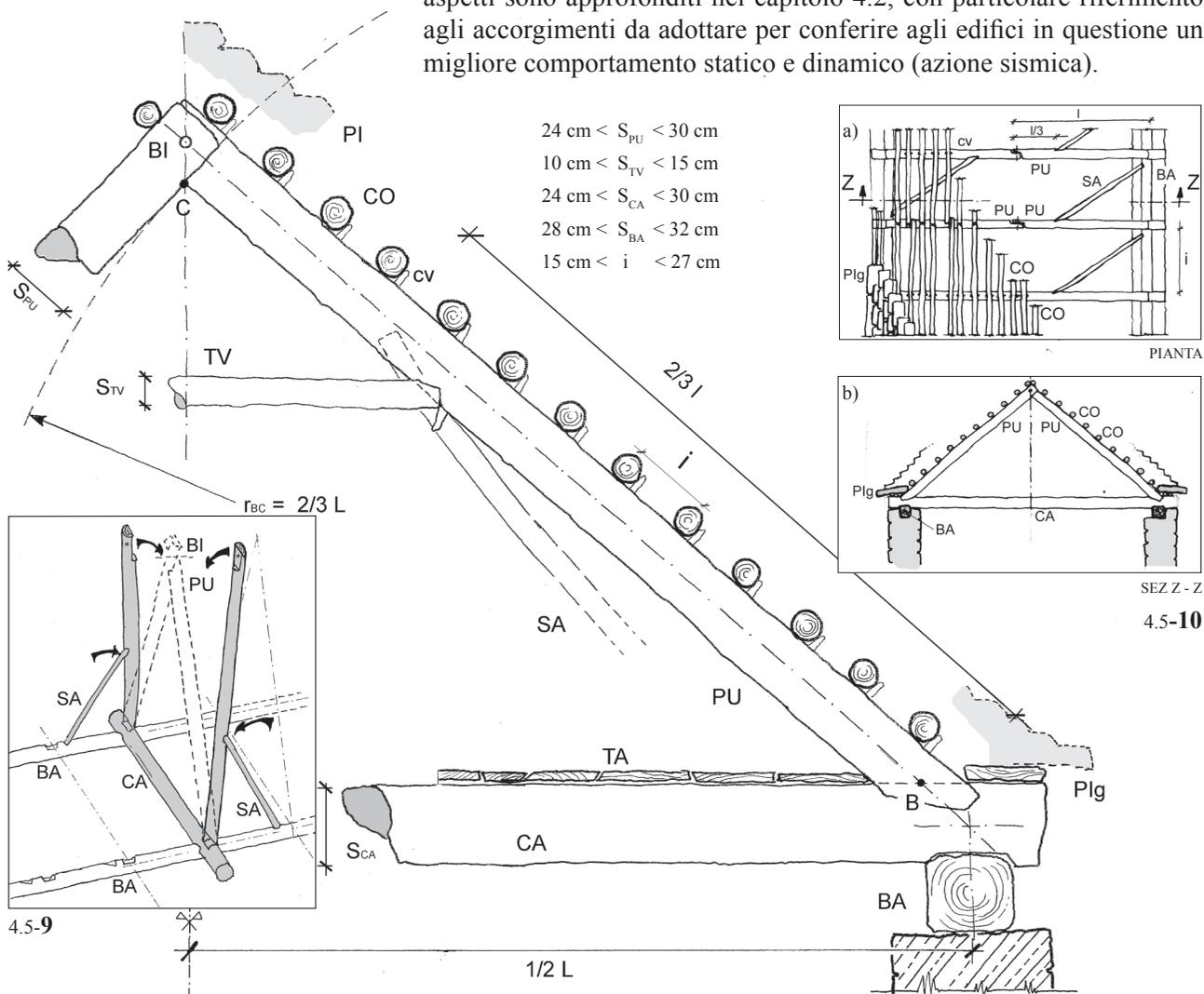
Fig. 4.5-8 - Schema assonometrico di montaggio di una capriata a tenaglia: si interpreta in particolare la funzione delle saette (SA), inclinate in direzione opposta nelle due falde: in fase di montaggio collaborano alla chiusura del nodo al vertice, prima del fissaggio con il birol (BI); poi hanno funzione di elementi di controventamento.

Fig. 4.5-9 - Sezione di capriata tradizionale con indicazione di rapporti geometrici tra le parti e regola di tracciamento (da G. BRETTO).

Fig. 4.5-10 - Pianta a) e sezione b) di capriata tradizionale.

(che a tetto ultimato assolvono anche la funzione di controventi - Fig. 4.5-7) sono tradizionalmente inseriti durante le fasi di montaggio delle capriate a tenaglia (Fig. 4.5-10): incastrati in basso (sezione maggiore) sulla banchina e in alto a circa 2/3 del puntone, essi collaborano alla chiusura del nodo *a mezzo legno* al vertice della capriata. In presenza di luci significative, possono essere presenti delle traverse (TV, sbacc), per ridurre l'inflessione dei puntoni (Fig. 4.5-5, 8).

Le dimensioni ricorrenti delle sezioni degli elementi della struttura principale sono indicati con riferimento alla sezione di Fig. 4.5-8. A tali dimensioni occorre fare riferimento (con gli opportuni accorgimenti per gli aspetti statici) nel caso di interventi di integrazione o sostituzione di singoli elementi in strutture esistenti. In generale, la varietà di modi di realizzare il sistema costruttivo del tetto (in particolare i collegamenti tra le strutture primarie e secondarie, e tra queste e la muratura su cui il carico verticale del tetto viene distribuito), può conferire ad esso varietà di comportamenti strutturali. Raramente essi sono rispondenti agli attuali requisiti delle vigenti norme tecniche per le costruzioni. Tali aspetti sono approfonditi nel capitolo 4.2, con particolare riferimento agli accorgimenti da adottare per conferire agli edifici in questione un migliore comportamento statico e dinamico (azione sismica).



4.5.2 - Varietà nei modi di disporre le capriate “di testata”

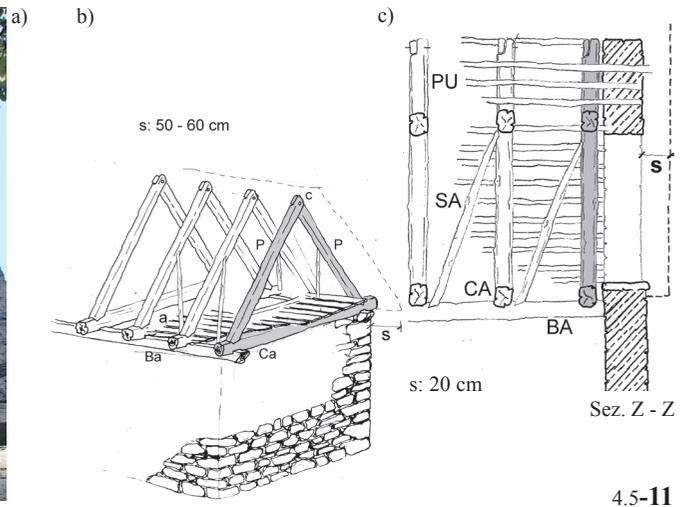
La posizione della capriata di testata contribuisce a definire i modi ricorrenti di organizzare la parte terminale di molti edifici rurali a manica semplice. Per questo deve essere posta adeguata attenzione alla lettura delle soluzioni tecniche adottate e ai loro risvolti compositivi, allo scopo di successivamente definire eventuali nuovi elementi di chiusura da utilizzare nel recupero (o elementi complementari a quelli esistenti). Di seguito sono proposti alcuni esempi significativi per illustrare la varietà di immagine dei prospetti di frontone, corredati da schemi e sezioni che ne evidenziano gli elementi connotanti (cfr. glossario² a fianco).

T.I) Capriata interna adiacente: la capriata di testata è posta sul lato interno del muro; lo sporto (s) della copertura rispetto al filo della facciata è minimo, generalmente di circa 20 cm o di poco superiore (Fig. 4.5-11).

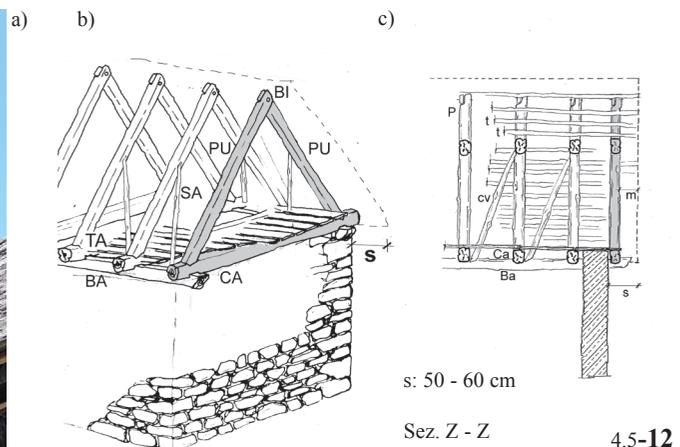
T.II) Capriata esterna adiacente: la capriata di testata è posta sul lato esterno del muro di frontone (Fig. 4.5-12), in adiacenza ad esso;

Nota 4.5-2 - Con riferimento alle figure che illustrano il paragrafo 4.5.2, è di seguito riportato un piccolo glossario di elementi connotanti, leggibili nelle soluzioni ricorrenti in esse raffigurate:

- (a) assito di grandi tavole di legno;
- (BA) trave di banchina;
- (BI, *birol*) perno passante di legno per la connessione dei puntone al vertice della capriata;
- (CA) catena della capriata semplice;
- (CO, *tempiare*) correnti per il supporto delle lastre delmanto;
- (cv, *cavic*) chiodo o perno di legno per il supporto dei correnti (generalmente solo a valle di questi);
- (SA, *saiotta*) saetta, piccola trave inclinata, nel piano della falda, presente nelle capriate di tutte le dimensioni;
- (m) aggetto del manto (oltre PU);
- (PU) puntone o falso puntone;



4.5-11



4.5-12

(pa) ciuffi di paglia
 (piv, pivàt) mensola per l'incastro del falso puntone, in sostituzione della catena (CA);
 (r) rastrelliera di legno;
 (s) sporto (o aggetto) della falda del tetto (compresa la struttura lignea) rispetto al filo esterno della muratura;
 (sc) sciaveri di legno per il tamponamento delle aperture degli spazi di sottotetto;
 (to) tondoni di legno per il tamponamento delle aperture degli spazi di sottotetto, incastrati alternativamente alle tempiere (CO).

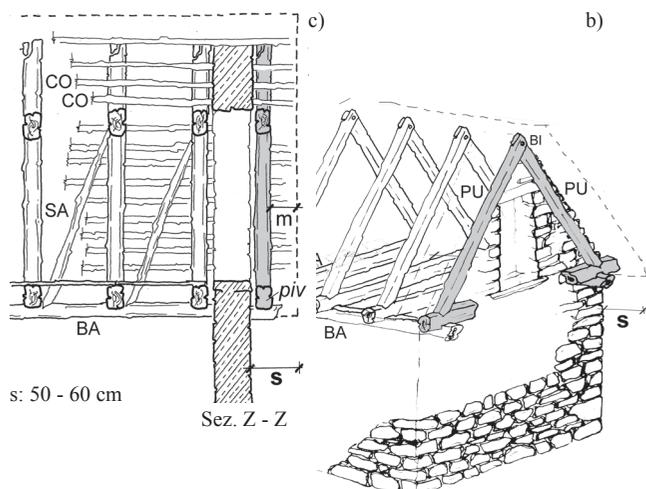
Fig. 4.5-11 - Soluzione di testata T.I:
 a) esempio su casa a due piani a Veglio (Montecrestese - IT); b) assonometria e c) sezione schematica.

Fig. 4.5-12 - Soluzione di testata tipo T.II:
 a) fienile a Naviledo (IT), con prolungamento del muro oltre il prospetto di frontone.; b) assonometria e c) sezione schematica.

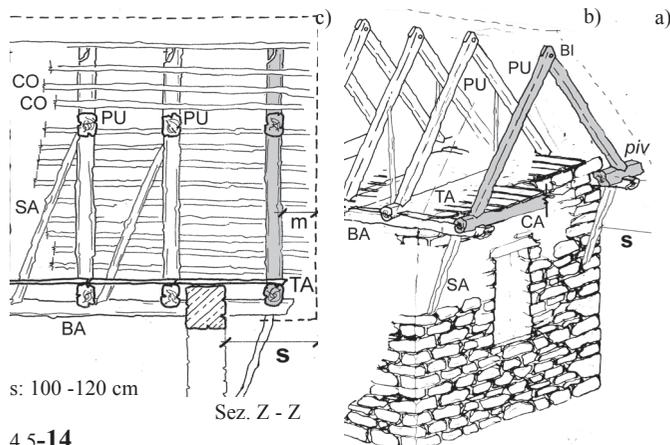
la catena (Ca) poggia generalmente sul prolungamento delle travi di banchina (Ba), lo sporto (s) massimo è di 50 - 60 cm circa.

T.III) Falsi puntone esterni incastrati su mensole di gronda, adiacenti: questa soluzione è simile alla precedente, ma con la capriata sostituita da falsi puntone incastrati su mensole di gronda (*piv*), localmente denominate *pivàt*, opportunamente sagomate e incastrate sulle banchine (Fig. 4.5-13); tale accorgimento risulta generalmente funzionale ad un più agevole utilizzo delle grandi aperture di servizio per i locali di sottotetto. Si notano esempi anche in presenza di timpano chiuso: in questo caso la soluzione, che è esteticamente più gradevole, consiste nell'eliminare la catena (qui non necessaria per il sostegno dell'assito, realizzato solo all'interno) e nel mantenere i soli elementi di incastro, che risultano in posizione maggiormente protetta dalle intemperie. Da un punto di vista statico, la soluzione risulta comunque coerente, se si considerano la spinta ridotta del manto (il cui aggetto (m) non è superiore, in questo caso, a 30 - 40 cm circa) e la presenza, talvolta, di una doppia corona orizzontale di travi di banchina

T.IV) Capriata esterna, con sporto elevato: specialmente nel caso di edifici con prospetto di frontone che si sviluppi per più di due piani



4.5-13



4.5-14



fuori terra, o in presenza di aperture o balconi ai piani di abitazione sottostanti, le capriate esterne possono essere poste a distanza maggiore dalla muratura; come nel caso T.II, esse poggiano con incastro a mezzo legno sui prolungamenti delle travi di banchina (BA), al cui sostegno collaborano generalmente due saette lignee (SA). Lo sporto totale (s) della copertura può anche raggiungere dimensioni intorno a 120 cm (Fig. 4.5-14).

T.V) Chiusura delle aperture del prospetto di frontone con scia-veri verticali a), tondoni b) o rastrelliere di legno c), raramente tamponate con ciuffi di paglia d) o ramaglie: in presenza di grandi aperture sulla facciata di frontone di edifici agricoli, è usuale trovare chiusure realizzate con elementi di materiali differenti, allo scopo di proteggere gli spazi interni e di consentirne l'aerazione (tali spazi erano generalmente dedicati al ricovero di animali o alla conservazione dei foraggi). Gli scia-veri di legno (SC), posati in verticale, (Fig. 4.5-15) erano generalmente inchiodati agli elementi della struttura lignea, dall'esterno; tale accorgimento costruttivo, necessario in presenza di tavolato interno (TA) appoggiato sulla catena (CA) delle capriate, ri-

Fig. 4.5-13 - Soluzione di testata T.III:

a) timpano chiuso, con conservazione della stratificazione storica, a Corippo (CH); b) assonometria e c) sezione schematica.

Fig. 4.5-14 - Soluzione di testata T.IV:

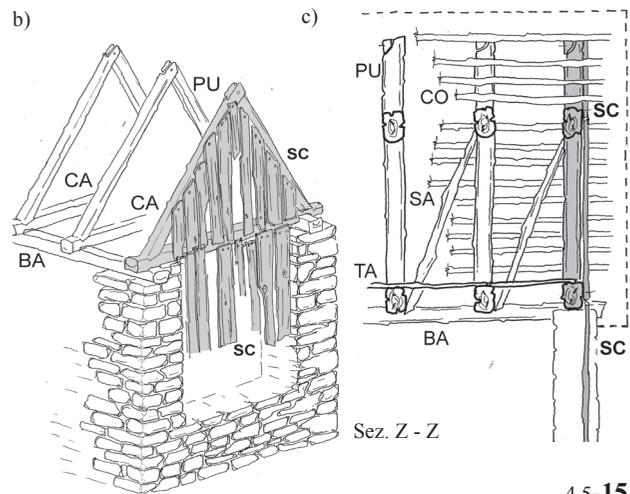
a) timpano aperto su edificio a due piani a Corippo (CH); b) assonometria e c) sezione schematica.

Fig. 4.5-15 - Soluzione di testata T.V.a):

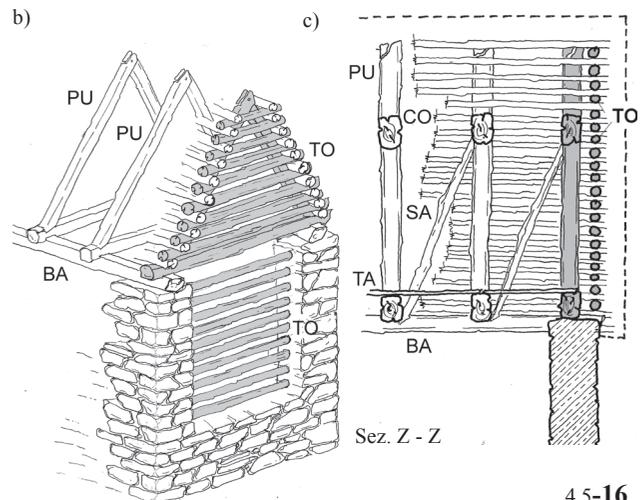
a) tamponamento della grande apertura di frontone con scia-veri di legno in edificio a Naviledo); b) assonometria e c) sezione schematica.

Fig. 4.5-16 - Soluzione di testata T.V.b):

a) tamponamento della grande apertura di frontone con tondoni di legno in edificio agricolo a Rivasco); b) assonometria e c) sezione schematica nel caso di posa esterna alla capriata di testata.



4.5-15



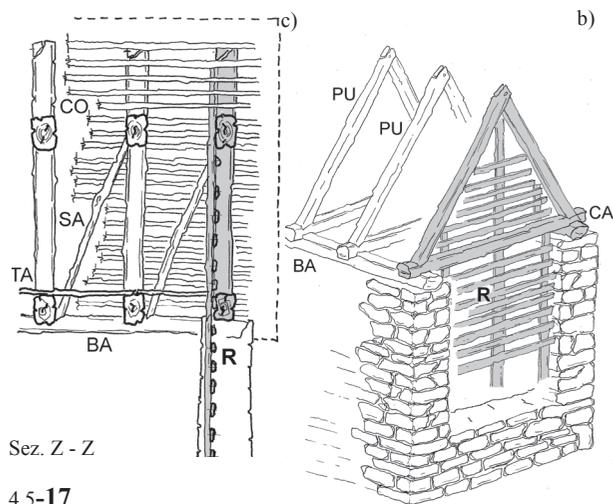
4.5-16

sulta anche coerente, per esempio, per opporre resistenza alla spinta del vento. I tondoni (TO) (Fig. 4.5-16), elementi di legno, generalmente non lavorati, aventi sezione di 12 cm circa, erano incastrati, alternandoli, alle *tempiare* (CO) di supporto al manto; potevano essere posati sia all'interno che all'esterno delle capriate di testata. Meno diffusi, i tamponamenti realizzati con ciuffi di paglia (pa) (Fig. 4.5-18), ramaglie o simili, erano generalmente fissati agli elementi orizzontali di rastrelliere di legno (R) (Fig. 4.5-17), poste a chiusura dei timpani (o delle grandi aperture che ne costituivano il prolungamento al piano sottostante); tale soluzione si ritrova spesso adottata anche per la chiusura delle grandi aperture poste sui prospetti di gronda (*astic*).

Generalmente, gli interventi per il riuso degli spazi di sottotetto a scopo abitativo si realizzano mediante la chiusura delle grandi aperture di frontone. In questi casi, particolare cura deve essere posta alla lettura di elementi tipici esistenti. In particolare, le soluzioni proposte devono mantenere le caratteristiche geometriche degli elementi originari descritti, e con esse deve risultare coerente il posizionamento di eventuali nuovi tamponamenti interni, adiacenti.

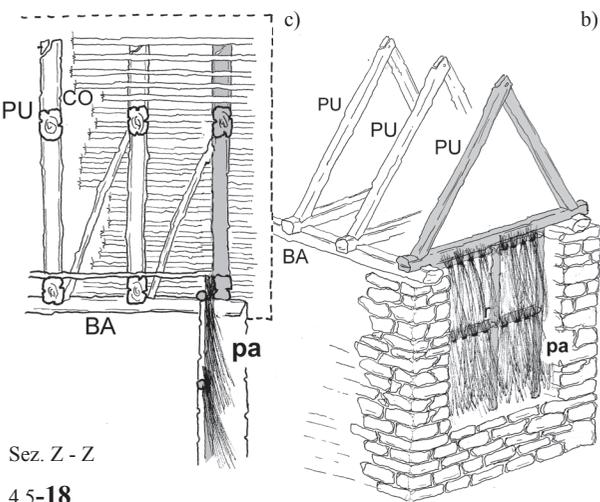
Fig. 4.5-17 - Soluzione di testata T.V.c):a) tamponamento della grande apertura di frontone con rastrelliera di legno (r) in edificio agricolo presso Naviledo.); b) assonometria e c) sezione schematica.

Fig. 4.5-18 - Soluzione di testata con struttura lignea e tamponamento di sciaveri estesa al piano di ingresso in edificio agricolo a Riva-sco a) Raramente è possibile rilevare esempi conservati di originarie soluzioni di testata con ciuffi di paglia o ramaglie), di cui si propongono b) assonometria e c) sezione schematica.



Sez. Z - Z

4.5-17



Sez. Z - Z

4.5-18



4.5.3 - Richiami di materiali e tecniche tradizionali per il taglio delle lastre da tetto

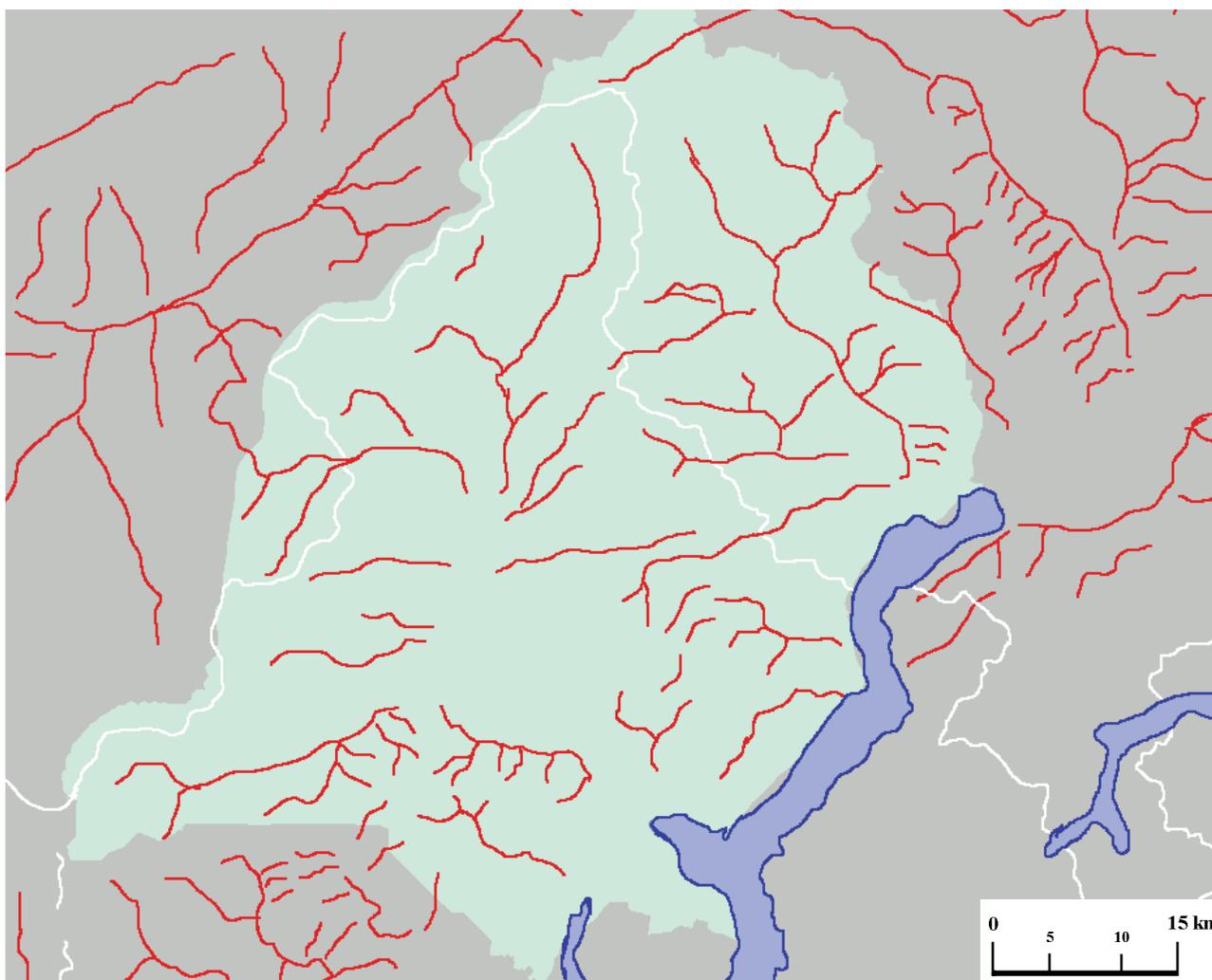
I materiali locali tradizionalmente utilizzati per la copertura dei tetti corrispondono, come detto (cfr. Cap. 4.1), a due varietà di gneiss, commercialmente definiti *serizzo* e *beola*. Il *serizzo*, principalmente cavato nel territorio a nord di Crevoladossola, è un ortogneiss granitoide occhiadino, ricco di biotite, con scistosità più o meno accentuata; la *beola* (probabilmente così denominata perchè essenzialmente cavata nelle cave del Comune di Beura Cardezza e, in generale, nel territorio a sud di Crevoladossola), prodotta in tre varietà, è uno gneiss tabulare fissile, raramente occhiadino³.

La modalità di coltivazione ed estrazione dei grandi blocchi (con taglio lungo i piani del “trincante” e della “mozzatura”, con piccola carica di polvere nera o con il metodo della miccia detonante con borraggio ad acqua),⁴ dipendevano storicamente dalla disposizione dei piani di “pioda”⁵ (ovvero di scistosità), orizzontali o verticali, e dalla conseguente possibilità di distacco del blocco per il successivo trasporto sul

Nota 4.5-3 - Cfr. Regione Piemonte, *Ornamentale Steine des Piemont - Les pierres ornamentales du Piémont*, Artigrafiche REDA-PRINT srl, Verona 2000.

Nota 4.5-4 - Per un approfondimento circa la terminologia di dettaglio e le tecniche storiche di coltivazione e di estrazione della pietra locale si veda: Gruppo Archeologico Mergozzo (a cura di), *Ossola di pietra nei secoli*, Tipografia Cerutti, Intra 1978.

Nota 4.5-5 - Il termine *pioda*, correntemente utilizzato ad indicare la singola lastra ottenuta con la lavorazione a spacco del materiale secondo i piani di scistosità, può indicare anche questi ultimi. IDEM, pag. 22.



4.5-19

Fig. 4.5-19 - Cartografia redatta secondo le convenzioni grafiche elaborate da G.P. SCARZELLA *et al.* in Interreg PIC-F15 - *Le Alpi: storia e prospettive di un territorio transfrontaliero* per la rappresentazione dei principali riferimenti ai bacini oro-idrografici e sistemi di viabilità locale. L'area evidenziata corrisponde al territorio di maggiore diffusione storica dei tetti con manto in lastre di pietra di elevato spessore, con mappatura dei principali siti estrattivi che attualmente producono lastre di pietra da tetto.

Fig. 4.5-20 - Esempi di immagine, caratteristiche ed estrazione della pietra locale da tetto: a) Serizzo Antigorio; b) Beola Favalle e c) Beura Cardezza, vista del fronte di una cava di *beola*.

piazzale di cava.

Dal blocco, le singole lastre erano invece ottenute per spacco, con l'aiuto di cunei di ferro (*cugnere* per l'incisione, *ripizz* per l'approfondimento del taglio, *punciotti* per il completamento) puntati con il martello e ribattuti con la mazza: perciò era necessario individuare correttamente i piani di simmetria della pietra (*pioda* o verso), del *trincante* (o controverso) e della *mozzatura* (o taglio di testa). Le lastre così ottenute presentano geometria pseudorettangolare e dimensioni generalmente variabili; la superficie di entrambe le facce (superiore e inferiore) è caratterizzata da rugosità propria del litotipo, generalmente accentuata (Fig. 4.5-20). Tradizionalmente il lato esposto della singola lastra era ancora lavorato - *sbarbato* - al fine di ottenere un profilo smussato irregolare (Fig. 4.5-30, pag 13). Ciò avveniva nella fase di posa in opera ed aveva duplice valore, estetico e funzionale.

In generale, l'immagine e le caratteristiche di durabilità dei manti tradizionali sono risultato dell'insieme dei modi di lavorazione descritti e della sapienza costruttiva nella disposizione in opera delle lastre in questione.



4.5-20

4.5.4 Il manto tradizionale in lastre di pietra di elevato spessore

Il manto tipico delle costruzioni *tutta pietra*³ delle aree ossolana e ticinese è costituito da lastre di pietra di elevato spessore (sino a 12 cm), di forma pseudorettangolare, posate a corsi orizzontali e a giunti sfalsati, con elevata sovrapposizione tra gli elementi (in generale, lo schema corrisponde ad un manto in elementi discontinui posati a corsi paralleli alla gronda, con *triplice sovrapposizione*).

Come illustrato nelle figure a corredo del paragrafo, la tradizionale varietà di geometria degli elementi del manto, conseguente alla necessità di utilizzare tutto il materiale a disposizione, ha dato origine a differenti schemi di posa, riconducibili ad alcune semplici, ma efficaci “buone regole” (Fig. 4.5-25).

Per esempio:

- alternanza di lastre di diversa dimensione, delle quali le maggiori (lunghe, *L battere*) generalmente appoggiate sui correnti e con il lato superiore (l_s) accostato alla struttura lignea di supporto;
- disallineamento (*d*) del lato coperto (c_s) delle lastre corte (*C, costere*) rispetto al lato omologo delle lastre lunghe;

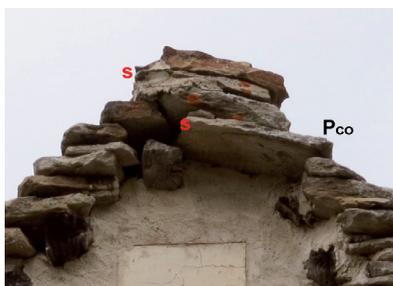
Nota 4.5-3 - Circa la difficoltà di classificazione e suddivisione delle forme di architetture alpine in tre classi, corrispondenti al prevalente uso del materiale - *costruzioni tutto legno, costruzioni tutta pietra e costruzioni miste* - si vedano: CEREGHINI M., *Introduzione alla architettura alpina, Serie di Quaderni “Il dittamondo”*, Edizioni del Milione, Milano 1953, pag. XIV, e l'intervento dello stesso autore al Convegno sull'architettura alpina di Bardonecchia del 1953, *Nascita delle architetture alpine e classificazioni delle loro forme*, in “Atti e Rassegna Tecnica”, anno 7, n. 3, marzo 1953, Stamperia Artistica Nazionale, Torino.

Fig. 4.5-21 - Caratteristico colmo “a ciuffo”, Madonna del Rosario, Craveggia.

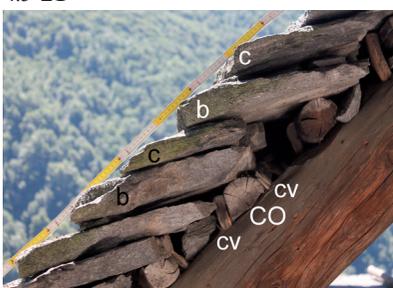
Fig. 4.5-22 - Tetti tradizionali all'Alpe Oro, Val Vigezzo.

Fig. 4.5-23 - Naviledo (Montecrestese), esempio di posa del manto secondo lo schema a lastre alternate a-b.

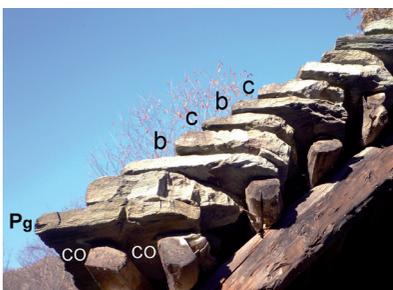
Fig. 4.5-24 - Veglio (Montecrestese), particolare del nodo di gronda con doppio corrente.



4.5-21



4.5-23



4.5-24



4.5-22

4.5.5 - Caratteristiche e comportamento di manti tradizionali: accorgimenti per la lavorazione e la disposizione in opera delle lastre

Le caratteristiche dei manti a falde inclinate realizzati con elementi discontinui, in generale, devono essere tali da garantirne un buon comportamento sotto due principali punti di vista: dal punto di vista statico, per la prevenzione della dislocazione degli elementi, e dal punto di vista della tenuta all'acqua, per la difesa dalle infiltrazioni anche in presenza dell'azione del vento.

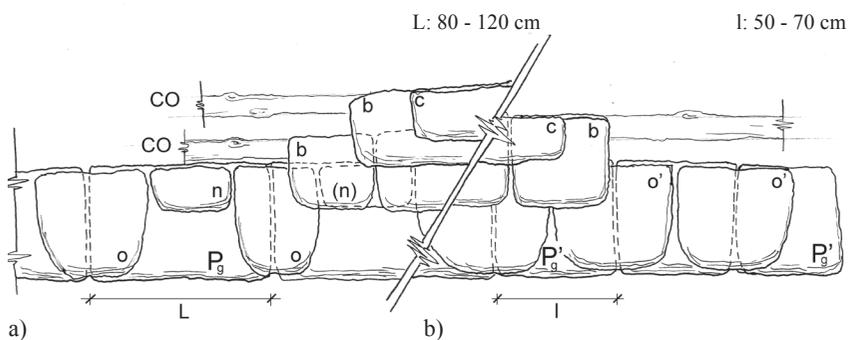
La varietà dimensionale delle lastre tradizionalmente utilizzate per la realizzazione dei manti in questione ne costituisce elemento caratterizzante l'immagine ed è, allo stesso tempo, strettamente legata a ragioni di carattere funzionale. I disegni a corredo del presente paragrafo illustrano accorgimenti costruttivi utili per interpretare l'esistente, conferire ai manti un'adeguata capacità di rispondere ai requisiti funzionali e, in conseguenza, realizzare attualmente manufatti la cui immagine risulti il più possibile coerente con quella dei manufatti tradizionali⁴.

4.5.5.1 - Prevenzione delle infiltrazioni d'acqua

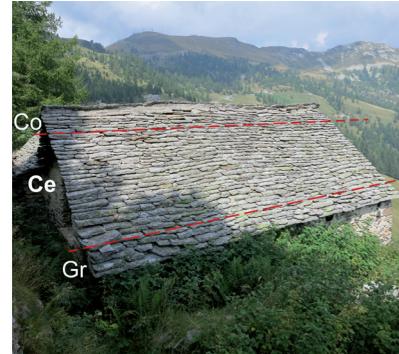
Le infiltrazioni d'acqua all'interno di manti discontinui, in generale, possono avvenire secondo due meccanismi:⁵ *i*) risalita capillare tra le superfici delle lastre sovrapposte e *ii*) infiltrazione attraverso i giunti laterali tra lastre del medesimo corso. Nel caso dei manti in questione, opportuni accorgimenti adottati nella lavorazione e nella disposizione in opera degli elementi possono efficacemente ridurre i rischi di infiltrazione.

Per esempio:

- *i*) lastre di dimensione notevole (fino a 1m di lunghezza) sono utilizzate per realizzare il **primo corso di gronda** - *pioda 'd grunda* - (Fig. 4.5-29 - a); in tal modo, il numero di giunti laterali tra lastre dello stesso corso risulta ridotto in corrispondenza del punto dove il rischio



a) 4.5-29



4.5-28

Fig. 4.5-28 - La Colma, Craveggia: porzioni di falda con differente tessitura del manto; (Co) porzione del colmo, (Ce) porzione centrale e (Gr) porzione della gronda.

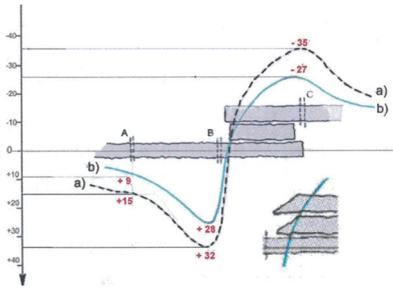
Nota 4.5-4 - Caratteri tipici dell'architettura montana sono la corrispondenza tra forma e funzione e la tradizione all'innovazione, ovvero la continua e naturale ricerca del modo migliore per realizzare ciascun nodo costruttivo; questo ha generalmente conferito alla costruzione nel suo insieme un adeguato comportamento nel tempo. Con ciò, la "conservazione" di modi tradizionali di realizzare, per esempio, i manti, sottende a regole costruttive necessarie per conferire ai manti medesimi la capacità di assolvere la loro funzione. Per contro, non sempre e non necessariamente, la "standardizzazione" rappresenta la risposta ad una precisa esigenza funzionale, prima ancora che estetica.

Nota 4.5-5 - Cfr. NELVA R., FASANA S., 2011.

Fig. 4.5-29 - Schema di posa delle grandi lastre di gronda e delle lastre dei primi corsi successivi: a) con grandi lastre (P_g) di notevole dimensione, il primo corso successivo viene realizzato alternando lastre allungate (o) a protezione dei giunti del corso di gronda con piccoli elementi (n) di compensazione; b) con lastre (P_g') generalmente di dimensione poco superiore a quelle del manto a monte; in fotografia c) l'intervento di integrazione del manto pone in evidenza tali differenze.



c)

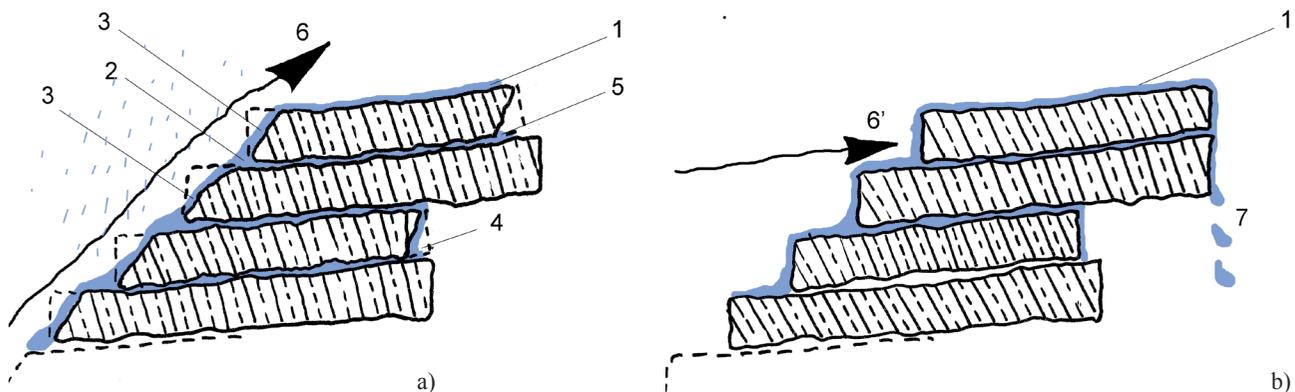


4.5-30

Fig. 4.5-30 - Valutazione del rafforzato effetto del vento in funzione della conformazione dei lati esposti delle lastre (Laboratorio prove prestazionali, Dipartimento ISEG, già ISET, Politecnico di Torino).

Fig. 4.5-31 - a) Sezioni schematiche con indicazione degli accorgimenti per l'efficace conformazione e disposizione delle lastre di pietra, secondo la "buona regola dell'arte"; tali accorgimenti sono utili ad evitare il gocciolamento conseguente alla risalita dell'acqua tra le superfici delle lastre sovrapposte, anche per rafforzato effetto del vento; b) schema di conformazione e disposizione che, in assenza degli accorgimenti predetti, può dar luogo a infiltrazioni e gocciolamenti al di sotto del manto:

- 1 - acqua di ruscellamento
- 2 - infiltrazione e risalita d'acqua tra le superfici delle lastre a contatto
- 3 - lavorazione del bordo superiore del lato esposto della lastra
- 4 - lavorazione del bordo inferiore del lato coperto delle costere
- 5- efficace avanzamento (disallineamento - d) delle lastre inferiori (battere)
- 6 - azione del vento, rafforzata (6') in assenza di lavorazione del lato esposto delle lastre
- 7 - infiltrazione d'acqua con gocciolamento al di sotto del manto



4.5-31

di infiltrazione è maggiore, per due ragioni concomitanti: a) massima portata di acqua che scorre sul manto (pari alla somma della precipitazione e dell'acqua di ruscellamento dell'intera falda a monte) e b) minore pendenza delle lastre (semiorizzontali);

- ii) nella tessitura della porzione centrale del manto (Ce in Fig. 4.5-28) eventuali **lastre di maggiore dimensione** o spessore, sono generalmente disposte in corrispondenza dell'appoggio delle *tempiare* (CO) sulle travi (PU) delle capriate: ciò è coerente sia con la necessità di proteggere il nodo della struttura lignea, che a causa della presenza di cunei o chiodi (generalmente di legno) risulta più esposta al degrado in caso di infiltrazione, sia con l'opportunità di localizzare i carichi maggiori in corrispondenza di nodi più rigidi della struttura lignea del tetto;

- iii) uso di **scaglie di compensazione** (s, *skaya* in Fig. 4.5-26, pag. 11) per conferire a) idoneo appoggio della singola lastra sul corso precedente, b) corretta inclinazione agli elementi e c) sufficiente planarità dei singoli corsi. L'uso delle scaglie ha positiva influenza anche sulla prevenzione delle infiltrazioni per capillarità: esse contribuiscono infatti alla posa distanziata delle lastre sovrapposte, interrompendo il potenziale meato tra le superfici a contatto;

- iv) **disallineamento** (5 in Fig. 4.5-31) **dei lati superiori** (l_s) di pio-de di corsi sovrapposti, per prevenire il gocciolamento all'interno del manto dell'acqua eventualmente risalita lungo la lastra superiore per capillarità o per concomitante effetto del vento (6 in Fig. 4.5-31);

- v) **lavorazione dei bordi delle lastre**. Prove sperimentali di comportamento di lastre con caratteristiche geometriche differenti hanno dimostrato il favorevole effetto (Fig. 4.5-31a): i) della lavorazione dei bordi superiori dei lati esposti delle lastre (3), per diminuire l'effetto del vento, e ii) della lavorazione dei bordi inferiori dei lati coperti (4) delle *costere*, per prevenire il gocciolamento all'interno del manto dell'acqua eventualmente risalita lungo la lastra superiore per capillarità o per concomitante effetto del vento (tale accorgimento migliora il comportamento del manto anche in assenza del disallineamento (d).

4.5.5.2 - Stabilità del manto

La “dislocazione” dei singoli elementi del manto può essere causata, in generale, da diversi fattori; principalmente dal trascinamento della neve, dalla formazione di ghiaccio e dal successivo disgelo, dalla eccessiva pendenza di posa e dall’azione del vento (pressioni, depressioni, vortici). Nel caso dei manti in questione, il sistema di posa tradizionale non prevede elementi di vincolo mutuo tra le *piode* e l’orditura lignea sottostante, anche a causa della evidente difficoltà, ad esempio, a forare la lastra per la successiva chiodatura. Di conseguenza, la stabilità degli elementi è garantita esclusivamente per gravità ed è funzione delle due caratteristiche geometriche proprie del sistema di posa, che si evidenziano nella sezione trasversale; inclinazione e sovrapposizione delle lastre di corsi successivi.

Allo scopo di fornire uno strumento utile alla valutazione della stabilità del manto in fase di progettazione, il tema è stato approfondito, con particolare riferimento alla definizione di uno schema statico interpretativo e alla caratterizzazione superficiale degli elementi (cfr. Par. 4.5.6.2).

4.5.6 - Valutazione della stabilità: proposta di un metodo

Il sistema di posa tradizionale dei manti in questione, come detto, non prevedeva l’utilizzo di dispositivi per il fissaggio degli elementi alla struttura lignea di sostegno. In questa situazione, a parità di tipo di posa e di sovrapposizione, la stabilità delle lastre allo scorrimento lungo la falda dipende prevalentemente dall’inclinazione del piano di posa e dall’attrito sviluppato tra le superfici a contatto nella regione di sovrapposizione delle lastre medesime.

In generale, considerato un corpo di peso P , posto su un piano inclinato di un angolo β rispetto all’orizzontale, la forza che si oppone allo scorrimento del corpo è pari alla componente del peso $P_n = P \cos \beta$, normale al piano, per un coefficiente φ , detto coefficiente d’attrito; per chè sia verificata la condizione di equilibrio allo scorrimento deve risultare

$$\varphi * P_n > P \sin \beta; \quad (4.5-1)$$

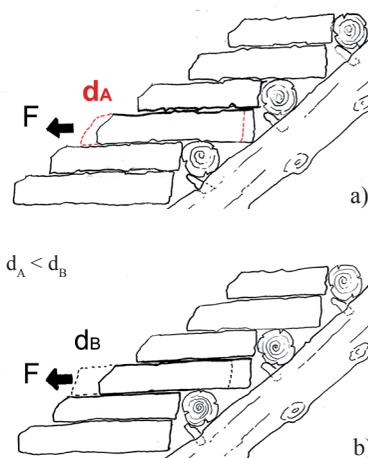
poichè vale la relazione

$$\varphi = \operatorname{tg} \varphi \quad (4.5-2)$$

sostituendo nella (-1), la condizione limite di equilibrio sarà espressa dalla (-3):

$$\operatorname{tg} \varphi * P \cos \beta = P \sin \beta \quad (4.5-3)$$

Fig. 4.5-32 - Influenza della rugosità di superficie sul comportamento delle lastre allo scorrimento; a parità di caratteristiche geometriche del manto e a parità di forze applicate, a maggiore rugosità superficiale corrisponde minore dislocazione degli elementi: $d_A < d_B$



4.5-32

dove φ , detto **angolo di attrito**, rappresenta un angolo fittizio, caratteristico di un materiale.

Nel caso in esame, noto β , inclinazione del piano di posa delle lastre, che si assume pari a 8° secondo la regola d'arte, per verificare analiticamente la stabilità di un manto sarà necessario determinare:

- i) $F_n = P_{tot} \cos\beta$, forza normale agente su una lastra al corso n ;

- ii) φ , espressione della rugosità caratteristica del litotipo, rappresentativa della particolare morfologia superficiale della lastra tradizionalmente conferita dalla lavorazione a spacco naturale.

Allo scopo, i paragrafi successivi illustrano i) uno schema statico di riferimento, per la determinazione degli effetti di sovrapposizione delle lastre nella determinazione della forza normale agente su una lastra n -esima (Par. 4.5.3.1) e ii) una proposta di metodo per la caratterizzazione della morfologia superficiale di lastre da tetto ottenute per spacco naturale, applicando al caso specifico la teoria mediata dalla geometria meccanica per la caratterizzazione delle superfici di discontinuità di ammassi rocciosi a comportamento rigido (Par. 4.5.3.2).

4.5.6.1 - Effetti della sovrapposizione e determinazione della forza agente sulla singola lastra

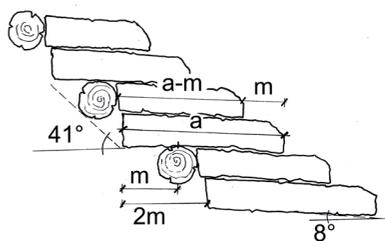
Le Figg. 4.5-33 a) e b), illustrano in pianta e sezione la struttura di un manto di beole ossolane, con elementi di dimensioni (a) e (a-m) rispettivamente, alternate (*battere* e *costere*).

Lo schema statico per il calcolo delle azioni e reazioni ipotizzato è valido assumendo alcune semplificazioni. In primo luogo, si fa riferimento al caso di lastre perfettamente parallele: in questo modo si trascurano le due configurazioni limite, conseguenza di imperfezioni di posa, nelle quali non si potrebbe computare l'effetto dell'attrito tra le lastre a contatto. In secondo luogo, la posizione delle reazioni si considera indipendente dalla rugosità, quindi funzione della geometria del sistema e non degli effettivi punti di contatto tra le lastre. Pertanto, la risultante delle lastre (a-m) è sempre assunta a metà dell'appoggio continuo; la risultante della lastra (a) è stata calcolata per le due posizioni, i) a metà della regione di sovrapposizione, ii) ad un terzo dell'appoggio continuo (tenendo in conto un eventuale cedimento dell'appoggio puntuale sul corrente). Analogamente, si ipotizza che l'appoggio sull'orditura lignea avvenga in un solo punto di contatto tra la superficie della lastra e il corrente a sezione perfettamente circolare, trascurando il contributo dell'attrito esercitato tra pietra e legno.

Con riferimento allo schema delle forze illustrate, è possibile impostare le due equazioni di equilibrio allo scorrimento.

Per le *costere* (a-m) (Fig. 4.5-33):

Fig. 4.5-33 - Sezione schematica del manto con alternanza delle lastre di diversa dimensione: *costere* (a-m) e *battere* (a).



$$R_{st} = P_{tot} \text{sen}\beta$$

$$R_{st} = \text{tg}\varphi (P \cos\beta + SP_o \cos\beta)$$

$$P \text{sen}\beta = \text{tg}\varphi (P \cos\beta + SP_o \cos\beta)$$

$$\text{tg}\beta = [(P + SP_o)/P] \text{tg}\varphi$$

dove:

- P peso proprio della lastre di lunghezza a-m
- ΣP_o somma dei pesi delle lastre sovrapposte alla lastra a-m
- β angolo di inclinazione della lastre sull'orizzontale
- $\text{tg}\varphi = \varphi$ coefficiente d'attrito.
- R_{st} reazione d'attrito tra lastre sovrapposte

Analogamente, per le *battere* (a) (Fig. 4.5-33, β):

$$R_{st} = P_{a,st} \text{sen}\beta$$

$$R_{st} = \text{tg}\varphi (P_{a,st} \cos\beta + SP_{o,st} \cos\beta)$$

$$P_{a,st} \text{sen}\beta = \text{tg}\varphi (P_{a,st} \cos\beta + SP_{o,st} \cos\beta)$$

$$\text{tg}\beta = [(P_{a,st} + SP_{o,st})/P_{a,st}] \text{tg}\varphi$$

$$R_w = P_{a,w} \text{sen}\beta$$

$$P_{a,w} \text{sen}\beta = \text{tg}\varphi (P_{a,w} \cos\beta + SP_{o,w} \cos\beta)$$

$$\text{tg}\beta = [(P_{a,w} + SP_{o,w})/P_{a,w}] \text{tg}\varphi$$

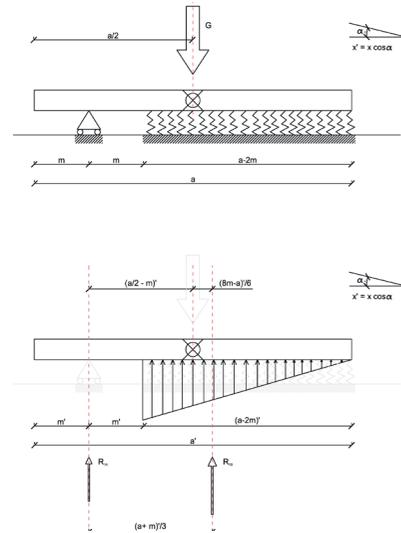
dove:

- P_a peso della lastra di lunghezza a
- R_{st} reazione d'attrito tra lastre sovrapposte
- R_w reazione d'attrito tra lastra e legno (correnti)

Per la determinazione della componente ΣP , somma dei pesi delle lastre sovrapposte alla lastra *n* considerata, l'analisi è stata condotta a partire dall'ipotetica lastra di colmo, e reiterata con sovrapposizione degli effetti, per le lastre dei corsi sottostanti, con l'obiettivo di deter-

4.5-1

JRC - Gneiss								
Fonte	Mat.	Sigla	JRC [deg]			Bibliografia		
			sup.1	sup.2	calc.		analisi	calcolato
FROM TABLES REFERENCES	Gneiss	-			5,8		B. S.A. Tatone, G. Grasselli [2010]	
		Gn3				6,7	7,8	G. Grasselli, P. Egger [2003]
		Gn6				8,5	13,3	G. Grasselli, P. Egger [2003]
		Gn9				1,8	7,5	G. Grasselli, P. Egger [2003]
		Gn10				9,1	7,2	G. Grasselli, P. Egger [2003]
		Gn11				3,1	7,3	G. Grasselli, P. Egger [2003]
		Gn12				12,5	7,4	G. Grasselli, P. Egger [2003]
		Gn13				7,4	7,9	G. Grasselli, P. Egger [2003]
		Media			7,00	8,34		
	Lusema Gneiss	Gn_L_1	13	17				Bagnolo Piemonte_Vottero [Fasana]
		Gn_L_2	7	13				Bagnolo Piemonte_Vottero [Fasana]
		Gn_L_3	5	5				Bagnolo Piemonte_BFP s.n.c. [Fasana]
		Gn_L_4	9	9				Bagnolo Piemonte_BFP s.n.c. [Fasana]
		Gn_L_5	17	13				Bagnolo Piemonte_BFP s.n.c. [Fasana]
				Media	10	11,4		



4.5-34

Fig. 4.5-34 - Schema statico semplificato delle forze (a) e delle reazioni (b) in gioco sulla singola lastra.

Tab. 4.5-1 - In tabella sono riportate le medie matematiche delle serie di dati derivanti dalle campagne di misurazione condotte presso il Politecnico di Torino e quelle riportate in letteratura. Dal confronto emergono differenze apprezzabili, conseguenza del fattore di scala, e dunque delle dimensioni dei campioni utilizzati. E' noto [GRASSELLI G., BRYAN S.A. TATONE 2010; GRASSELLI G., EGGER P. 2003; BORRI BRUNETTO M., CHIAIA B., INVERNIZZI S., 1998; RE F., SCAVIA C., ZANINETTO A., 1997; LABICHINO G., CRAVERO M. 1992] che l'area di contatto delle superfici di discontinuità in roccia è funzione della scala, e varia con legge frattale: tanto maggiore è la dimensione del campione considerato, tanto più la superficie tende idealmente ad essere liscia. L'influenza del fattore di scala sul parametro rugosità espresso dal JRC al comportamento a taglio delle superfici di discontinuità di giunti in roccia è ben espresso in [ZHAO J., 1997].

minare se detta ΣP fosse o meno funzione della posizione lungo la falda. L'ordine di grandezza dell'incremento delle azioni esercitate sulla singola lastra per effetto della posizione lungo la falda risulta sempre trascurabile, quando dovuto a lastre la cui proiezioni non insiste sull'elemento considerato.

4.5.6.2 - Caratterizzazione delle superfici di sovrapposizione. Proposta di un metodo empirico per la valutazione della rugosità delle lastre

Poiché non sono conosciuti studi precedenti per la caratterizzazione superficiale delle lastre da tetto, in primo luogo è stato necessario individuare un metodo di misura sperimentale. In particolare, noti la geometria del sistema, il peso delle lastre e impostate le equazioni all'equilibrio, occorre determinare come detto, il valore dell'angolo φ . Nel campo parallelo della geomeccanica, per la caratterizzazione delle superfici di discontinuità di ammassi rocciosi a comportamento rigido si fa riferimento alla Teoria di BURTON e CUBEY [1977]; in particolare alla legge empirica d'attrito, espressa nella (-4) :

$$t_p = s_n \tan [JRC \cdot \log_{10} (JCS/s_n) + \varphi_b] \quad (4.5-4)$$

dove:

t_p resistenza al taglio di picco

s_n tensione normale agente

Qui il valore dell'angolo φ è esplicitato in funzione di due termini: *i)* φ_b , definito **angolo di attrito di base** e *ii)* un secondo termine che tiene conto delle caratteristiche delle asperità della superficie (attraverso il Joint Roughness Coefficient - JRC), della resistenza di queste (attraverso il JCS) e della resistenza della superficie di contatto (tramite s_n).

Nei paragrafi successivi vengono esplicitati i singoli termini della (-4), anche con riferimento al metodo e agli strumenti per determinarli, secondo i primi risultati di studi condotti con il supporto dell'analisi sperimentale presso il Laboratorio prove prestazionali del Politecnico di Torino. Con ciò, si propone un metodo speditivo per la valutazione della stabilità dei manti tradizionali, con particolare riferimento al contributo della morfologia superficiale delle lastre caratteristica della lavorazione tradizionale a spacco.

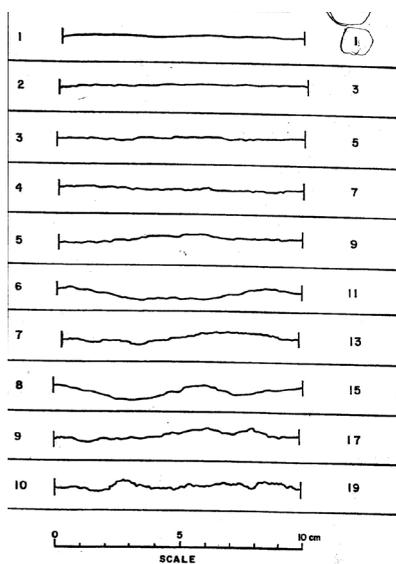
Valutazione del JRC

Il JRC, parametro che descrive la morfologia della superficie di discontinuità di un ammasso roccioso, questo tiene conto della dimensione, della altezza e della frequenza delle asperità. La caratterizzazione viene fatta con il metodo del rilievo geomeccanico (insieme ordinato di

Fig. 4.5-35 e 4.5-36 - Profilometro (o "pettine di Burton") impiegato per l'esecuzione del rilievo di profili di lastre di produzione corrente.



4.5-35



4.5-36

misure e osservazioni), utilizzando un profilometro (Pettine di BURTON, Fig. 4.5-35), dotato di aghi mobili con passo di lettura non superiore ad 1 mm; rilevato in questo modo il profilo della superficie oggetto di studio, il corrispondente valore del Joint Roughness Coefficient (JRC) si ottiene per confronto con una serie di profili di riferimento, riportati in Fig. 4.5-36 (BURTON e CUBEY – 1977).

I risultati della prima campagna di prove esplorative condotte presso il Politecnico di Torino, hanno confermato la validità del metodo anche per la caratterizzazione della superficie delle lastre da tetto. In Tabella 4.5-1 sono riportati valori di JRC calcolati analiticamente, presenti in letteratura e valori ottenuti da rilievi diretti, condotti su lastre attualmente prodotte in due significativi bacini estrattivi (di Luserna -CN- e dell'Ossola -VB-).

Le misurazioni sono state condotte sui due lati delle lastre, a intervalli di 5 cm (Fig. 4.5-37), lungo la direzione di scorrimento.

Questa serie di dati è stata utilizzata in prima approssimazione per mettere a punto il metodo; si è tuttavia osservata una certa dispersione dei risultati ottenuti, indicativa della difficoltà nell'acquisire una base di dati statisticamente significativa.

Si è quindi ipotizzato di poter acquisire il valore del parametro in questione dai corrispondenti set di discontinuità dei siti estrattivi di provenienza delle piode⁶. I dati relativi ai principali siti estrattivi attualmente operanti sul territorio sono utilizzabili con buona approssimazione per il caso di verifica di manti con lastre locali di provenienza nota.

Valutazione del JCS

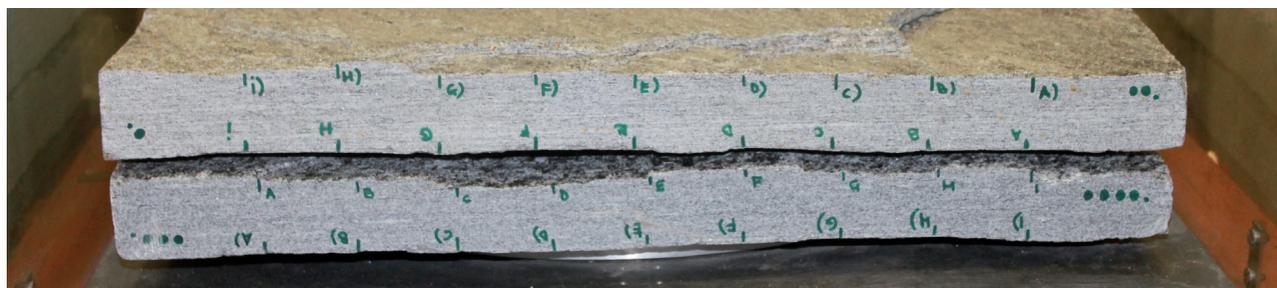
Il secondo parametro presente nella legge di Burton e Cubey, il Joint wall Compressive Strength (JCS), rappresenta la resistenza a compressione delle pareti del giunto, misurata impiegando lo sclerometro di Schmidt. Tale valore è utile per la valutazione numerica del grado di alterazione delle superfici di discontinuità, tramite il rapporto JCS/s_n , dove s_n indica la resistenza a compressione dell'ammasso. In analogia con quanto esposto nel precedente paragrafo, per lo studio qui esposto è stato assunto il JCS acquisito dallo studio Ri.S.C., con verifica a campione su lastre da tetto.

Valutazione dell'angolo d'attrito di base φ_b

L'angolo di attrito di base φ_b è una caratteristica propria del ma-

Nota 4.5-6 - Un significativo contributo all'impostazione del metodo è stato fornito, a questo proposito, dalla banca dati georeferenzata della Provincia del Verbano Cusio Ossola, individuata con il nome del progetto Ri.s.c.. Grazie ai dati messi a disposizione dal responsabile del progetto, è stato possibile limitare il numero dei rilievi diretti sulle lastre, questa volta allo scopo di verificarne la rispondenza con le caratteristiche della famiglia/set di discontinuità denominata Ks, cioè della scistosità.

Fig. 4.5-37 - Sovrapposizione di lastre a spacco naturale secondo i profili rilevati con Pettine di Burton per la caratterizzazione delle superfici e per la successiva interpretazione dei risultati delle prove di scorrimento.



4.5-37

Nota 4.5-7 - Per la messa a punto dell'apparecchiatura e la valutazione per confronto dei valori ottenuti, una prima campagna di prove esplorative è stata replicata con gli stessi campioni utilizzando una apparecchiatura per *tilt test*, messa a disposizione dal Laboratorio di Meccanica delle rocce del Politecnico di Torino.

teriale (litotipo); si determina sperimentalmente, mediante prove di taglio eseguite su provini con superficie piana, levigata, sabbiata e non alterata. Nel caso di superfici di discontinuità di ammassi rocciosi, tale parametro viene sostituito con l'angolo di attrito residuo $\varphi_r < \varphi_b$, che si ottiene per via sperimentale da prove di scorrimento di superfici piane alterate. La correlazione numerica, per il calcolo del f_r noto f_b è stata determinata dagli stessi BURTON e CUBEY nel 1977: $\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 (r/R)$.

Nel caso dello studio considerato, il rapporto r/R è sempre risultato prossimo all'unità, pertanto nei calcoli può essere assunto il valore φ_b .

Per la determinazione di questo valore, è stata messa a punto un'apparecchiatura semplificata⁷ (Fig. 4.5-38), allo scopo di rendere possibile l'analisi a campione in situ (presso il sito estrattivo o il magazzino dei produttori, nel caso di lastre nuove, o direttamente presso il cantiere di recupero nel caso di reimpiego delle lastre esistenti).

Sulla base dei primi risultati ottenuti, le caratteristiche geometriche dei manti di *piode* realizzati con lastre e sistema di posa tradizionale risultano verificate anche con l'applicazione delle nuove norme tecniche sulle costruzioni, per le combinazioni di carico e i coefficienti di sicurezza previsti per il caso in esame.

4.5.7 - Scelta di materiali attualmente disponibili

La caratterizzazione delle lastre secondo il metodo illustrato nei paragrafi precedenti ha come obiettivo specifico la valutazione della stabilità di manti tradizionali. I risultati ottenuti sono significativi anche per orientare la scelta delle lastre, per la realizzazione di interventi di recupero e conservazione (sostituzione totale o integrazione degli elementi del manto), tra quelle attualmente disponibili. *Piode* prodotte nei siti estrattivi locali, ottenute per spacco naturale ed eventualmente sbazzate sui lati esposti sono da preferire a lastre di materiali differenti e ottenute con taglio di grandi blocchi per una serie di ragioni concomitanti:

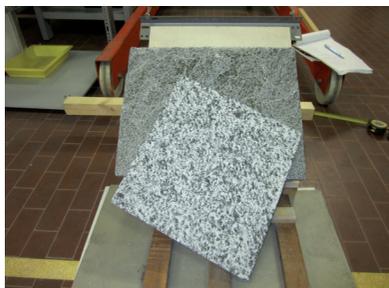
- efficace contributo alla stabilità del manto realizzato senza l'utilizzo di dispositivi di fissaggio;
- efficace contributo alla riduzione dei rischi di infiltrazione d'acqua;
- coerenza dell'immagine (geometria e caratteristiche cromatiche, anche nel tempo) con l'immagine del manto preesistente o con la porzione di manto in buono stato di conservazione, da integrare.

Fig. 4.5-38 - Prove di scorrimento con apparecchiatura semplificata messa a punto presso il laboratorio prove prestazionali del Politecnico di Torino; a) durante il sollevamento e b) a scorrimento avvenuto.

Fig. 4.5-39 - Prove di scorrimento condotte con apparecchiatura per tilt test del Laboratorio di Meccanica delle Rocce del Politecnico di Torino.



4.5-38a



4.5-38b



4.5-39

4.5.8 - Linee risolutive per interventi di recupero e conservazione di tetti con manto di piode

Tra i basilari principi assodati per interventi di recupero e conservazione, la singolarità di ogni caso ricorda che non è possibile definire generali soluzioni universalmente valide. Gli schemi a corredo del presente paragrafo sono proposti come indirizzi risolutivi efficaci, con riferimento al quadro di linee risolutive⁸ dell'intreccio ricorrente di problemi critici. Tali linee risolutive sono esemplificative della necessità di contemperare differenti insiemi di esigenze (principalmente esigenze di conservazione ed esigenze funzionali correnti) spesso tra loro in contrasto⁹.

Nel caso dei tetti con manto di piode i problemi di conservazione degli esterni riguardano principalmente la tessitura del manto visto di fronte (prospetto di gronda), l'immagine del colmo visto di profilo (prospetto di frontone), il raccordo tra manto e gronda visto di sopra (consistente nella necessità di conservare la singolare tessitura del manto in corrispondenza del nodo) e visto di sotto (consistente nel mantenere una coerente orditura lignea in rapporto alla struttura portante). I problemi di conservazione dell'interno riguardano principalmente la conservazione a vista delle orditure lignee della struttura del tetto: in particolare delle capriate di grande luce dotate di traverse e di saette e delle capriate di luce minore con saette, ma senza traverse.

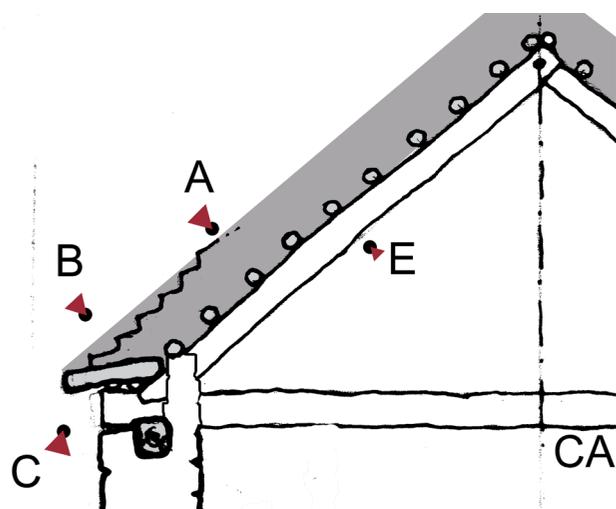
Tali esigenze, nel caso più diffuso di recupero ai fini abitativi degli spazi di sottotetto, devono essere contemperate con le esigenze di isolamento termico (ed eventualmente acustico), di riduzione del rischio sismico (*miglioramento*), e di riduzione del rischio di infiltrazioni, con la conseguente realizzazione di nuovi strati interni. Con riguardo a questi ultimi, ciascuna soluzione dovrebbe consentirne la temporanea e agevole rimozione, per permettere, almeno limitatamente ad alcune porzioni di ciascuna falda, l'ispezionabilità del manto. Ciò risulta utile

Nota 4.5-8 - Nelle figure che seguono sono illustrate quattro linee risolutive, con riferimento a differenti volumi interessati dall'intervento. A ciascuna di esse possono corrispondere soluzioni diverse e distinte, definite caso per caso con riferimento alle singolari caratteristiche del manufatto.

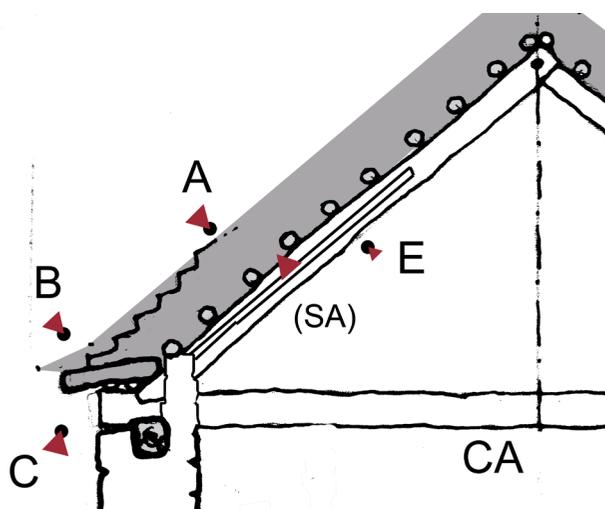
Nota 4.5-9 - Le linee risolutive e le soluzioni proposte sono contenute anche nelle lezioni di Paolo SCARZELLA presentate nei moduli dei Workshop tenuti nell'autunno 2013 presso la sede della Provincia del VCO e disponibili sul sito www.alpstone.eu/it-IT/formazione/workshop-3/5.htm

Fig. 4.5-49 - Linea risolutiva I - Conservazione integrale delle capriate comprese le saette (E), dello sporto protettivo e di raccordo alla gronda visto di sotto (C), innalzamento e rifacimento del manto con reimpiego delle piode esistenti (A), omissione del secondo corso delle piode di gronda (B), isolamento termico e acustico, miglioramento del comportamento sismico.

Fig. 4.5-50 - Linea risolutiva II - Conservazione integrale delle capriate comprese le saette, dello sporto protettivo e di raccordo alla gronda visto di sotto, innalzamento e rifacimento del manto con reimpiego delle piode esistenti, reinterpretazione dei corsi di gronda visti di sopra, isolamento termico e acustico, miglioramento del comportamento sismico.



4.5-49



4.5-50

per conservare l'abitudine alla tradizionale periodica continua manutenzione, con particolare riferimento alla individuazione di eventuali infiltrazioni e alla possibilità di rimozione del terriccio formatosi o depositato nei giunti tra le lastre di pietra, che è spesso causa concomitante di infiltrazioni di acqua.

Fig. 4.5-51 - Linea risolutiva III - Conservazione del manto, del suo sporto di raccordo alla gronda, dei puntoni e catene delle capriate, ma asportazione delle saette, realizzazione di elementi e strati interni per la soffittatura, per l'isolamento termico e per il miglioramento del comportamento sismico.

Fig. 4.5-52 - Linea risolutiva IV - Nell'ipotesi relativa al recupero dello spazio sotto le catene, conservazione integrale delle capriate comprese le saette e del manto di copertura, compreso lo sporto protettivo e di raccordo alla gronda.

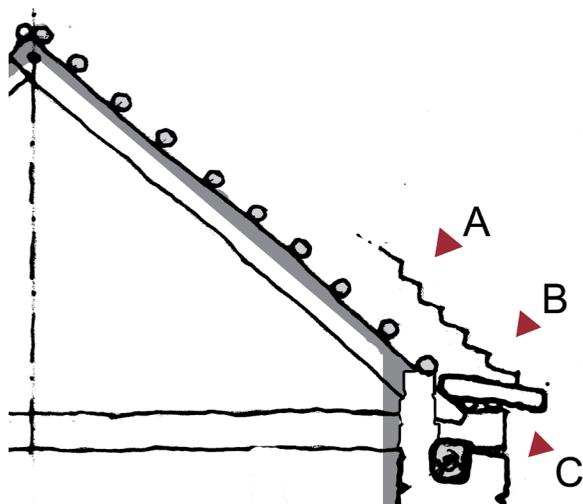
Nota 4.5-10 - Le lamiere verniciate sono da preferire alle lamiere non trattate (la cui ossidazione dà luogo in breve tempo ad alterazioni cromatiche non coerenti con l'immagine del materiale originale) e alle lamiere zincate o inox (la cui brillantezza è accentuata in condizioni di manto bagnato o di irraggiamento solare).

Un caso ricorrente, la cui soluzione risulta di particolare rilievo in relazione al suo elevato impatto sull'immagine del manufatto, e di questo nel suo *ambitus*, è la necessità di intervenire tempestivamente per ripristinare significative porzioni di falda, o l'intero manto, anche temporaneamente e con costi ridotti con il principale scopo di conservare in opera le membrature lignee originarie. In questi casi, tra i materiali alternativi diversi da quelli tradizionali dei quali è ammesso l'uso, in accordo con le norme ed indirizzi contemplati nel presente manuale, vi è la lamiera.

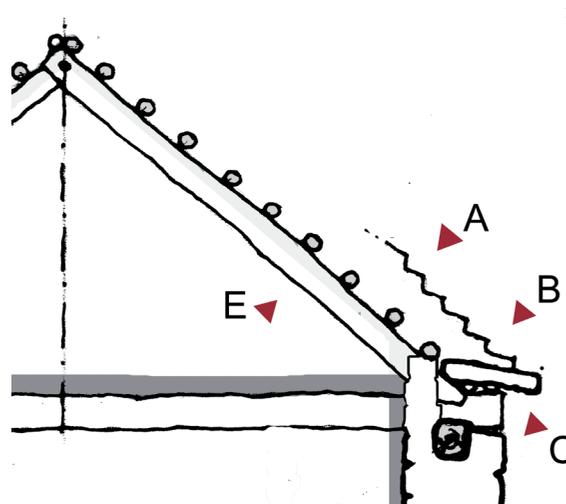
In proposito, è opportuno definire alcune caratteristiche specifiche del materiale, al fine di orientare correttamente la scelta tra la grande varietà di tipi disponibili sul mercato. In particolare, il materiale scelto deve rispondere ad alcuni requisiti, di seguito elencati:

- caratteristiche cromatiche,
- comportamento nel tempo (durabilità),
- compatibilità con i materiali esistenti (membrature lignee),
- possibilità di adattamento alle geometrie irregolari del manufatto,
- reversibilità dell'intervento,
- possibilità di smaltimento o di eventuale reimpiego,
- facilità al trasporto, anche in alta quota,
- facilità di posa in opera.

Sono quindi da preferire lamiere verniciate¹⁰ con colori simili al colore di massa del manto lapideo (tonalità di grigio, come per esempio il colore RAL 7012), semplici (non grecate, oppure con grecature basse e visivamente poco impattanti, scelte anche in relazione alla capacità di portata del sistema di copertura rispetto al sovraccarico della neve),



4.5-51



4.5-52

evitando l'uso di lamiere aventi strati integrati con funzione di isolamento termico (generalmente dotate di lati predisposti per un rigido sistema di sovrapposizione longitudinale e trasversale e difficilmente adattabili alla non regolare geometria delle strutture originarie)¹¹.

Occorre inoltre considerare gli aspetti di sostenibilità economica nella scelta di questi materiali sostitutivi della pietra; per esempio, suggerire o imporre lamiere di leghe speciali (come le lamiere di zinco-titanio) è di fatto una prescrizione che impone costi sensibilmente elevati, quindi non particolarmente vantaggiosa rispetto ai manti di pietra.

Nota 4.5-11 - Le lamiere coibentate possono porre anche problemi di smaltimento al termine del ciclo di vita, con possibili costi per il conferimento in discariche autorizzate. Le lamiere semplici, invece, possono essere conferite in centri per il riciclaggio del metallo.

BIBLIOGRAFIA Cap. 4.5

- RE F., SCAVIA C., ZANINETTI A., *Variation in contact areas of rock joint surfaces as a function of scale*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, pp. 12, 1997, Vol. 34, pagine da 1 a 12, ISSN: 1365-1609, doi: 10.1016/S1365-1609(97)00164-0 1997.
- GRASSELLI G., TATONE B.S.A., *A New 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC*, n: International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Elsevier 2010, Issue 47, pp. 1391-1400.
- FASANA S., NELVA R., *Improvement of the performance of traditional stone roofs by wind driven rain experimental tests*; In: *Construction and building Materials*, Vol. 25, n. 4, Elsevier 2011, pp. 1081-1091 doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.040 .

4.6 VOLTE

MARCO ZERBINATTI

4.7 - I SOLAI

RICCARDO NELVA, MARCO ZERBINATTI

4.7.2 - Tecniche di intervento

Le operazioni per irrobustire i solai di legno possono prevedere:

4.7.2.1 - Interventi per irrigidire i solai rinforzandoli con doppio tavolato incrociato

Nel caso del mantenimento in opera degli impalcati originari, l'irrigidimento del solaio rinforzandolo con doppio tavolato incrociato, con i due tavolati ruotati di 45° rispetto all'esistente. [citare Turini]

Lo scopo è quello di migliorare la ripartizione dei sovraccarichi accidentali e migliorare la resistenza complessiva generando un funzionamento a lastra del solaio ligneo, conservando lo schema statico originario. I tavolati nuovi saranno di tipo maschiato e saranno incollati tra loro con l'esistente (colle viniliche) nonché avvitati alle tavole sottostanti. [no reversibilità]

È possibile sfruttare la nuova struttura a piastra per collegare i muri perimetrali mediante staffe a Y inserite nei muri (il gambo singolo nella muratura) e fissate con malte di apposita formulazione [fare nota a lato testo sulle ragioni] e le due braccia a staffa piatta avvitate sul tavolato.

4.7.2.2 - Interventi per irrigidire i solai con bandelle metalliche

I solai originali possono essere irrigiditi anche avvitando sul tavolato bandelle metalliche poste a 45° rispetto al tavolato esistente, ovvero con delle strisce di FRP incollate con resine epossidiche al tavolato (posta sempre a 45° rispetto all'originario).

4.7.2.3 - Interventi di rinforzo di solaio con tavolato collaborante

Il rinforzo del solaio con nuovo tavolato collaborante ha lo scopo di aumentare la capacità portante ai carichi verticali del solaio. Anche aumentare la rigidezza sul piano orizzontale per trasmettere le forze orizzontali; migliorare la ripartizione dei carichi verticali; collegare orizzontalmente i muri verticali.

Come si esegue: si possono utilizzare tre strati di pannelli di compensato incollati con resine epossidiche, con connettori ad aderenza migliorata fissati con resina epossidica.

4.7.2..4 - Interventi di rinforzo dei solai con getto collaborante

Scopo: migliorare la ripartizione dei carichi verticali, aumentare la rigidità sul piano orizzontale per trasmettere le azioni orizzontali.

[nota: ricordare che l'intervento in questione non è così decontestualizzato perché abbiamo trovato numerosi solai di legno con sopra il getto di conglomerato, liscio sullo strato esterno oppure con piastrelle di cotto/con pietra posate]_rinforzato con rete elettrosaldata.

4.8 - INTERVENTI PER MIGLIORARE LE PRESTAZIONI ENERGETICHE E RIDURRE I DISPERDIMENTI TERMICI

RICCARDO NELVA, MARCO ZERBINATTI

4.8.1 - Introduzione

Il recupero funzionale per destinazioni residenziali (temporanee o permanenti) richiede di poter raggiungere e mantenere, per il periodo invernale, condizioni termoigrometriche accettabili e confrontabili con gli standard di confortevolezza degli edifici contemporanei e, nello stesso tempo, seguire l'attuale indirizzo di un sensibile risparmio energetico.

Per mantenere i caratteri formali, materici e di immagine complessiva degli edifici tradizionali di pietra a vista, in caso di prolungato uso invernale risulta indispensabile predisporre opportuni isolamenti all'interno. Di conseguenza, il problema di tutto il sistema di isolamento dell'involucro è indirizzato a predisporre all'interno delle pareti degli strati che riducano i disperdimenti termici abbinati a strati che si oppongano contemporaneamente alla diffusione del vapore verso la struttura muraria (schermi o barriere). La stratigrafia del sistema di isolamento va studiata infatti in modo da evitare le condensazioni interstiziali del vapore d'acqua che si diffonde dai locali riscaldati verso l'esterno. Tali condensazioni si concentrerebbero tra il "pacchetto" di isolamento posto all'interno e la muratura di pietra originaria. Così facendo, in genere ci si trova nella situazione di una massa termica interna da riscaldare relativamente bassa: come caratteristica generale, essa si riscalda facilmente e si raffredda altrettanto facilmente.

Negli edifici di struttura di pietra recuperati a fini residenziali, solitamente si possono presentare casi con caratteristiche costruttive comprese tra due opposti:

- 1) muri regolari, con superfici interne planari e rettilinee;
- 2) profili interni piuttosto irregolari, superfici non planari e con andamento non rettilineo.

Nel primo caso è possibile intervenire con una stratigrafia staccata dal muro con camera d'aria e protetta all'interno della stanza con un rivestimento di legno. La successione degli strati a partire dall'ambiente interno può essere: rivestimento di legno, barriera al vapore, isolante su doppio strato incrociato o sfalsato, camera d'aria¹, muratura. In questo caso si dispone un adeguato isolamento termico ed è possibile "controllare" tutti i fenomeni termoigrometrici. Si adotta la soluzione:

- di rivestire l'isolante con la barriera al vapore;
- di proteggere la barriera al vapore con una *boiserie* o una perlina-tura, a seconda dei casi.

Qualora vi sia mancanza di planarità sulle superfici interne, è possi-

Nota 4.8-1 - La camera d'aria può essere debolmente ventilata dall'esterno nel caso vi sia passaggio di aria tra i giunti della muratura.

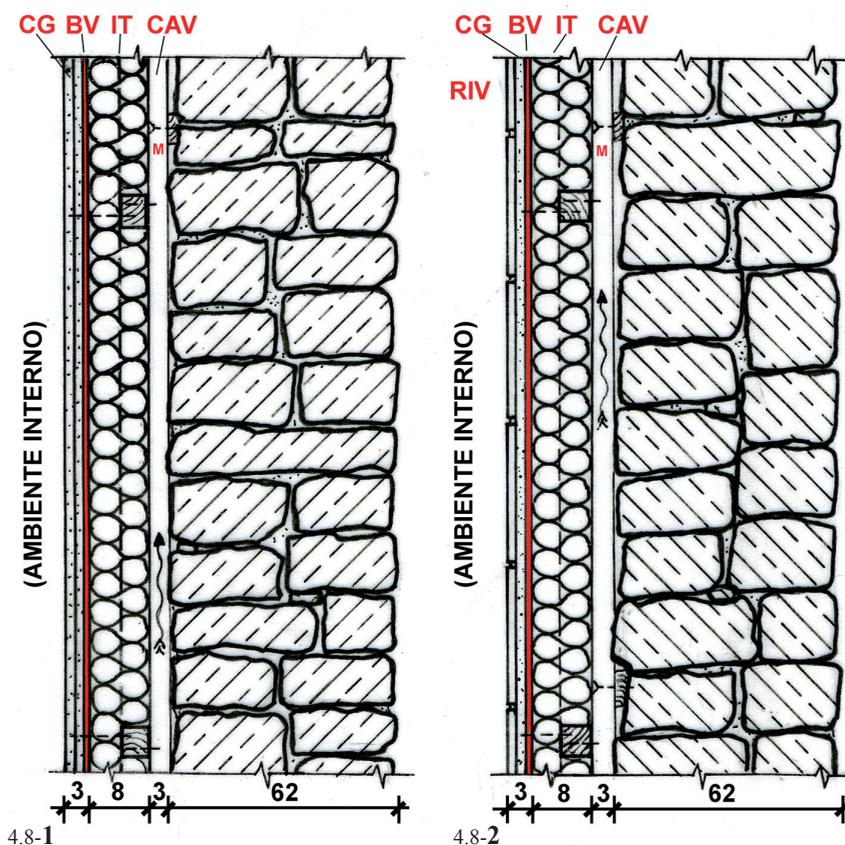
bile isolare gli ambienti:

- staccandosi dalla muratura, perdendo conseguentemente la relativa superficie utile di pavimento e utilizzando una struttura portante leggera di sostegno del pacchetto²;

- utilizzando degli intonaci a elevata capacità isolante, con particolari prestazioni, con aggregati speciali, fibre, additivi e aggiunte specifici. L'impiego di intonaci, tuttavia, salvo casi eccezionali preclude l'inserimento di una barriera al vapore; di conseguenza, occorre prevedere l'utilizzo di intonaci a forte spessore (dell'ordine di 8 cm) applicati in più strati, con una finitura verso l'ambiente interno che deve risultare essere, per quanto possibile, la meno permeabile al vapore d'acqua. In questo caso, sarà comunque molto difficile raggiungere i valori di trasmittanza richiesti dalla vigente normativa. Inoltre sarà anche difficile evitare che si formino condensazioni interstiziali. Pertanto sarà importante calcolare la quantità di vapore che un rivestimento di intonaco a elevato spessore potrà accumulare nel periodo invernale, necessariamente contenuta entro valori limite stabiliti anche dalla normativa tecnica³, per poi verificare che le stesse vengano rievaporate nel successivo periodo primaverile ed estivo.

Nota 4.8-2 - Il progettista, valutate le condizioni in cui opera e le esigenze della committenza, potrà optare per soluzioni anche molto diverse tra loro ma attagliate allo specifico caso.

Nota 4.8-3 - Norma UNI EN ISO 13788:2013 Appendice Nazionale NA. 1.5. Questa norma prevede un massimo accumulo di 500 g/m².



Figg. 4.8-1 e 4.8-2 - Legenda dei simboli.

- CG cartongesso per luoghi umidi
- BV barriera al vapore
- IT isolante termico
- CAV camera d'aria ventilata
- M montante di sostegno per l'isolante
- RIV rivestimento ceramico (bagni, cucine)
- L rivestimento di legno interno
- LL listello per il fissaggio dell'isolamento

4.8.2 - Soluzioni praticabili per l'isolamento

Per focalizzare l'attenzione su criteri e modi per isolare ritenuti vantaggiosi nel recupero di questi edifici, di seguito vengono illustrati tre esempi.

4.8.2.1 - Stratigrafia con pannelli "minerali"

La realizzazione di questa soluzione prevede il posizionamento in opera di una struttura di sostegno (di legno o di profilati di metallo), fissati alle pareti o vincolati al pavimento e al soffitto. La loro funzione è quella di allontanarsi dal muro nel caso questo non sia planare, di sostenere i pannelli di isolamento termico e, contemporaneamente, di permettere il fissaggio di controlistelli orizzontali atti a sostenere il rivestimento interno di legno. Se sono utilizzati montanti scatolari di metallo è conveniente disporre i pannelli di isolamento in doppio strato a giunti sfalsati, in modo da evitare il ponte termico⁴ nelle zone di fissaggio (Fig. 4.8-3). Non bisogna forare la barriera al vapore collocata nel pacchetto di isolamento.

Nota 4.8-4 - E' possibile anche impiegare profilati con taglio termico riempiti con schiume isolanti.

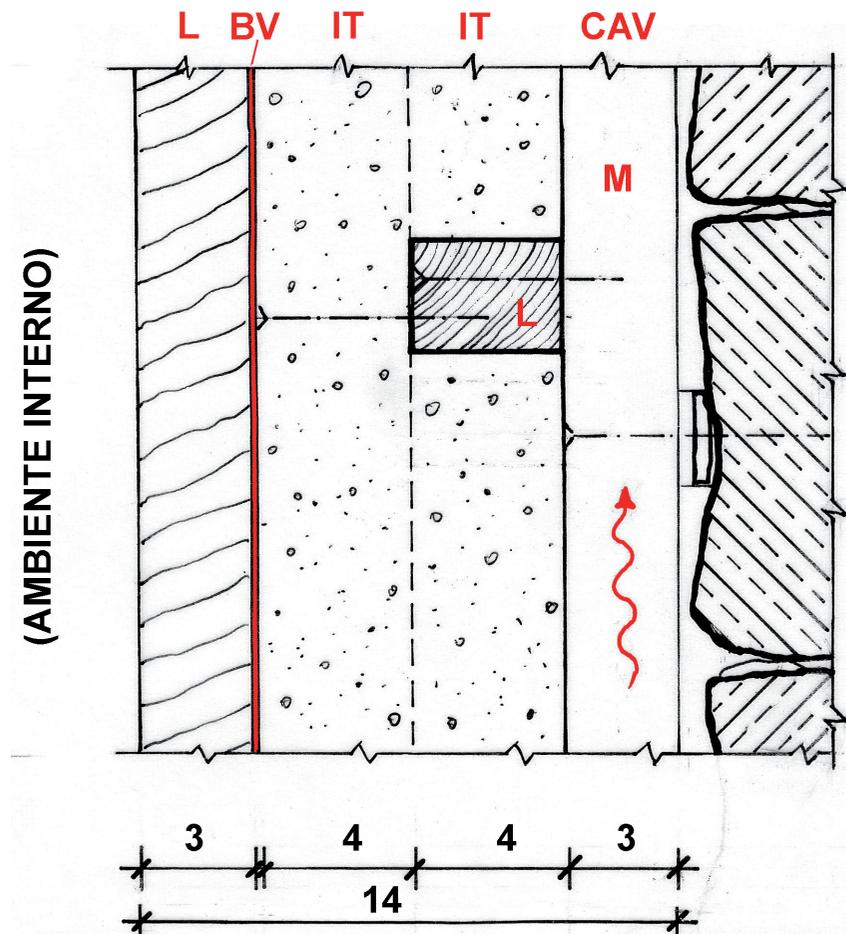


Fig. 4.8-3 - Legenda dei simboli.

- L rivestimento di legno interno
- BV barriera al vapore
- IT isolante termico (pannelli minerali)
- LL listello di legno orizzontale (supporto)
- M montante di sostegno per l'isolante
- CAV camera d'aria ventilata

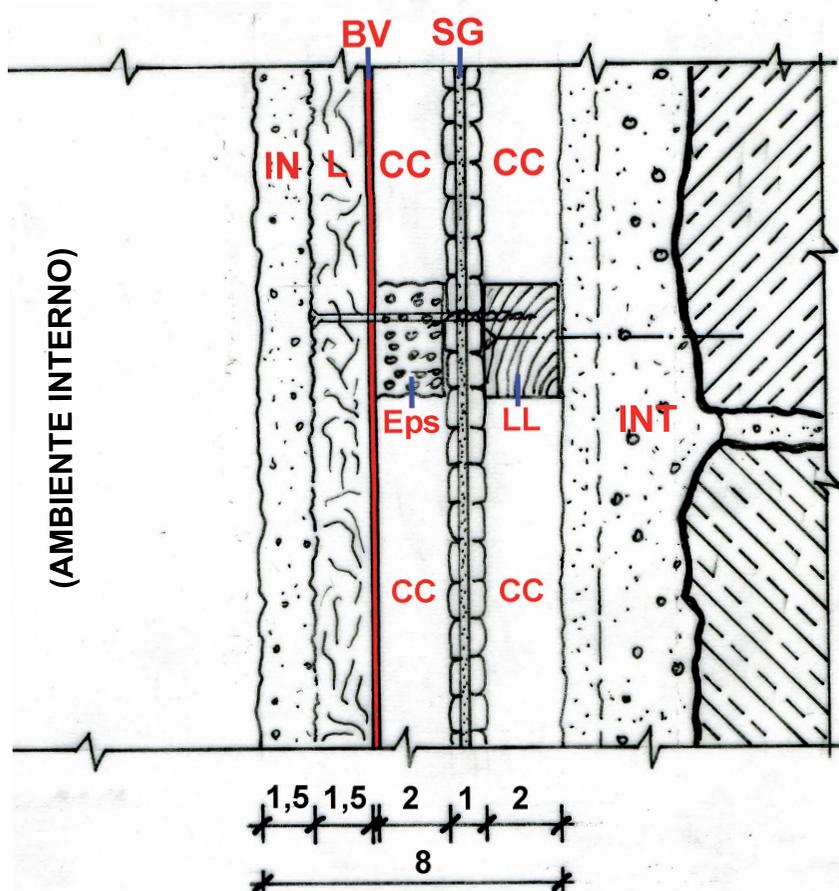
4.8.2.2 - Impiego di pannelli di isolamento ad altissime prestazioni, quali l'aerogel o materiali multistrati riflettenti.

Al posto di pannelli di fibra naturale minerale oppure sintetici è possibile usare pannelli di aerogel o pannelli multistrati riflettenti⁵, grazie ai quali si può ridurre lo spessore complessivo in relazione alle loro elevate prestazioni isolanti (Fig. 4.8-4). In questo caso, occorre prestare molta attenzione alla scelta dei sistemi di fissaggio e nelle operazioni di posa in opera, poichè il danneggiamento dei pannelli (in particolare dei pannelli di aerogel) compromette sensibilmente le prestazioni di isolamento. Ovviamente, anche l'ordinario utilizzo dell'edificio richiede qualche cautela in più: per esempio, non è possibile praticare in modo casuale buchi nel pacchetto di isolamento (per fare passare un impianto o per fissare un elemento di arredo).

Inoltre, occorre tenere in considerazione l'elevato costo attuale di questi materiali; la loro scarsa diffusione sul mercato edilizio, connessa con usi specifici in altri ambiti di applicazione, li colloca su di una fascia alta di prezzo, cui vanno sommati i costi di mano d'opera per la posa.

Nota 4.8-5 - Per *pannello di aerogel* si intende un componente edilizio stratificato, formato da un involucro entro il quale è contenuto il materiale isolante (aerogel) a bassa conducibilità termica (circa 0,013 - 0,015 W/mK). L'aerogel più diffusamente impiegato in edilizia è quello a base di silice; esso è composto da aria (95 - 98 %) e silicio amorfo (2 - 5 %). Per *pannello multistrato riflettente* si intende un componente edilizio formato da più strati di vari materiali accoppiati (tra cui alluminio puro, films alluminizzati, fogli di polietilene espanso, ovatta, per esempio); le facce esterne di solito sono di alluminio puro accoppiato con reti di rinforzo. I pannelli in questione uniscono elevate prestazioni termoisolanti con un basso elevato.

La normativa di riferimento per le prestazioni di isolamento termico di materiali termoriflettenti è la norma UNI EN 16012:2012 - *Isolamento termico degli edifici. Isolanti riflettenti. Determinazione della prestazione termica dichiarata.*



4.8-4

Fig. 4.8-4 - Legenda dei simboli.

- IN intonaco interno
- L pannello di lana di legno
- BV barriera al vapore
- CC camera d'aria chiusa (h max 60 cm)
- Eps distanziale di polistirene alta densità
- SG pannelli isolanti di "silica-gel"
- LL listello di legno per il fissaggio dei pannelli di materiale isolante
- INT intonaco esistente

4.8.2.3 - Applicazione di intonaco termico all'interno

La soluzione con intonaco isolante applicato alla superficie interna del muro impone una serie di attenzioni in fase di esecuzione. Innanzitutto è fondamentale la scelta del materiale di base dell'intonaco in relazione alle prestazioni isolanti dichiarate dal produttore. Si ritiene preferibile orientare la scelta verso materiali testati mediante apposite campagne di sperimentazione e di validazione eseguite presso Istituti di ricerca accreditati.

Nota 4.8-6 - Norma UNI EN 459-1:2010, *Calci da costruzione. Definizioni, specifiche e criteri di conformità.*

Inoltre, per essere coerenti con i criteri di compatibilità, è opportuno scegliere intonaci miscelati con leganti naturali, per esempio le calci idrauliche naturali NHL conformi alla norma UNI EN 459-1:2010⁶. Gli aggregati isolanti possono essere di tipo naturale come: il sughero in granuli, la perlite espansa, la pietra pomice o la vermiculite, per esempio.

La curva di distribuzione granulometrica è studiata per conferire una bassa massa volumica apparente con porosità chiuse (soprattutto allo stato indurito). Per lo stesso motivo e per incrementare la capacità isolante, questi intonaci sono di solito additivati con aeranti e con altri tipi di additivi, capaci di conferire agli impasti allo stato fresco particolari proprietà di lavorabilità e di tixotropia.

Spesso l'applicazione di questi intonaci richiede la messa in opera di una rete porta intonaco. Questi intonaci hanno una formulazione degli additivi che favorisce l'aggrappo della miscela alle pareti e possono

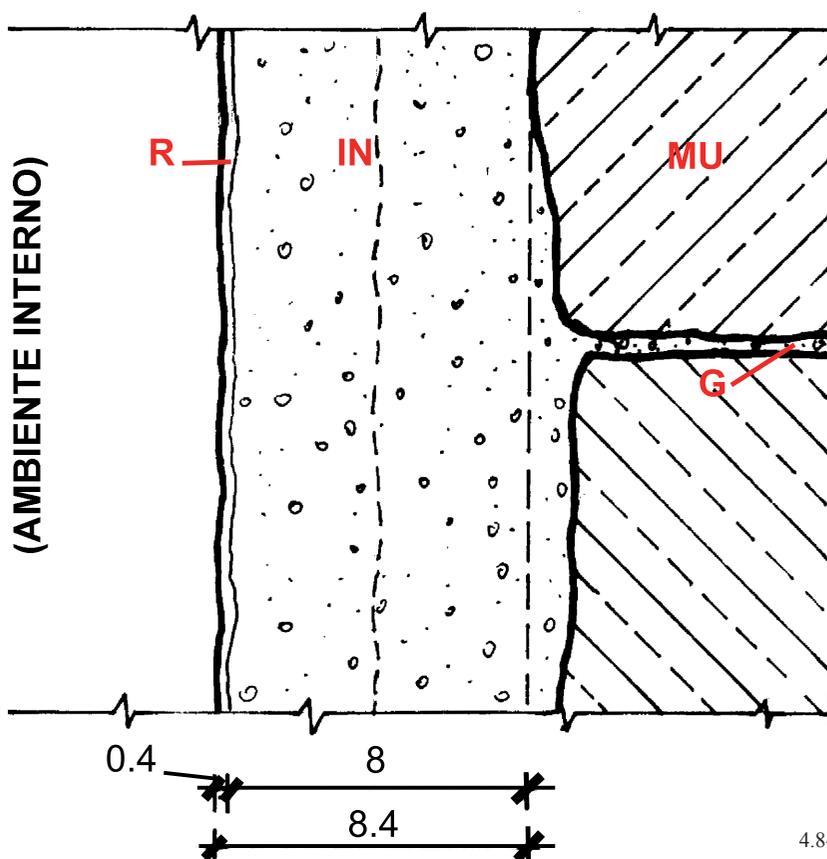


Fig. 4.8-5 - Legenda dei simboli.

- R rasatura interna poco diffusiva al vapore d'acqua (μ elevato)
- IN intonaco ad elevata prestazione isolante
- MU muratura di pietra
- G giunti di malta da ripassare prima della applicazione dell'intonaco isolante

richiedere anche un trattamento con aggrappante prima della vera e propria applicazione.

La stratigrafia dell'intonaco isolante va completata con una rasatura superficiale il più possibile chiusa, che riduca sensibilmente la diffusione del vapore d'acqua presente nell'ambiente interno che si diffonde negli strati dell'intonaco. Sono attualmente in fase di sperimentazione nuove formulazioni di intonaci isolanti e di malta per rasatura con fattore di resistenza alla diffusione del vapore più elevato di quelli attuali⁷.

4.8.3 - Valutazione della quantità di vapor d'acqua condensata e verifica della sua rievaporazione in un ciclo stagionale

4.8.3.1 - Ipotesi di calcolo

E' stato ipotizzato di valutare la condensazione che si verifica in un muro d'ambito composto con pietra di blocchi di gneiss a spacco (o di altri litotipi locali simili), spesso 60 cm, con isolamento mediante intonaco spesso 8 cm con rasatura di 4 mm, poco diffusiva al vapore, secondo la soluzione illustrata in Fig. 4.8-5. Per le condizioni ambientali si ipotizzano due localizzazioni dell'edificio in ambito ossolano, una a Veglio di Montecrestese (altitudine 550 m slmm) e una a Santa Maria Maggiore in Val Vigizzo (altitudine 816 m slmm).

Per le verifiche termoigrometriche è stata seguita la norma UNI 13788 - *Prestazione igrometrica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo*.

Seguendo la norma innanzi citata è stata valutata la quantità di condensa che si forma nel muro nella stagione fredda calcolandola mese per mese, utilizzando i dati di partenza (temperature medie mensili e umidità medie mensili) rilevati dalla stazione dell'Osservatorio Meteorologico presso il Collegio Rosmini di Domodossola.⁸

Le temperature della località Veglio di Montecrestese e Santa Maria Maggiore sono state calcolate tenendo conto della differenza di altitudine rispetto a Domodossola, con l'algoritmo riportato in UNI 10349 - *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici*, al punto 4, che definisce la correzione da apportare alla temperatura della località di riferimento $\theta_{e,r}$ tenendo conto della differenza di altitudine $(z-z_r)$ e del gradiente verticale di temperatura δ con la seguente formula:

$$\text{Temperatura nella località considerata: } \theta_e = \theta_{e,r} - (z-z_r) \cdot \delta$$

dove δ = gradiente verticale di temperatura = 1/178 .

Negli specifici casi esaminati:

$z_1 = 550$ m slm (Veglio di Montecrestese)

Nota 4.8-7 - Al momento sono state avviate, in via sperimentale, nuove formulazioni da parte di un'azienda produttrice in partenariato con il Politecnico di Torino. Lo scopo è quello di giungere, a breve, ad applicazioni di prova in cantieri controllati, attuando le necessarie procedure per il rilevamento di dati.

Nota 4.8-8 - BERTAMINI T., MOSELLO R., *Il clima*, in: A.A.VV, Terra d'Ossola, Ed. Grossi, Domodossola, 2005, p. 109-118.

$z_2 = 816$ m slmm (Santa Maria Maggiore, Val Vigezzo)

$z_r = 272$ m slmm (Domodossola)

Tenendo conto che le valli ossolane sono interessate quotidianamente da correnti d'aria⁹, le umidità relative dell'aria per le località di Veglio e di Santa Maria Maggiore, in mancanza di dati rilevati *in loco*, sono state prese uguali a quelle rilevate a Domodossola e sono poi state determinate le pressioni parziali di vapore per le temperature del luogo interessato.

Nota 4.8-9 - BERTAMINI T, MOSELLO R, cit.

Nota 4.8-10 - Per i periodi nei quali il riscaldamento non è in funzione e

$\theta_e < 18^\circ \text{C}$ allora $\theta_i = 18^\circ \text{C}$.

Quando

$\theta_e > 18^\circ \text{C}$ allora $\theta_i = \theta_e$

(ad esempio corrispondente ai mesi di luglio e agosto per Santa Maria Maggiore).

Per quanto attiene alle condizioni ambientali interne degli edifici, la temperatura assunta è $\theta_i = 20^\circ \text{C}$ per il periodo in cui l'edificio è riscaldato (presumibilmente da settembre ad aprile)¹⁰ e l'umidità è stata calcolata, secondo il procedimento dell'appendice A "Classi di umidità all'interno degli ambienti" della UNI 13788. Si parte dall'umidità dell'ambiente esterno (riportata con i valori della pressione parziale del vapore in Pa) e si sommano dei valori di pressione parziale del vapore definiti in funzione del tipo di utilizzo degli ambienti ("classe di umidità interna") e quindi in relazione alla quantità di vapore prodotta, corretti in funzione delle temperature esterne (che influiscono sulla frequenza delle aperture delle finestre e, per basse temperature, fanno sì che tutta la produzione di vapore interna rimanga praticamente confinata senza defluire all'esterno).

Nei casi esaminati è stato considerato l'estremo massimo dei valori della classe di umidità 3 "Alloggi con basso indice di affollamento" corrispondente anche al valore limite inferiore della classe 4 "Alloggi con alto indice di affollamento" (prospetto A1 e figura A1 della norma). Il valore di pressione parziale di vapore indicante la quantità di vapore prodotto all'interno, che si somma alla pressione esterna, varia (secondo il diagramma a linea spezzata) tra 810 Pa per temperature inferiori o uguali a 0°C e 0 Pa per temperature esterne uguali (o superiori) a quelle interne pari a 20°C ¹¹, con la legge:

$$\Delta p = (810/20) (20 - \theta_e) \text{ valida per } \theta_e \geq 0$$

Nota 4.8-11 - Caso di medesima pressione parziale di vapore all'interno e all'esterno.

4.8.3.2 - Valutazione del fattore di resistenza alla diffusione al vapore μ

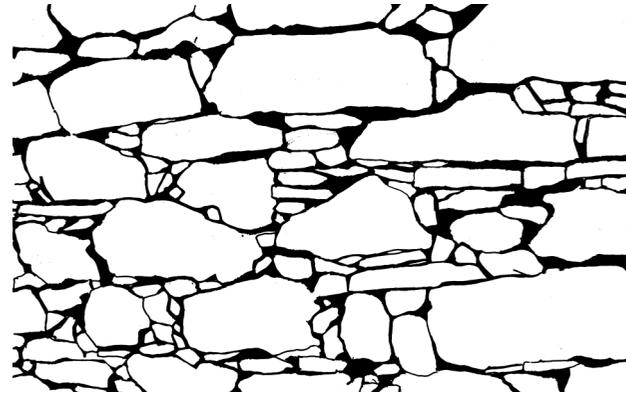
Per valutare la diffusione del vapore d'acqua negli strati occorre conoscere il fattore di resistenza alla diffusione al vapore μ dei diversi materiali costituenti la parete. Per il muro in blocchi di pietra di gneiss e giunti di malta si è ipotizzato un percorso del vapore d'acqua che si sviluppa in parallelo, dall'interno all'esterno, in clima invernale:

- attraverso i giunti localizzati tra i blocchi di pietra, con una determinata percentuale di superficie di malta esposta (con μ intonaco = $9 \div 10$) riferita alla superficie del muro (percentuale che dipende dal tipo di apparecchio delle pietre, dalla regolarità dei giunti, ecc. e che in genere è dell'ordine del 10% – 20%);

- attraverso i blocchi lapidei di gneiss o di altri litotipi locali (con un μ praticamente infinito; si tratta della restante percentuale di superfi-



4.8-6



4.8-7

cie del muro).

La valutazione delle percentuali di superficie dei giunti rispetto alla superficie totale di muro è stata effettuata su un campione di muro di pietra a spacco di un edificio di Veglio (Montecrestese) del 1875, tipico esempio di edificio che può essere oggetto di recupero.

Dall'esame del tessuto murario (Fig. 4.8-6) è stato ricavato lo schema delle superfici dei giunti di malta (Fig. 4.8-7) e successivamente mediante programma informatico [P. Piumatti] è stata ottenuta la percentuale dei giunti che è risultata del 17,6% del totale, quindi il restante 82,4% è costituito dai blocchi lapidei. Ne risulta un valore medio $\mu_{\text{medio}} = 9/0,176 = 51$.

Tale valore potrebbe essere in realtà anche maggiore poichè i percorsi del vapore attraverso il muro potrebbero essere più lunghi dello spessore del muro stesso per la presenza dei blocchi sfalsati.

D'altro canto in bibliografia risulta:

- Gandhi¹² propone per "stone walls" il fattore $\mu = 54$.
- Seiffert¹³ mette in evidenza che quando vi è un varco in una parete il passaggio del vapore non è proporzionale alla percentuale del varco stesso ma, per piccoli varchi, si hanno in proporzione passaggi di vapore più elevati. Per rivestimenti in pietra di piccolo spessore, con giunti di malta riporta $\mu = 20$ [p. 75, n. 13]. Viene assunto il valore di $\mu = 54$.

4.8.3.3 - Calcolo delle temperature, pressioni parziali del vapore e pressioni di saturazione negli strati, valutazioni del vapore condensato e rievaporato

Tenendo conto delle diverse variabili conosciute solo a grandi linee, è stato effettuato il calcolo delle temperature e delle pressioni del vapore negli strati nell'ipotesi di regime stazionario. Sono state utilizzate le seguenti note formule:

Fig. 4.8-6 - Campione di tessuto murario di un tipico edificio di Veglio (Montecrestese) del 1875.

Fig. 4.8-7 - Schema delle superfici dei giunti di malta del campione di muro di Fig. 4.8-6.

Nota 4.8-12 - GANDHI K., *Investigation of the hygrothermal performance of stone walls in the North Wales climate by modelling and physical monitoring*, WS Cardiff University, disponibile online all'indirizzo web <http://www.historic-scotland.gov.uk/hygrothermal-seminar-kruti-gandhi.pdf>.

Nota 4.8-13 - SEIFFERT K., *Damp diffusion and buildings*, Elsevier Publishing Company limited, 1970.

1) FORMULE PER LA DETERMINAZIONE DELLE TEMPERATURE NEGLI STRATI

Densità di flusso termico [W/m ²]	$\frac{Q}{A} = k \cdot (t_i - t_e) = \frac{(t_i - t_e)}{R} = \frac{(t_i - t_e)}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{S_j}{\lambda_j}}$
Temperatura nello strato [°C]	$t_r = t_i - k \cdot (t_i - t_e) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^{j=r} \frac{S_j}{\lambda_j} \right)$
Temperatura superficiale interna [°C]	$t_{si} = t_i - k \cdot (t_i - t_e) \cdot \frac{1}{\alpha_i}$
Temperatura interna ed esterna [°C]	$t_i \quad t_e$
Conducibilità del materiale [W/mK]	λ_j
Trasmittanza termica parete [W/m ² K]	k
Resistenza termica parete [m ² K/W]	$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{S_j}{\lambda_j}$
Spessore strato [m]	s_j
Coefficiente di scambio liminare termico [W/m ² K]	$\alpha_i \quad \alpha_e$

2) FORMULE PER LA VALUTAZIONE DELLA PRESSIONE PARZIALE DEL VAPORE NEGLI STRATI

Densità di flusso del vapore [kg/m ² h]	$\left(\frac{G}{A} \right) = \frac{p_i - p_e}{Z} = \frac{p_i - p_e}{\sum_{j=1}^{j=n} \frac{S_j}{\mu_j} \cdot N}$
Pressione del vapore nello strato [Pa]	$p_r = p_i - \frac{(p_i - p_e)}{Z} = \sum_{j=1}^{j=r} \frac{S_j}{\mu_j} \cdot N$ dove $N = R_D T / D$ [h mPa / kg] = 1,5 · 10 ⁶ [mhPa/kg] $D = 0,083 (T/273)^{1,81}$ $R_D =$ Costante vapor d'acqua
Pressione parziale del vapore interna ed esterna [Pa]	$p_i \quad p_e$
Fattore di resistenza alla diffusione' del materiale [-]	$\mu_j \quad \mu_{aria} = 1$
Resistenza alla diffusione parete [hm ² Pa/kg]	$Z = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{S_j}{\mu_j} \cdot N$
Spessore strato [m]	s_j

3) FORMULE PER VALUTARE LA QUANTITA' DI VAPORE CONDENSATO NEL PERIODO DI ACCUMULO

Densità media di flusso di vapore entrante dal lato caldo [kg/m ² h]	$\left(\frac{G}{A}\right)_e = \frac{p_i - p_x}{\sum_{i=1}^{j=x} s_i \cdot \mu_j \cdot N}$
Densità media di flusso di vapore uscente dal lato freddo [kg/m ² h]	$\left(\frac{G}{A}\right)_u = \frac{p_x - p_e}{\sum_{j=x}^{j=n} s_j \cdot \mu_j \cdot N}$
Densità media di vapore residuo [kg/m ² h]	$\left(\frac{G}{A}\right)_r = \left(\frac{G}{A}\right)_e - \left(\frac{G}{A}\right)_u$
Vapore condensato di accumulo nel mese m [kg/m ²]	$C_{a,m} = 24h \cdot n_{\text{giorni}} \cdot \left(\frac{G}{A}\right)_r$
Vapore condensato nel periodo di accumulo (nel caso specifico, novembre-marzo) [kg/m ²]	$C_a = \sum C_{a,m}$

4) FORMULE PER VALUTARE LA POSSIBILITA' DI RIEVAPORAZIONE DEL VAPORE ACCUMULATO NEL PERIODO ESTIVO

Densità media di flusso di vapore uscente da ambo i lati [kg/m ² h]	$\left(\frac{G}{A}\right)_u = \frac{p_s - p_i}{\sum_{j=1}^{j=x} s_j \cdot \mu_j \cdot N} + \frac{p_s - p_e}{\sum_{j=x}^{j=n} s_j \cdot \mu_j \cdot N}$
Condensa evaporata in un mese [kg/m ²]	$C_{e,m} = 24h \cdot n_{\text{giorni}} \cdot \left(\frac{G}{A}\right)_u$
Condensa evaporata nel periodo estivo [kg/m ²]	$C_e = \sum C_{e,m}$

Sulla base delle tabelle e dei relativi diagrammi dell'andamento delle temperature, delle pressioni parziali effettive e di saturazione negli strati dell'involucro sviluppati mese per mese, è possibile verificare la formazione di condensa laddove le pressioni effettive supererebbero (nel calcolo, ma non fisicamente nella realtà) le pressioni di saturazione.

Le pressioni di saturazione si possono ricavare dai diagrammi dell'aria umida o dalle relative tabelle oppure con la formula approssimata che dà la pressione di saturazione del vapore in funzione della temperatura, utile quando si usa un foglio di calcolo elettronico:

$$p_s = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}}$$

Il calcolo di verifica della rievaporazione, per tener conto della variabilità annuale delle temperature nel periodo primaverile, è stato im-

Nota 4.8 - 14 - La norma UNI 13788 indica che la temperatura interna sia assunta pari a 18° C quando nella stagione intermedia, con impianto di riscaldamento in funzione, la temperatura esterna $t_e < 18^\circ \text{C}$. Per temperature esterne superiori si pone $\theta_i = \theta_e$.

postato e verificato per i due mesi di maggio e giugno per Veglio e di giugno e luglio per Santa Maria Maggiore, quando le temperature interne ed esterne possono considerarsi simili. In realtà la rievaporazione inizia già quando non si formano più condensazioni, cioè in media a partire da aprile in poi¹⁴.

Le pressioni parziali del vapore da utilizzare nella formula di rievaporazione sono quelle corrispondenti una alla temperatura interna, l'altra a quella esterna e la pressione di saturazione P_s è corrispondente alla temperatura sul piano di condensazione nel muro (interfaccia isolante-muro).

Nel caso di Veglio di Montecrestese si formano condensazioni sul piano interfaccia tra strato isolante e muro di pietra nei mesi da dicembre a febbraio con un totale accumulato di novembre, dicembre, gennaio, febbraio, marzo di 0,350 kg/m².

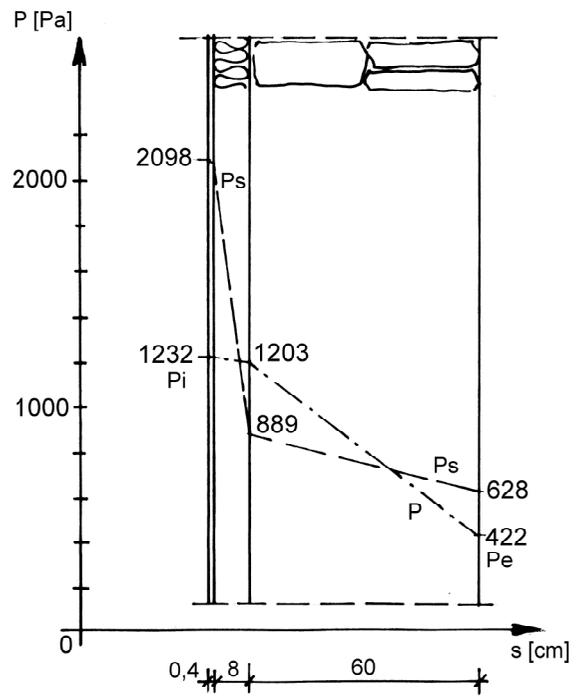
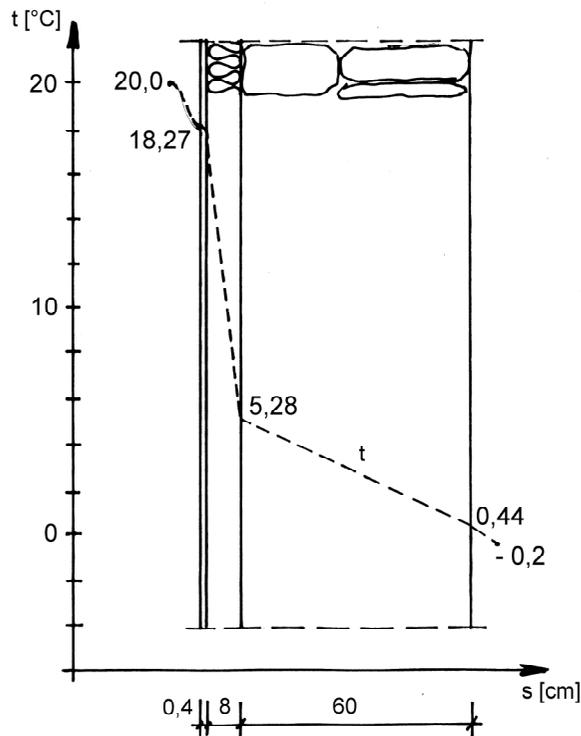
Nel caso di Santa Maria Maggiore si formano condensazioni negli stessi mesi con un totale accumulato di 0,452 kg/m².

In entrambi i casi il vapore condensato accumulato può rievaporare nel periodo primaverile/estivo come illustrato successivamente.

E' in seguito riportato il foglio di calcolo elettronico impostato per determinare le condizioni ambientali per Veglio: temperature interne ed esterne, pressioni di vapore effettive e di saturazione. E' successivamente inserito il foglio di calcolo relativo a temperature e pressioni del vapore negli strati che compongono la parete per il mese di gennaio.

	MESI	OTT	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG
Domodossola	Temp esterna [°C]	11,3	5,7	2,3	1,4	3,3	6,9	11,3	15,0	19,2	21,7
	p_s [Pa]	1338,40	915,39	720,57	675,57	773,66	994,48	1338,40	1704,41	2223,70	2594,48
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	p esterna effettiva [Pa]	1017,19	659,08	511,61	472,90	487,41	576,80	776,27	1039,69	1378,70	1556,69
	Altitudine [m]	272									
Veglio	Temp esterna [°C]	9,7	4,1	0,7	-0,2	1,7	5,3	9,7	13,4	17,6	20,1
	p_s [Pa]	1205,95	820,79	644,09	603,35	692,18	892,66	1205,95	1540,41	2016,37	2357,02
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	P esterna effettiva [Pa]	916,52	590,97	457,30	422,34	436,08	517,74	699,45	939,65	1250,15	1414,21
	Temp interna [°C]	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0	20,1
	p_s interna [Pa]	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2062,83	2062,83	2351,46
	Δp_a (curva 4)	415,60	642,40	780,10	810,00	739,60	593,80	415,60	265,75	95,65	0,00
	p interna (curva 4) [Pa]	1332,12	1233,37	1237,40	1232,34	1175,68	1111,55	1115,05	1205,40	1345,80	1414,21
	UR interna (curva 4) [%]	57,00	52,78	52,95	52,73	50,31	47,56	47,71	58,43	65,24	60,14
Altitudine [m]	550										

STRATO		Liminare interno	Rasatura resinoplastica	Intonaco isolante	Muro di pietra	Liminare esterno	RESISTENZA TERMICA
s [m]			0,004	0,080	0,600		
λ [W/m K]			0,500	0,075	1,500		
μ [-]			20	15	54		
$s/\lambda, 1/\alpha$ [m ² /K W]		0,143	0,008	1,067	0,400	0,050	1,668
Δt [°C]		1,73	1,83	14,72	19,56	20,16	
t [°C]	20,00		18,27	18,17	5,28	0,44	-0,16
p_s [Pa]	2337,0		2098,3	2085,6	889,0	628,3	603,3
$N=R \cdot T/D$ [h m Pa/kg]	1435000		1445000	1445000	1510000	1528500	1530000
$Z=s \cdot \mu \cdot N$ [hm ² Pa/kg]			115600	1734000	48924000		
ΣZ [hm ² Pa/kg]				115600	1849600	50773600	
p [Pa]			1232,3	1230,5	1202,8	422,3	



La quantità di vapore che può condensare nel periodo di accumulo del mese di gennaio è calcolata effettuando la differenza tra flusso di vapore entrante dal lato caldo e il flusso di vapore uscente dal lato freddo e viene moltiplicata per il numero di ore complessivo di gennaio (24 h x 31 giorni):

$$\left(\frac{G}{A}\right)_e = \frac{p_i - p_x}{\sum_{j=1}^{j=x} s_j \cdot \mu_j \cdot N} = \frac{1232,3 - 889,0}{1849600} = 1,86 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}}$$

$$\left(\frac{G}{A}\right)_u = \frac{p_x - p_e}{\sum_{j=x}^{j=n} s_j \cdot \mu_j \cdot N} = \frac{889,0 - 422,3}{48924000} = 9,54 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}}$$

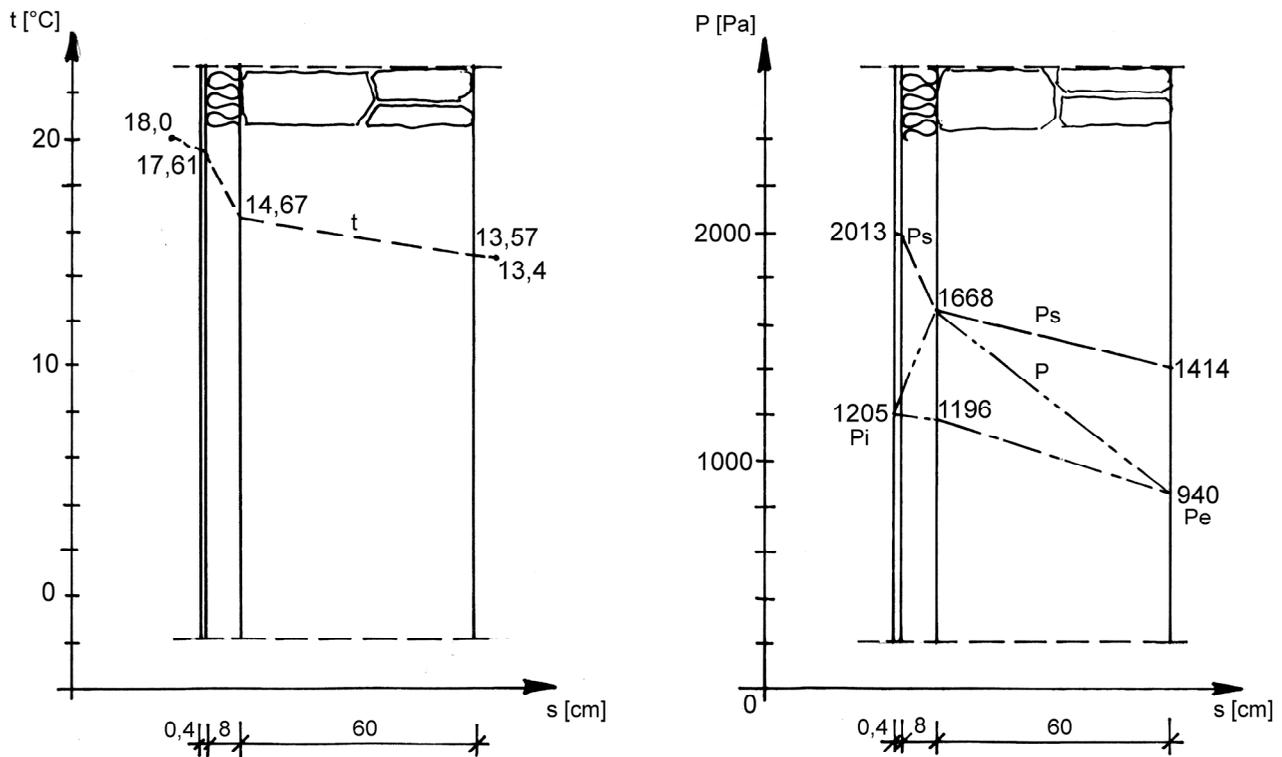
$$C_{a,gen} = h_{gen} \cdot \left[\left(\frac{G}{A}\right)_e - \left(\frac{G}{A}\right)_u \right] = 24 \cdot 31 \cdot (1,86 \cdot 10^{-4} - 9,54 \cdot 10^{-6}) = 0,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Fig. 4.8-8 - Diagramma delle temperature negli strati e diagramma delle pressioni effettive (P) di saturazione (Ps) per il caso di parete a Veglio (Montecrestese) nel mese di gennaio.

Fig. 4.8-9 - Diagramma delle temperature negli strati e diagramma delle pressioni effettive (P) di saturazione (Ps) per il caso di parete a Veglio (Montecrestese) nel mese di maggio.

Analogamente, sono impostati i fogli di calcolo di novembre, dicembre, febbraio e marzo (corrispondenti al periodo di accumulo).

Occorre successivamente valutare la quantità di vapore condensato che rievapora durante il periodo estivo. E' in seguito riportato il foglio di calcolo relativo a Veglio per il mese di maggio.



	MESI	OTT	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG
Domodossola	Temp esterna [°C]	11,3	5,7	2,3	1,4	3,3	6,9	11,3	15,0	19,2	21,7
	p _s [Pa]	1338,40	915,39	720,57	675,57	773,66	994,48	1338,40	1704,41	2223,70	2594,48
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	p esterna effettiva [Pa]	1017,19	659,08	511,61	472,90	487,41	576,80	776,27	1039,69	1378,70	1556,69
	Altitudine [m]	272									
Veglio	Temp esterna [°C]	9,7	4,1	0,7	-0,2	1,7	5,3	9,7	13,4	17,6	20,1
	p _s [Pa]	1205,95	820,79	644,09	603,35	692,18	892,66	1205,95	1540,41	2016,37	2357,02
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	P esterna effettiva [Pa]	916,52	590,97	457,30	422,34	436,08	517,74	699,45	939,65	1250,15	1414,21
	Temp interna [°C]	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,0	20,1
	p _s interna [Pa]	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2062,83	2062,83	2351,46
	Δp _a (curva 4)	415,60	642,40	780,10	810,00	739,60	593,80	415,60	265,75	95,65	0,00
	p interna (curva 4) [Pa]	1332,12	1233,37	1237,40	1232,34	1175,68	1111,55	1115,05	1205,40	1345,80	1414,21
	UR interna (curva 4) [%]	57,00	52,78	52,95	52,73	50,31	47,56	47,71	58,43	65,24	60,14
	Altitudine [m]	550									

STRATO	Liminare interno	Rasatura resinoplastica	Intonaco isolante	Muro di pietra	Liminare esterno	RESISTENZA TERMICA
s [m]		0,004	0,080	0,600		
λ [W/m K]		0,500	0,075	1,500		
μ [-]		20	15	54		
s/λ, 1/α [m ² /K W]	0,143	0,008	1,067	0,400	0,050	1,668
Δt [°C]	0,39	0,41	3,33	4,43	4,56	
t [°C]	18,00	17,61	17,59	14,67	13,57	13,44
p _s [Pa]	2062,8	2012,6	2009,9	1668,4	1414,2	1540,4
N=R T/D [h m Pa/kg]	1435000	1445000	1445000	1510000	1528500	1530000
Z=s μ N [hm ² Pa/kg]		115600	1734000	48924000		
Σ Z [hm ² Pa/kg]			115600	1849600	50773600	
p [Pa]		1205,4	1204,8	1195,7	939,6	

Ne deriva che la quantità di condensa che evapora da ambo i lati della parete nel mese di maggio è:

$$\left(\frac{G}{A}\right)_u = \frac{p_s - p_i}{\sum_{j=1}^{j=x} s_j \cdot \mu_j \cdot N} + \frac{p_s - p_e}{\sum_{j=x}^{j=n} s_j \cdot \mu_j \cdot N} = 2,50 \cdot 10^{-4} + 0,15 \cdot 10^{-4}$$

$$= 3,40 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}}$$

$$C_{e,\text{mag}} = h_{\text{mag}} \cdot \left(\frac{G}{A}\right)_u = 24 \cdot 31 \cdot (3,40) \cdot 10^{-4} = 0,197 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Analogamente è possibile valutare la quantità di condensa che rievapora da ambo i lati della parete nel mese di giugno pari a 0,277 kg/m².

Nel caso di Veglio è stato possibile limitarsi ai mesi di maggio e giugno, in quanto i calcoli dimostrano che è sufficiente questo arco di tempo per far evaporare tutto il vapore condensato nel periodo di accumulo (0,197 + 0,277 > 0,350 kg/m²).

Nel caso di Santa Maria Maggiore si formano condensazioni nei 5 mesi tra novembre e marzo. Viene valutata la quantità di condensazione media mensile partendo dai valori medi orari moltiplicati per 24 ore e il numero dei giorni al mese. Sommando la quantità di condensa accumulata rispettivamente nei 5 mesi consecutivi citati si è ottenuto, per Santa Maria Maggiore, un valore di vapore condensato di 0,452 Kg/m².

Sono in seguito riportati i fogli di calcolo elettronico relativi a Santa Maria Maggiore per i mesi di gennaio e giugno.

MESI		OTT	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG
Domodossola	Temp esterna [°C]	11,3	5,7	2,3	1,4	3,3	6,9	11,3	15,0	19,2	21,7
	p _s [Pa]	1338,40	915,39	720,57	675,57	773,66	994,48	1338,40	1704,41	2223,70	2594,48
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	p esterna effettiva [Pa]	1017,19	659,08	511,61	472,90	487,41	576,80	776,27	1039,69	1378,70	1556,69
	Altitudine [m]	272									
Santa Maria Maggiore	Temp esterna [°C]	8,2	2,6	-0,8	-1,7	0,2	3,8	8,2	11,9	16,1	18,6
	p _s [Pa]	1090,14	738,45	577,71	540,72	621,42	803,96	1090,14	1396,62	1834,04	2147,83
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	P esterna effettiva [Pa]	828,51	531,69	410,17	378,51	391,49	466,29	632,28	851,94	1137,10	1288,70
	Temp interna [°C]	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,6
	p _s interna [Pa]	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2062,83	2141,94
	Δp _a (curva 4)	476,13	702,93	810,00	810,00	800,13	654,33	476,13	326,28	156,18	54,93
	p interna (curva 4) [Pa]	1304,63	1234,61	1220,17	1188,51	1191,62	1120,62	1108,41	1178,22	1293,28	1343,62
	UR interna (curva 4) [%]	55,83	52,83	52,21	50,86	50,99	47,95	47,43	50,42	62,69	62,73
	Altitudine [m]	816									

STRATO		Liminare interno		Rasatura resinoplastica		Intonaco isolante		Muro di pietra		Liminare esterno		RESISTENZA TERMICA
s [m]				0,004		0,080		0,600				
λ [W/m K]				0,500		0,075		1,500				
μ [-]				20		15		54				
$s/\lambda, 1/\alpha$ [m ² /K W]		0,143		0,008		1,067		0,400		0,050		1,668
Δt [°C]		1,86		1,96		15,81		21,01		21,66		
t [°C]	20,00		18,14		18,04		4,19		-1,01		-1,66	
p_s [Pa]	2337,0		2081,5		2067,9		823,6		571,7		540,7	
$N=R \cdot T/D$ [h m Pa/kg]	1435000		1445000		1445000		1510000		1528500		1530000	
$Z=s \cdot \mu \cdot N$ [hm ² Pa/kg]				115600		1734000		48924000				
ΣZ [hm ² Pa/kg]					115600		1849600		50773600			
p [Pa]			1188,5		1186,7		1159,0		378,5			

La quantità di vapore che può condensare nel periodo di accumulo nel mese di gennaio risulta:

$$\left(\frac{G}{A}\right)_e = \frac{p_i - p_x}{\sum_{j=1}^{j=x} s_j \cdot \mu_j \cdot N} = \frac{1188,5 - 823,6}{1849600} = 1,97 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}}$$

$$\left(\frac{G}{A}\right)_u = \frac{p_x - p_e}{\sum_{j=x}^{j=n} s_j \cdot \mu_j \cdot N} = \frac{823,6 - 378,5}{48924000} = 9,10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}}$$

$$C_{a,gen} = h_{gen} \cdot \left[\left(\frac{G}{A}\right)_e - \left(\frac{G}{A}\right)_u \right] = 24 \cdot 31 \cdot (1,97 \cdot 10^{-4} - 9,10 \cdot 10^{-6}) = 0,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

In seguito ai calcoli riportati nelle seguenti tabelle, risulta che, per il mese di giugno, la quantità di vapore rievaporato è:

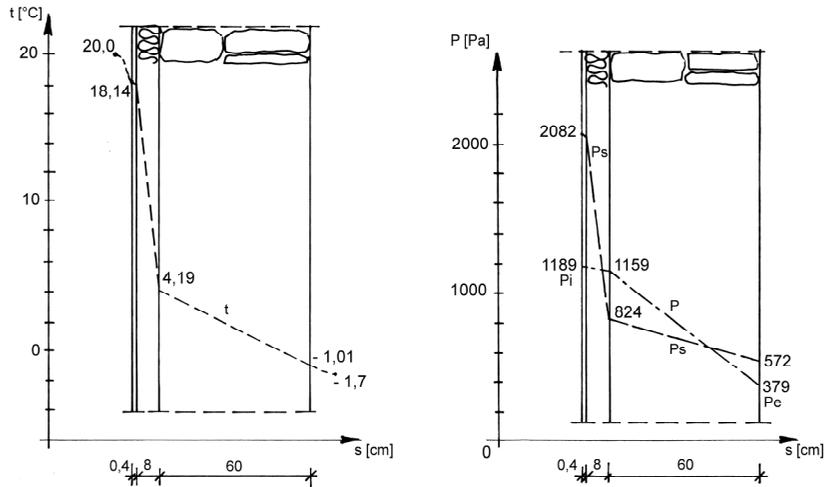
$$\left(\frac{G}{A}\right)_u = \frac{p_s - p_i}{\sum_{j=1}^{j=x} s_j \cdot \mu_j \cdot N} + \frac{p_s - p_e}{\sum_{j=x}^{j=n} s_j \cdot \mu_j \cdot N} = 3,24 \cdot 10^{-4} + 0,15 \cdot 10^{-4} = 3,40 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}}$$

$$C_{e,giu} = h_{giu} \cdot \left(\frac{G}{A}\right)_u = 24 \cdot 30 \cdot (3,40) \cdot 10^{-4} = 0,244 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

	MESI	OTT	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG
Domodossola	Temp esterna [°C]	11,3	5,7	2,3	1,4	3,3	6,9	11,3	15,0	19,2	21,7
	p _s [Pa]	1338,40	915,39	720,57	675,57	773,66	994,48	1338,40	1704,41	2223,70	2594,48
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	p esterna effettiva [Pa]	1017,19	659,08	511,61	472,90	487,41	576,80	776,27	1039,69	1378,70	1556,69
	Altitudine [m]	272									
Santa Maria Maggiore	Temp esterna [°C]	8,2	2,6	-0,8	-1,7	0,2	3,8	8,2	11,9	16,1	18,6
	p _s [Pa]	1090,14	738,45	577,71	540,72	621,42	803,96	1090,14	1396,62	1834,04	2147,83
	UR [%]	76	72	71	70	63	58	58	61	62	60
	P esterna effettiva [Pa]	828,51	531,69	410,17	378,51	391,49	466,29	632,28	851,94	1137,10	1288,70
	Temp interna [°C]	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,6
	p _s interna [Pa]	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2336,95	2062,83	2141,94
	Δp _a (curva 4)	476,13	702,93	810,00	810,00	800,13	654,33	476,13	326,28	156,18	54,93
	p interna (curva 4) [Pa]	1304,63	1234,61	1220,17	1188,51	1191,62	1120,62	1108,41	1178,22	1293,28	1343,62
	UR interna (curva 4) [%]	55,83	52,83	52,21	50,86	50,99	47,95	47,43	50,42	62,69	62,73
	Altitudine [m]	816									

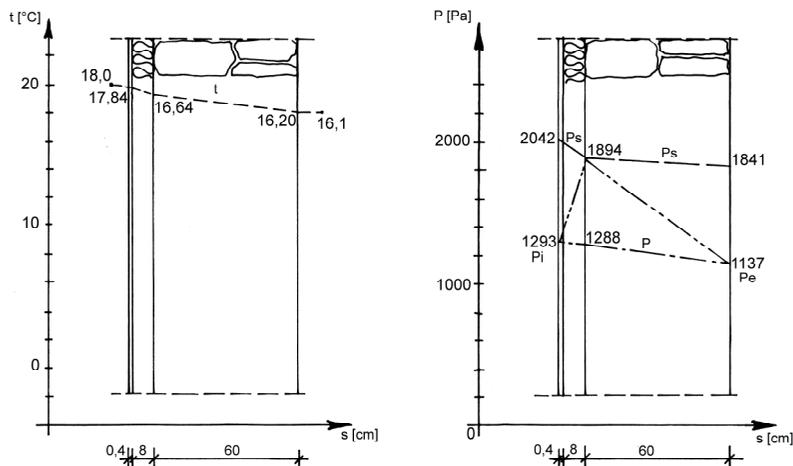
STRATO		Liminare interno	Rasatura resinoplastica	Intonaco isolante	Muro di pietra	Liminare esterno	RESISTENZA TERMICA
s [m]			0,004	0,080	0,600		
λ [W/m K]			0,500	0,075	1,500		
μ [-]			20	15	54		
s/λ, 1/a [m ² /K W]		0,143	0,008	1,067	0,400	0,050	1,668
Δt [°C]		0,16	0,17	1,36	1,80	1,86	
t [°C]	18,00		17,84	17,83	16,64	16,20	16,14
p _s [Pa]	2062,8		2042,3	2041,1	1893,5	1840,6	1834,0
N=R T/D [h m Pa/kg]	1435000		1445000	1445000	1510000	1528500	1530000
Z=s μ N [hm ² Pa/kg]			115600	1734000	48924000		
Σ Z [hm ² Pa/kg]				115600	1849600	50773600	
p [Pa]			1293,3	1292,9	1287,6	1137,1	

Nel successivo mese di luglio i calcoli portano ad una quantità di condensa rievaporata di 0,336 kg/m² che dimostrano che tutto il vapore condensato nei 5 mesi invernali (0,452 kg/m²) ha la possibilità di rievaporare in giugno e luglio (0,244 + 0,336 = 0,580 kg/m²).



4.8-10

Fig. 4.8-10 - Diagramma delle temperature negli strati e diagramma delle pressioni effettive (P) di saturazione (P_s) per il caso di parete a Santa Maria Maggiore (Montecrestese) nel mese di gennaio.



4.8-11

Fig. 4.8-11 - Diagramma delle temperature negli strati e diagramma delle pressioni effettive (P) di saturazione (P_s) per il caso di parete a Santa Maria Maggiore (Montecrestese) nel mese di maggio.

BIBLIOGRAFIA Cap. 4.8

BERTAMINI T, MOSELLO R, *Il clima in A.A.VV.*, Terra d'Ossola, Ed. Grossi, Domodossola, 2005, p. 109-118.

GANDHI K., *Investigation of the hygrothermal performance of stone walls in the North Wales climate by modelling and physical monitoring*, WS Cardiff University, disponibile online all'indirizzo web <http://www.historic-scotland.gov.uk/hy>

SEIFFERT K., *Damp diffusion and buildings*, Elsevier Publishing Company limited, 1970.

Norma UNI EN ISO 13788:2013 Appendice Nazionale NA. 1.5

4.9 - LE SUPERFICI ESTERNE: MALTE, INTONACI *A VISTA*, SUPERFICI TINTEGGIATE, DECORAZIONI PITTORICHE O A *GRAFFITO*

Nota 4.9-1 - La bibliografia di riferimento è riportata a fondo capitolo. Dai testi citati sono estratti i principali contenuti di ordine pratico sui materiali e sulle soluzioni tecniche.

MARCO ZERBINATTI

4.9.1 - Introduzione

Fig. 4.9-1 - Dintorni di Domodossola. Edificio residenziale di gusto ottocentesco con intonaco esterno tinteggiato con colore azzurro. Il dilavamento differenziale delle superfici tinteggiate *in velatura*, restituisce un'immagine di "invecchiamento nobile" dell'edificio.

Fig. 4.9-2 - Maggianico. Edificio intonacato e tinteggiato nei pressi della piazza principale.



4.9-1



4.9-2

Il problema della conservazione e della manutenzione delle superfici di finitura è stato ampiamente approfondito in studi specifici, ed è stato preso in esame e dibattuto in convegni di alto profilo ad esso dedicati¹. Come per gli altri aspetti trattati, anche i contenuti tecnici relativi alle finiture esterne del patrimonio edilizio diffuso meritano la dovuta attenzione poiché sono determinanti per il conseguimento di risultati di qualità adeguata negli interventi di conservazione, di manutenzione e di recupero in un quadro di progettazione complessiva.

Per questa ragione, in coerenza con le finalità del manuale, nel capitolo sono compresi:

- letture di situazioni critiche dirette a focalizzare i diversi ordini di problemi riguardanti le finiture,
- indicazioni sulle possibili cause ricorrenti di degrado e sui conseguenti fenomeni più diffusamente riscontrati,
- indicazioni sugli inconvenienti più diffusi in conseguenza dell'uso di materiali inadatti o inappropriati,
- indicazioni di ordine pratico su cosa è possibile oggi fare in relazione con i materiali disponibili.

Prima di passare a una breve descrizione di fenomeni patologici ricorrenti, di caratteristiche e di contenuti tecnici inerenti criteri di miscelazione di intonaci compatibili con gli edifici rustici, conviene riprendere alcuni aspetti di ordine critico attinenti le scelte generali da adottare.

Com'è noto, gli edifici storici di pietra presentano soluzioni di apparecchiatura muraria variabili da luogo a luogo, in ragione della disponibilità di litotipi locali, di consuetudini edificatorie, della funzione dell'edificio costruito e così via. Volendo proporre un esempio "limite", nei contesti esaminati si può passare da edifici interamente intonacati e decorati a edifici interamente costruiti a secco, quindi senza alcun impiego di malta. Per esempio, gli edifici religiosi, le cappelle, i piloni votivi, gli edifici pubblici, più comunemente sono intonacati e in molti casi anche decorati all'esterno; meno frequente, invece, è la presenza di finiture con intonaco sui rustici, dove è ampia la variabilità delle soluzioni costruttive adottate per le murature. Per esempio, vi sono:

- murature con giunti di malta lasciati in profondità, non rabboccati

superficialmente,

- murature con giunti portati sino alla superficie e lavorati, con varie modalità di effetto per lasciare trasparire parte della tessitura muraria (lavorati “a raso pietra”),

- muri semplicemente intonacati in modo rustico, con l’intonaco grossolanamente applicato a cazzuola e non stagiato (anche contenente argilla o terra),

- muri con l’intonaco frattazzato o rasato con lo strato di finitura avente granulometria degli aggregati più fini.

L’elenco potrebbe continuare. Ciò che pare utile sottolineare è, invece, che nelle diverse valli o fondovalle considerati, ognuno di questi ambiti si caratterizza per la presenza di talune soluzioni e per l’assenza di altre, con variabilità locali anche notevoli. Quindi, anche all’interno di questo microcosmo, non è possibile ipotizzare di avere soluzioni unificanti perché - generalizzando con alcuni esempi - gli edifici rustici della Val Bavona non hanno le finiture superficiali delle case di Santa Maria Maggiore, come pure gli edifici del tessuto storico di Domodossola hanno più differenze che similitudini con le rare finiture esterne viste a Corippo. La considerazione può apparire ovvia ma, osservando quanto accade nella pratica quotidiana e negli interventi in cantiere, si ha la netta sensazione che tale concetto non sia stato tenuto presente, o rimarcato con la dovuta forza. Ne consegue spesso un utilizzo inappropriato di materiali inadatti per tali edifici, in contrasto con i più elementari principi di compatibilità e di conservazione.

Per questo è auspicabile avere criteri condivisi di approccio alle problematiche, in modo da agire con strumenti comuni capaci di agire sulla sensibilità degli operatori attraverso il dialogo fattivo e il progressivo allestimento di una già richiamata “spirale virtuosa”.

Di conseguenza, anche per quanto riguarda il tema delle finiture esterne degli edifici di pietra, vale ciò che è stato più volte ribadito all’interno del manuale: il progetto deve avere un ruolo centrale nella



4.9-3

Nota 4.9-2 - Agli aspetti richiamati negli ultimi due capoversi può fornire un supporto di grande efficacia la normativa per la regolazione e il controllo degli interventi. Questi dovrebbero essere basati non sulla *imposizione di un risultato*, piuttosto sul *controllo del processo*. Per essere più chiari, sono riportati alcuni esempi concreti ricorrenti:

1 - quando un *Piano del Colore* “impone” un tono di tinteggiatura attraverso una *paletta* di colori, o accostamenti prestabiliti secondo sequenze di prospetti delle vie “intonati” tra loro, dovrebbe innanzitutto obbligare i richiedenti a una sequenza di operazioni di indagine e di studio preliminari finalizzate a:

1.1 - stabilire la successione degli eventi costruttivi, di manutenzione, di ricoloritura, quindi le cromie di riferimento.

1.2 - individuare i sistemi di pitturazione minerali per gli interventi di tinteggiatura, sostenendo l’importanza delle applicazioni per velature *semitrasparenti* o *semicoprenti*, a seconda dei casi.

Non ha fondamento parlare in senso generico di tonalità *nei rosa, nel giallo, nel persichino, nel nocciola, nel verde e nell’azzurro*. Il colore va progettato sul caso specifico; il decoratore incaricato deve possedere la capacità di produrre tinte con colori a campione, come è sempre stato fatto nel tempo, quando non c’erano le “mazzette dei colori”. Definire i colori nominalmente è rischioso, perché definisce e categorizza in insiemi confinati gamme tonali che, per definizione, non hanno limite e distoglie dall’importanza del sistema prescelto e delle modalità di applicazione;

2 - quando i Regolamenti Edilizi impongono l’uso di “*intonaci tradizionali*” dovrebbero entrare nel merito di quanto proposto in relazione al contesto. Dato per assodato che per *tradizionali* si intende a base di calce aerea o debolmente idraulica (se ottenuta dalla cottura di calcari marnosi) e non (come comunemente gli operatori di oggi preferiscono intendere) di malta *bastarda* (cioè con calce idrata - o grassello - e cemento Portland), occorre fornire esempi concreti di posa in opera al fine di fugare possibili fraintendimenti. Materiali, criteri di miscelazione, modalità applicative sono noti, basta essere chiari nel definirli e ricondurre il loro impiego al contesto di riferimento, attraverso il progetto.

In estrema sintesi, a livello di normazione e di regolazione (cfr. Cap. 5) è preferibile redigere non dei “*Piani del Colore*” ma dei Progetti per il colore: la distinzione non è nominale, ma concettuale e procedurale. I Regolamenti Edilizi non siano solo descrittivi, ma diano esempi reali e schede tecniche fotografiche, insieme con la descrizione delle prestazioni in opera attese.

Fig. 4.9-3 - Masera. Edificio con decorazioni ottocentesche.

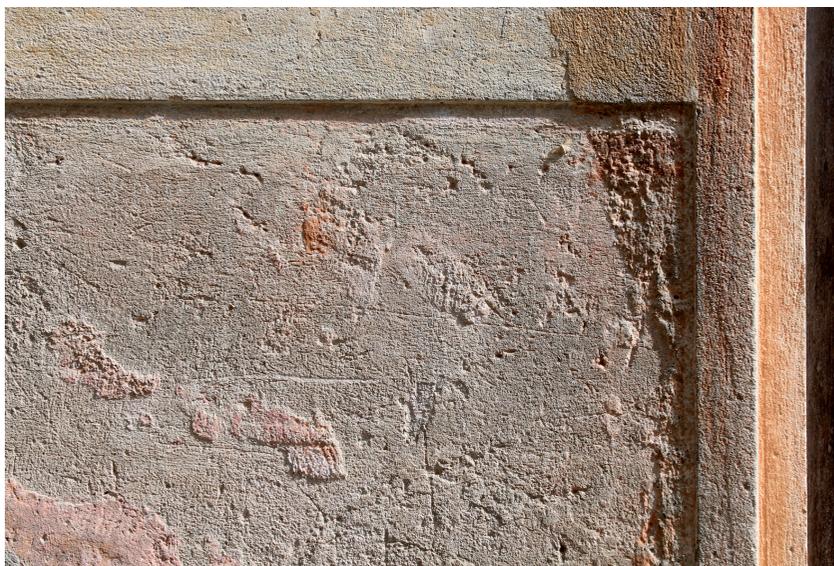


4.9-4

Fig. 4.9-4 - Cevio, Val Maggia. La parte inferiore di questo portale è soggetta ad alcune forme di degrado (cfr. Fig. 4.9.14).

Fig. 4.9-5 - Craveggia, Val Vigizzo. Degrado differenziale di una superficie esterna, riconducibile alla presenza di umidità nella parte basamentale della facciata.

Fig. 4.9-6 - Cevio. Degrado di una superficie esterna, con intonaco a vista e bugna angolare graffita, soggetta a dilavamento.



4.9-5

concezione degli interventi, altrimenti si corre il duplice rischio di vedere attuare pratiche inadatte e di perdere testimonianze significative del passato².

Come per altre pubblicazioni aventi un principale scopo pratico o didattico, le brevi rassegne di inconvenienti più diffusamente riscontrabili, di seguito illustrate, sono state suddivise in “categorie”; tali categorie sono soltanto strumentali allo scopo di fare riconoscere i fenomeni di degrado più comuni e aiutare gli operatori a interpretarne i meccanismi patogenetici. Infatti, occorre sempre tenere presente che a ogni fenomeno di degrado spesso non è associabile una sola causa scatenante, ma possono esservi delle concause che contribuiscono a determinare la patologia riscontrata. Per tale ragione la suddivisione in categorie, può apparire complessa e forzosa. Tuttavia, abituare gli operatori a focalizzare l’attenzione verso i principali meccanismi di degrado e ai fenomeni ad essi associabili riveste una sicura utilità; inoltre è determinante per impostare correttamente gli interventi di manutenzione, conservazione o recupero, oppure per avviare approfondimenti di indagine utili per formulare una corretta diagnosi pre-intervento, anche avvalendosi delle competenze complementari ritenute necessarie.

4.9.2 - Fenomeni di degrado “endemic”

Alcune patologie di degrado molto comuni sono riconducibili per esempio all’azione dilavante dell’acqua sulla superficie, alla presenza di umidità di risalita dal basso oppure a errori di miscelazione e realizzazione. Questi problemi connaturati con le opere esaminate sono illustrati con alcuni casi emblematici.

Per brevità espositiva, i noti meccanismi di degrado non sono qui riportati, ma al fondo del capitolo sono indicati i riferimenti necessari per eventuali approfondimenti.



4.9-6



4.9-7



4.9-8

4.9.2.1 - Degradato indotto da risalita capillare

Nelle murature con fondazioni direttamente inserite nel terreno, la risalita capillare è fenomeno praticamente inevitabile. La capacità dell'acqua di risalire all'interno dei materiali porosi è nota e la malta dei giunti tra gli elementi lapidei è il materiale attraverso il quale l'acqua riesce a risalire in via preferenziale³. L'evaporazione superficiale dell'acqua e la conseguente precipitazione di sali nella parte corticale delle murature verso l'esterno (o l'interno), sono in tali casi una fonte di danno per gli intonaci di rivestimento, per le malte dei giunti murari stessi e, talvolta anche per gli elementi lapidei.

4.9.2.2 - Degradato indotto da dilavamento superficiale

Questa forma di degrado è facilmente riconoscibile ed è indotta prevalentemente dalla perdurante esposizione delle superfici all'azione delle acque meteoriche. Le forme di degrado variano in relazione al materiale:

- il dilavamento di superfici tinteggiate comporta di solito una progressiva perdita di spessore del film pittorico, con una decolorazione differenziale tra zone più esposte e meno esposte all'acqua;
- sugli intonaci lasciati *a vista*, il dilavamento può produrre forme diverse di degrado, prevalentemente associabili al discioglimento del-

Fig. 4.9-7 - Colma di Cesara. Piccolo opificio con murature contro terra soggette a degrado delle malte e a colonizzazione biologica.

Fig. 4.9-8 - Andosso, Val d'Ossola. Edifici rurali con evidenti segni di degrado indotto dalla risalita capillare alla base dei muri.

Nota 4.9-3 - Anche i materiali lapidei possiedono una loro porosità caratteristica, seppure - generalmente - di molto inferiore ad altri materiali da costruzione (come, per esempio, le malte), soprattutto per quanto riguarda le pietre locali dell'area presa in esame. Valori indicativi per la porosità di tali materiali possono essere compresi tra lo 0,2 e lo 0,5 %. Per dettagli specifici: cfr. Cap. 4.1 del manuale.



4.9-9



4.9-10

Fig. 4.9-9 - Corippo, Valle Verzasca. Finestra con graffito e decorazione dipinta soggetta a degrado da dilavamento.

Figg. 4.9-10 e 4.9-11 - Esempi di dilavamento superficiale con degrado differenziale su due facciate tinteggiate, rispettivamente a Pontemaglio e Maserà.

Nota 4.9-4 - Norma UNI 11182:2006, Beni Culturali, *Materiali lapidei naturali e artificiali. Descrizione della forma di alterazione. Termini e definizioni.* La Norma sostituisce la Raccomandazione Nor.Ma.L. 1/88, aggiornandone i contenuti e lessico; è particolarmente utile quando occorre valutare le forme macroscopiche di degrado dei materiali lapidei (quindi, le forme di alterazione sostanzialmente visibili a occhio nudo). La precedente Racc. 1/88 contemplava anche la simbologia di riferimento per la rappresentazione delle forme di alterazione su elaborati grafici; attualmente, la Norma 11182 non possiede tale utile strumento di supporto. Pertanto, chi desidera effettuare l'operazione di mappatura, deve avvalersi di simboli non normati, oppure mutuare, per questo scopo, quelli già contemplati nella Raccomandazione citata.



la matrice legante e alla asportazione della parte più fine degli aggregati, con una messa in risalto degli aggregati più grandi e, successivamente, con la manifestazione di forme di alterazione come quelle indicate nel seguito a titolo di esempio.

All'azione di imbibizione delle superfici, talvolta può essere combinata anche l'azione disgregatrice di gelo e disgelo (cosa che può accadere anche per i giunti di malta o per le pietre, soprattutto in presenza di capillari molto piccoli).

Al dilavamento superficiale sono anche riconducibili alterazioni di materiali lapidei naturali e artificiali come il *pitting*, l'alveolizzazione, la presenza di fessurazioni superficiali, la presenza di lacune, la colonizzazione biologica, la presenza di macchie.

Le forme attraverso cui si manifesta il degrado superficiale sono descritte in modo adeguato da una norma UNI per i beni culturali, la Norma 11182:2006, dalla quale è possibile attingere per il lessico tecnico⁴.

4.9.2.3 - Forme di degrado riconducibili a errori di miscelazione o di applicazione

Talvolta sulle finiture esterne è possibile riscontrare forme di degrado caratterizzate da tipiche "ragnatele" di cavillatura, solitamente piuttosto estese. Tali fessurazioni (di varia ampiezza) possono inte-



4.9-12



4.9-13

ressare gli strati di intonaco a livello superficiale (per esempio, nel caso di decorazioni a graffito di limitato spessore) oppure l'intero corpo dell'intonaco; in questo secondo caso, se si tratta di superfici esposte all'acqua, questa può infiltrarsi in profondità e interessare gli strati più interni del sistema murario (oltre che, potenzialmente, continuare l'azione disagregatrice sugli intonaci). Se le cavillature sono presenti su superfici non esposte al dilavamento, la loro presenza può essere riconducibile, per esempio:

- a eccessivi dosaggi di legante nell'impasto, con conseguente accentuato ritiro in fase di indurimento e presa,
- a eccessi di acqua di miscelazione, anch'essi causa di ritiri accentuati in fase di asciugatura,
- alla presenza di terra o argilla nell'impasto, utilizzata in passato assai frequentemente insieme con la calce aerea o, persino, in sostituzione di essa e, in parte, degli aggregati fini⁵.

4.9.2.4 - Degradò indotto da colonizzazioni biologiche

Sulle finiture esterne soggette all'esposizione ad agenti meteorici e contemporaneamente orientate in modo da non essere adeguatamente soleggiate, spesso è possibile riscontrare la formazione di degrado di tipo biologico. Gli agenti patogeni possono essere individuati e classificati in modo specifico da esperti del settore (biologi o microbiologi), attraverso mirate operazioni di prelievo di campioni e analisi di laboratorio (fra gli agenti più comuni vi sono licheni, funghi, alghe di varie specie, per esempio).

Tuttavia è possibile individuare abbastanza facilmente tali fenomeni di degrado da biodeteriogeni: essi si presentano sotto forma di pellicole di colore scuro, oppure verdastro, con una diffusione anche ampia

Fig. 4.9-12 - Alpe Biscià, Craveggia. Su di un muro di un alpeggio, il rinzaffo contenente anche argilla presenta estese fessure da ritiro.

Fig. 4.9-13 - Bei, Val Bognanco. Dettaglio di intonaco rustico contenente argilla, steso a cazzuola con una certa abilità, ma ricco di fessurazioni (probabilmente da ritiro) su tutta la superficie, anche se in parte ben mimetizzate dalle asperità della superficie.

Nota 4.9-5 - L'impiego della "terra" o dell'argilla, nei luoghi di montagna con presenza di corsi d'acqua a carattere torrentizio, spesso sopperiva la carenza di aggregati fini o finissimi (circa > 0,150 mm di diametro) delle sabbie estratte da tali torrenti; in pratica, completavano parzialmente la curva di distribuzione degli aggregati riempiendo dei vuoti, riducendo il fabbisogno di calce e, al contempo, rendendo più scorrevoli gli impasti. Inoltre, le argille hanno una loro capacità legante che riescono a mantenere sino a quando non sono esposte in modo perdurante all'azione disagregatrice delle acque meteoriche. Tuttavia, a causa della loro natura mineralogica e della loro morfologia, richiedono una notevole quantità di acqua di impasto, con conseguenti problemi di ritiro e formazione di fessure. Alcuni criteri ritenuti adatti alla miscelazione con tali materiali, sono riportati nella nota 4.9-12 (par. 4.9.4.2).



4.9-14

Fig. 4.9-14 - Cevio. Dettaglio di portale architettonico soggetto a degrado; l'erosione superficiale, le lacune e la presenza di degrado biologico (assai esteso) sono associabili sia alla risalita per capillarità nei materiali, sia al dilavamento superficiale. La risalita può essere in parte riconducibile agli schizzi dell'acqua battente sulle modanature architettoniche.

Fig. 4.9-15 - In una località rivierasca cusiana, un antico intonaco a calce con bugna angolare dipinta è stato integrato (in più fasi) con intonaci cementizi, inadatti per colore, composizione e prestazioni. Ne consegue un evidente degrado di immagine.



4.9-15

sulle superfici, seppure non sempre omogenea. La profondità della colonizzazione può variare, per esempio, in funzione delle condizioni di crescita o del materiale. L'individuazione del genere di biofilm è importante quando diventa necessario agire con prodotti biocidi specifici.

4.9.3 - Fenomeni di degrado provocati da interventi errati o inadatti

Sui manufatti del patrimonio diffuso (così come sui monumenti di maggiore rilevanza) capita spesso di riscontrare inconvenienti provocati da interventi successivi all'epoca di costruzione.

Questi inconvenienti possono assumere un duplice aspetto in relazione al potenziale danno provocato:

- innanzitutto, si tratta di casi in cui l'insipienza dei progettisti e degli operatori ha prodotto effetti di degrado dell'immagine complessiva dell'edificio,
- in secondo luogo, si tratta di interventi tecnicamente sbagliati che possono provocare, nel tempo, danni alle parti circostanti dello stesso manufatto, in quanto non hanno tenuto conto del comportamento globale dell'insieme.

Gli inconvenienti presentati testimoniano come, a monte di parecchi interventi manutentivi o di recupero funzionale, non vi sia stata un'adeguata progettazione, che abbia considerato i possibili effetti secondari indotti da tali interventi. Quindi, gli esempi proposti cercano di sottolineare l'incidenza negativa di tali interventi sull'immagine stratificata degli edifici, con il fine di sensibilizzare verso l'adozione di accorgimenti tecnici atti a definire modalità operative consonanti e compatibili.



4.9-16

4.9.3.1 - Scelta di materiali inadatti e conseguenti effetti “falsificanti”

Con una certa frequenza è possibile rilevare interventi “falsificanti” di parziale o totale rifacimento delle finiture esterne; si tratta di realizzazioni che, in relazione con le diverse caratteristiche delle finiture, non tengono conto dei seguenti valori:

- dell’aspetto dei vecchi intonaci “a vista” (dovuto principalmente al colore della matrice di fondo, alla grana e alla tessitura dell’aggregato) o della natura e composizione della malta dei graffiti,
- della natura dei leganti impiegati (solitamente “neutri” rispetto al colore di fondo predetto, come il grassello di calce),
- dei caratteri di trasparenza o semitrasparenza delle pitture a base minerale.

In tessuti storici importanti accade di assistere all’impiego di pitture coprenti (figure 4.9-17 e 4.9-18) dai toni di colore saturi, ottenuti con pigmenti artificiali che nulla hanno a che fare con i toni morbidi, semitrasparenti e “vibranti” delle tinte tradizionali e con il loro invecchiamento “nobile” (figure 4.9-3, 4.9-21 e 4.9-22). L’utilizzo di sistemi di tinteggiatura coprenti polimerici (le cosiddette “idropitture” da esterno) è errato sia concettualmente, sia per il comportamento in opera di tali materiali. La figura 4.9-16 rende solo in minima parte l’effetto di distacco sotto forma di pellicola che si verifica quando il film pittorico non è più aderente al supporto e si stacca per lembi; l’immagine di degrado che ne deriva è molto forte.

Inoltre, l’insieme degli accostamenti genera un risultato quasi *calcidoscopico*, inaccettabile per gli addetti ai lavori e per i cittadini sensibili ai valori della conservazione dei caratteri connotanti gli ambienti storici. Come accennato in una precedente nota (cfr. Nota 4.9.2), gli strumenti di pianificazione e regolazione dovrebbero indirizzare e controllare il processo e il progetto, altrimenti è elevato il rischio che si

Fig. 4.9-16 (pagina precedente) - Nello stesso luogo, un intervento di totale ritinteggiatura con prodotti coprenti polimerici. Il dettaglio pone in evidenza una serie di problemi:

- l’intonaco del supporto, probabilmente è di natura cementizia, quindi poco diffusivo al vapor d’acqua; ne deriva quasi certamente un innalzamento del livello della risalita capillare,
- in presenza di umidità, la pittura polimerica (anch’essa poco diffusiva) “pellicola” e si stacca dal supporto,
- l’effetto estetico è inappropriato per un ex edificio rurale inserito in un tessuto storico, sia per il livello di saturazione dei colori, sia per il cosiddetto “effetto cartone” conferito alle superfici da questo genere di sistemi di pitturazione.



4.9-17



4.9-18



4.9-19



4.9-20

Nota 4.9-6 - Per esempio, se dobbiamo rappazzare un intonaco o rabboccare dei giunti di muratura realizzati a base di calce, sarà opportuno utilizzare malte a base di calce aventi composizione, tessitura superficiale e modulo elastico simili alle malte in opera. Viceversa, se risulta necessario restaurare un cemento decorativo, sarà opportuno studiare miscele per la reintegrazione a base di cemento con composizione e prestazioni adeguate.

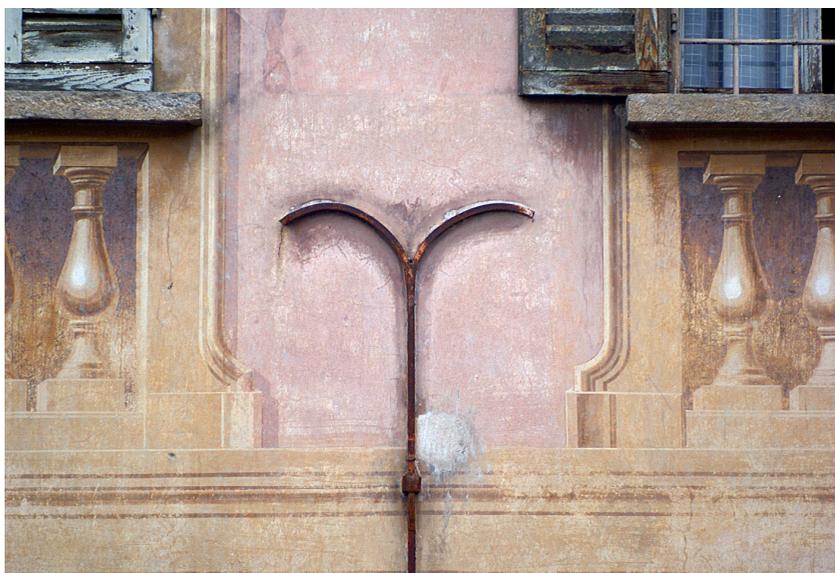
Figg. 4.9-21 e 4.9-22 - Decorazioni semitrasparenti a Masera e Ceppo Morelli. Anche in presenza di progressivo dilavamento delle superfici, con un degrado che può essere localizzato o più esteso, i sistemi minerali consentono agli edifici di mantenere un decoro di immagine complessiva.

concretizzino gli esiti negativi riportati in questo paragrafo (figg. 4.9-17 e 4.9-18).

Analogamente, per le malte e gli intonaci “a vista” l’impiego di prodotti premiscelati o predosati per gli interventi di rabboccatura e stilatura dei giunti, o per la rappazzatura di intonaci, comporta almeno due ordini di problemi: di ordine estetico e di ordine prestazionale.

Per evitare fraintendimenti, è necessario sgomberare il campo da equivoci e da preconcetti fuorvianti: i progettisti, i tecnici e gli operatori preparati sanno bene come non esistano materiali, di per sé, “buoni” o “cattivi”. Esistono solo materiali compatibili o incompatibili, adatti o inadatti, con le prestazioni adeguate o inadeguate⁶.

Le figure 4.9-19 4.9-20 riguardano un alpeggio vigezzino; i recenti lavori di recupero hanno prodotto all’esterno estese operazioni di integrazione dei giunti murari (documentate durante i lavori) eseguite con



4.9-21



4.9-22



4.9-23



4.9-24



4.9-25

malte *bastarde*; si può osservare come il contrasto tra i giunti originari e quelli recentemente eseguiti sia stridente. Ma il contrasto è pure evidente con la grande attenzione posta nel recupero degli elementi interni, dove anche le mangiatoie per gli animali sono state pulite, restaurate e ricollocate nella futura abitazione con rinnovata funzione; qui, l'utilizzo di prodotti naturali per il restauro del legno biocompatibili e atossici, ha trovato ampia applicazione. Pertanto, risulta incomprensibile come possano essere ancora attuate operazioni con differenti livelli di sensibilità e di attenzione così marcati tra interno ed esterno. La figura 4.9-23 mostra una superficie decorata con motivi architettonici e colori di gusto ottocentesco. Su tale edificio vigezzino, a sinistra è evidente un avanzato degrado superficiale, con dilavamento ed erosione, cui si somma la presenza di film biodeteriogeni; a destra, un rappezzo eseguito per colmare una vasta lacuna con malta cementizia, aggiunge un degrado indotto da un'operazione errata⁷ alle forme di degrado endemico.

Nota 4.9-7 - In relazione all'uso del cemento quale legante nelle malte per gli edifici storici, occorre tenere conto di alcune caratteristiche proprie del materiale. Di seguito alcune di queste sono riportate come promemoria; i dati specifici o tecnici relativi possono essere reperiti nella bibliografia di riferimento.

Il cemento Portland, in parte per sua composizione, in parte per i combustibili che oggi vengono impiegati per la cottura del materiale di partenza sino alla temperatura di clinkerizzazione (1450 °C circa), contiene sali solubili (NEVILLE, A.M., *Properties of concrete*, Longman, IV ed. 1996, p. 2). Esso, pertanto, può dare luogo a efflorescenze in presenza di umidità di risalita (si tenga conto che oggi, dato l'elevato costo dei combustibili, in molti forni rotanti dei cementifici vengono bruciati copertoni tritati, scarti dell'industria chimica, rifiuti di varia provenienza, per esempio). Va inoltre ricordato che la presenza di C₃A (alluminato tricalcico) nel cemento, in caso di presenza di solfati nel terreno, nell'acqua o nei materiali da costruzione comporta il rischio di formazione di *ettringite*, sali fortemente espansivi, con effetti di grave danno per i manufatti (NEVILLE, A.M., *cit.*, p. 101).

Il cemento Portland ha una elevata finezza di macinazione; le malte miscelate con sabbia e cemento, o calce aerea e cemento senza additivi aeranti, per questo risultano molto "compatte" e hanno una permeabilità al vapor d'acqua inferiore alle malte a base di calce.

Il cemento Portland conferisce resistenze meccaniche a compressione più elevate alle malte rispetto alle malte a base di calce (ovviamente secondo le differenti proporzioni di miscelazione); questo aspetto, in certi casi, potrebbe favorire il formarsi di regimi tensionali differenti da quelli originari (cfr. SCARZELLA, P; ZERBINATTI, M., *cit.*, pp. 266-269).



4.9-25

Fig. 4.9-25 - Veglio, Montecrestese. Dettaglio del lato est di un edificio intonacato con malte a base di calce e sabbie locali, con comignolo siglato e datato (1875). I manufatti ultracentenari, eseguiti a regola d'arte, sembrano reggere bene l'azione del tempo e dell'acqua piovana.

Nota 4.9-8 - Le ragioni del cambiamento sono note e sono state ampiamente trattate; queste, in buona parte riconducibili ai cambiamenti indotti anche nel settore edilizio nei decenni di "boom economico", hanno di fatto creato una cesura con i "saperi tradizionali", lasciando uno spazio vuoto che oggi, faticosamente, si tenta di ricolmare. In tale tentativo, fra gli errori più comuni ve ne sono due:

1 - quello di volere utilizzare sugli edifici storici i materiali per la nuova edilizia in modo acritico,

2 - quello di volere tornare, in modo parimenti acritico, ai materiali tradizionali senza valutare gli effetti che possono esserci in un ambiente che è mutato nel suo complesso: l'inquinamento, l'indisponibilità di determinati prodotti, il cambiamento dei processi di produzione, sono fattori da valutare con attenzione.

Per esempio, occorre considerare che la produzione odierna della calce è rivolta in minima parte al settore edilizio; essa è in gran parte assorbita da altri settori, quali l'agricoltura, l'industria ceramica, la produzione dello zucchero, per citarne alcuni. Di conseguenza, la qualità del prodotto per il settore edilizio riveste un interesse secondario. Disporre di grassello di calce stagionato (di migliore qualità) o di calci idrate ben spente, senza la presenza di *incotti* macinati con l'insieme della calce spenta, richiede, di fatto, attenzione nelle scelte.

Analogamente, la figura 4.9-25 pone in evidenza un esteso intervento di sostituzione di un intonaco esterno su di un edificio rurale ticinese; qui, il rivestimento rustico originario, a base di calce con la probabile aggiunta di argilla, è stato reintegrato nella parte inferiore con un intonaco cementizio di colore grigio, che non ha più i valori di colore di fondo, di grana e di tessitura superficiali del primo.

4.9.4 - Criteri di intervento e soluzioni tecniche compatibili

La vastità di questo tema impone necessariamente una selezione e una sintesi degli argomenti, con particolare attenzione a quanto può essere praticamente utile agli operatori tecnici.

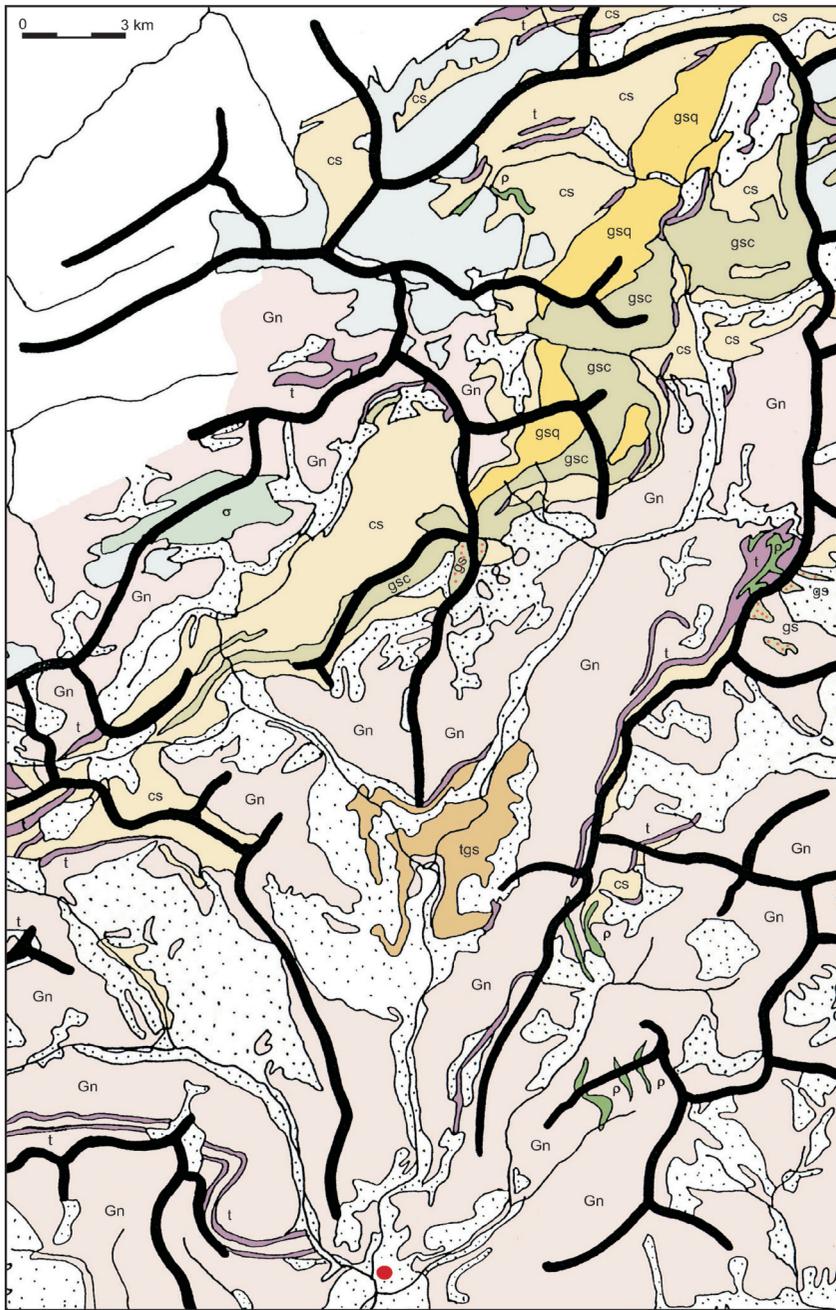
In seguito, per alcuni materiali (o sistemi) sono posti in evidenza i criteri di miscelazione, le principali caratteristiche prestazionali, i problemi di applicazione, gli eventuali inconvenienti in opera.

Alcuni criteri nodali portati quali esempio sono - normalmente - una diretta conseguenza di un buon progetto di intervento, basato su una adeguata fase di conoscenza, cui seguono una attenta direzione e conduzione dei lavori.

Il primo e fondamentale criterio di selezione per impostare correttamente un recupero o una manutenzione è quello di porsi nella condizione di valutare, per ogni specifico caso, quali siano i materiali più adatti; fra quelli oggi disponibili sul mercato, occorre sapere discernere valutando le loro effettive proprietà specifiche, anche superando i contenuti (a volte insufficienti, in termini di dati) delle "schede tecniche", talvolta troppo simili alle "schede commerciali" dei prodotti stessi. Per quanto attiene i sistemi di rivestimento e di finitura, in condizioni ordinarie, risulta sempre opportuno avvalersi di materiali che abbiano un comportamento in opera simile a quello dei materiali originali (sono fatti salvi i casi particolari, per esempio ove occorra operare con consolidamenti importanti o miglioramenti complessivi alle azioni sismiche di un edificio).

Un altro criterio da seguire, quando praticabile, è quello di utilizzare materiali localmente disponibili appartenenti alla tradizione costruttiva del posto. L'esempio più immediato da portare è quello dell'uso di sabbie per il confezionamento di malte "a vista" (cfr. Figg. 4.9-26 - 29); altra possibilità, se occorre fare delle reintegrazioni di limitata entità in murature con giunti di malta o di lacune poco estese su intonaci non tinteggiati, può essere quella di reimpiegare il materiale di demolizione dei vecchi giunti o dei vecchi intonaci come aggregato della nuova miscela (peraltro, pratica un tempo consuetudinaria nelle costruzioni).

Non sempre è possibile approvvigionarsi del materiale occorrente nei modi e nei posti in cui "storicamente" si poteva fare. Talvolta, però, è possibile trovare delle valide soluzioni alternative: documentarsi sul-



4.9-26

Figg. 4.9-27 e 4.9-28 - Crevoladossola, punto di prelievo della sabbia campionata e legenda della mappa raffigurante la geologia schematica.

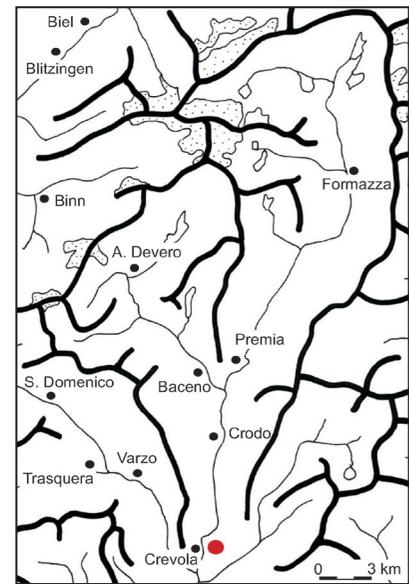
- Ghiacciai**
- Quaternario**
Alluvioni, detriti di falda, coni di deiezione, morene
- Trias e Giura**
cs - Calcescisti biotitici e talvolta anfibolici
- gsq** - Quarziti gneissiche a biotite

4.9-28

- Trias**
t - Comprende: zone complesse calcareo scistose; calcari e dolomie con inserzioni di calcescisti e filladi, gneiss minuti e quarziti [ecc., t], calcari cristallini, spesso micacei e dolomitici; cipollini, dolomie saccaroidi e breccie calcaree [t], gessi micacei, in parte anfibolici, con anidriti[t,g], carniole [t,c], quarziti micacee, in parte calcarifere [t]
- tgs** - Micascisti per lo più granatiferi; talora con staurotide; con banchi gneissici talora anfibolici e passanti ad anfiboliti (Baceno, Varzo)

Fig. 4.9-26 - Geologia schematica dell'alto bacino del Toce. Dalla *Carta Geologica d'Italia*, Foglio 14 (ristampa 1959) e Foglio 5 (ristampa 1958).

Il campione di sabbie proveniente dall'alveo del Toce presso Crevola, poco a monte della confluenza con il torrente Devera, è costituito prevalentemente da prodotti della comminazione di gneiss, gneiss granitoidi e micascisti. Questa costituzione conferisce il tono grigio chiaro d'insieme riferibile ai minerali prevalenti: quarzo incolore, feldspati bianchi e mica biotite nera. Alle granulometrie intermedie si evidenzia una tessitura puntinata più marcata. Frammenti delle rocce originarie sono nettamente prevalenti nelle classi più grossolane fino a 1,180 mm. I grani di questa classe si presentano debolmente arrotondati. Alle granulometrie inferiori la loro presenza si riduce gradualmente, lasciando spazio a grani spigolosi o a spigoli vivi di minerali liberi. Tra questi il quarzo insieme ai feldspati, che prevalgono già a partire da 1,180 mm (l'analisi mineralogica è stata effettuata da Maurizio GOMEZ SERITO. Cfr. SCARZELLA, P; ZERBINATI, M., *cit.*, capitoli 1.2.2 e 1.2.3, a cura di Marco ZERBINATI e Maurizio GOMEZ SERITO, pp. 186-187).



4.9-27

- Pretriassico**
gsc - Gneiss minuti a micascisti in prevalenza parascisti; micascisti cloritici ed anfibolici. Scisti a staurotide. Scisti grafitici intercalati ai precedenti
- gs** - Gneiss minuti a micascisti in prevalenza parascisti [ecc.]
- Gn** - Gneiss ghiandone porfiroide (ortogneiss). Graniti gneissici, gneiss granitoidi, talora occhiolati
- p** - Anfiboliti
- σ** - Serpentine. Pietra ollare

Nota 4.9-9 - Le calce idrauliche naturali, o NHL, sono classificate per classi di resistenza (cfr. Nota 4.8.6, par. 4.8.2.3, p. 4-103).

Qui preme sottolineare che all'interno della Norma UNI EN 459-1 e 2, nel tempo sono state fatte rientrare, quali calce idrauliche quelle siglate NHL-Z e ora, con la versione 2010, le FL (Calce Idrauliche Formulate).

Occorre dunque tenere desta l'attenzione: "Z" in tedesco indica "zement" (cemento), pertanto nella formulazione da normativa era possibile contemplare l'aggiunta di "leganti idraulici" non meglio specificati (leggasi: il cemento). Con un rischio evidente: la presenza del C₃A e le possibili reazioni in presenza di attacchi solfatici.

Le Calce Idrauliche Formulate (FL) sono una nuova classe introdotta con la revisione della Norma; essa permette di ottenere una calce idraulica mescolando calce aerea, calce idraulica naturale e altre aggiunte per le quali è necessario specificare nome e percentuale.

Nota 4.9-10 - Gli studi condotti presso l'ex DISET del Politecnico di Torino (ora DISEG) e altri studi di colleghi ricercatori di altri Atenei o Centri di Ricerca possono risultare utili per fornire dati parametrici di riferimento in merito alle resistenze meccaniche di diverse miscele di malta testate. In particolare, vedasi: NELVA, R.; VANCETTI, R., *Valutazione e confronto sperimentale dei moduli elastici per malte per restauro*, in: SCARZELLA, P.; ZERBINATI, M., *cit.*, pp. 361-369.

Nota 4.9-11 - La trattazione specifica richiederebbe approfondimenti molto puntuali, già trattati dalla bibliografia di riferimento. Qui pare utile ricordare che molte di queste aggiunte possiedono un loro colore caratteristico (come la pozzolana rossa o il *cocciopesto*) pertanto non sono indicate per finiture da lasciare direttamente "a vista", poiché influiscono sui caratteri estetici della matrice di fondo.

Nota 4.9-12 - Lo studio delle miscele di malta e della loro distribuzione granulometrica è stata oggetto di molte ricerche, a partire dai basilari studi di FULLER e THOMPSON del 1909. Per le finalità del manuale si ritiene utile riportare soltanto alcuni esempi di grafici relativi alle curve di distribuzione di:

- aggregati con pochi fini,
- aggregati con molti fini,
- aggregati per malte macroporose.

le cave attive capaci di fornire aggregati classificati, simili per specie mineralogiche a quelli impiegati in un certo bacino, oppure ricorrere a sottoprodotti di cava aventi costituzione adeguata sono alcune delle soluzioni da valutare.

In sintesi, occorre sempre agire in modo consonante con il palinsesto architettonico sul quale si interviene, rimuovendo quanto di inadatto o incongruente vi si trova e proponendo stratificazioni in linea con i caratteri connotanti del manufatto edilizio.

4.9.4.1 - Malte a base di calce

L'uso della calce per secoli è stato l'unico possibile; con l'avvento del cemento quale legante, in gran parte l'impiego della calce è stato abbandonato⁸.

Le malte a base di calce possono ancora essere confezionate e applicate in opera a perfetta regola d'arte; è sufficiente conoscere bene i materiali disponibili, alcuni criteri di miscelazione e "non avere fretta" di terminare il lavoro, considerato che:

- la calce reagisce con l'aria per carbonatazione, quindi ha dei tempi di presa e indurimento più lunghi rispetto ai leganti idraulici,

- se si organizza il lavoro in modo adeguato, esiste la possibilità di rispettare i tempi di esecuzione anche con i materiali "tradizionali", vista la possibilità di impiegare, in combinazione con la calce aerea, altri materiali capaci di abbreviare i predetti tempi di presa.

Per esempio, soprattutto per malte e intonaci che non hanno un colore di fondo vicino al bianco, oggi è possibile usare miscele di calce aerea e calce idraulica naturale (aventi un colore tendente al nocciola chiaro) in modo da associare un processo di parziale "presa idraulica" al processo di carbonatazione⁹.

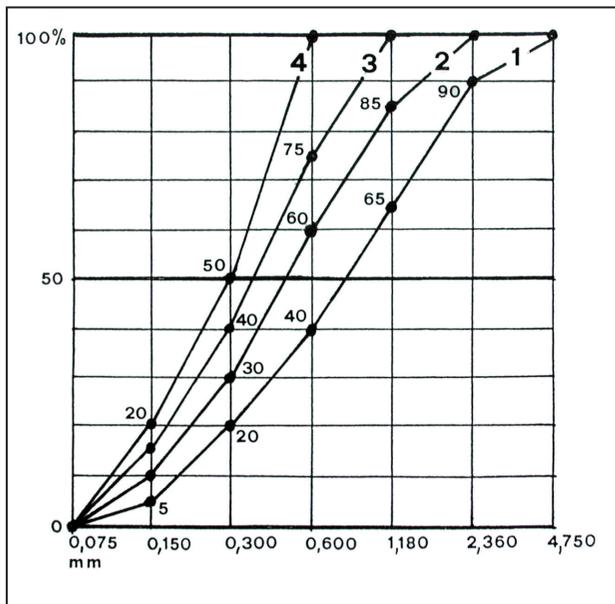
I rapporti di miscelazione ovviamente variano in ragione delle caratteristiche meccaniche che deve avere la malta¹⁰, ma per fornire alcuni esempi è possibile riferirsi ai rapporti "in volumi" (molto pratici in cantiere) più ricorrenti, quali:

sabbia:calce aerea 3:1, 2,5:1
sabbia:calce aerea:NHL 6:1:1 9:2:1 12:3:1

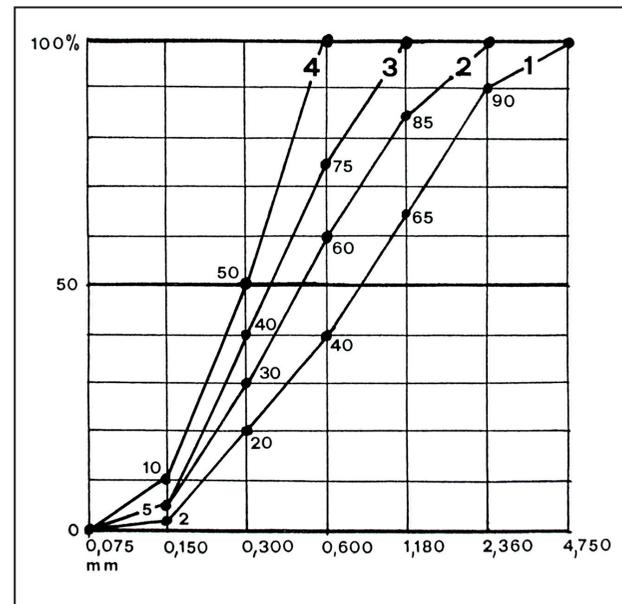
Le malte a base di calce possono essere miscelate con altri materiali a comportamento pozzolanico capaci di reagire con essa, conferendo agli impasti una parziale presa idraulica formando dei silicati di calcio idrati (o, anche, silico alluminati di calcio idrati); fra questi ricordiamo le pozzolane naturali, il *cocciopesto* (di fatto, una pozzolana artificiale), la perlite naturale, per esempio¹¹.

4.9.4.2 - Principi di base per la miscelazione di aggregati per malte a base di calce

La miscelazione "a volumi" con i rapporti "semplificati" indicati a



4.9-29



4.9-30

esempio, deriva da un principio basilare: il legante deve possibilmente colmare il volume dei vuoti (cioè lo spazio interstiziale) presente tra i granuli dell'aggregato. Se il legante riempie perfettamente tale spazio, si ottiene una malta compatta, con un contenuto ritiro dato dall'evaporazione dell'acqua di impasto, con prestazioni meccaniche elevate rispetto al legante impiegato¹².

Da questo principio è possibile fare discendere una serie di criteri e di variazioni dimostratesi molto utili per particolari applicazioni; alcuni di questi sono richiamati per tratti essenziali, allo scopo di evidenziare, fra gli altri aspetti:

- il comportamento specifico di malte speciali,
- le ragioni di precise prescrizioni delle voci di capitolato di alcuni prodotti premiscelati in commercio, correntemente utilizzati negli interventi di recupero.

Nella miscelazione di malte a base di calce con aggregati locali occorre tenere conto di alcuni criteri di base.

1 - Utilizzando sabbie locali è possibile disporre di aggregati ricchi di frazioni fini o poveri di tali classi granulometriche (< 0,300 mm). Per tale caratteristica, può variare il volume apparente dei vuoti e, di conseguenza il rapporto legante:aggregato. Si tenga conto che i corsi d'acqua di montagna a carattere torrentizio sono meno ricchi delle frazioni fini, più facilmente asportate dalla corrente o dalle ondate di piena.

2 - In molte località di montagna, la disponibilità di sabbie povere di aggregati di piccole dimensioni ha portato, nei secoli, all'utilizzo di argilla (o terra) negli impasti. Tale soluzione assolve a un duplice scopo:

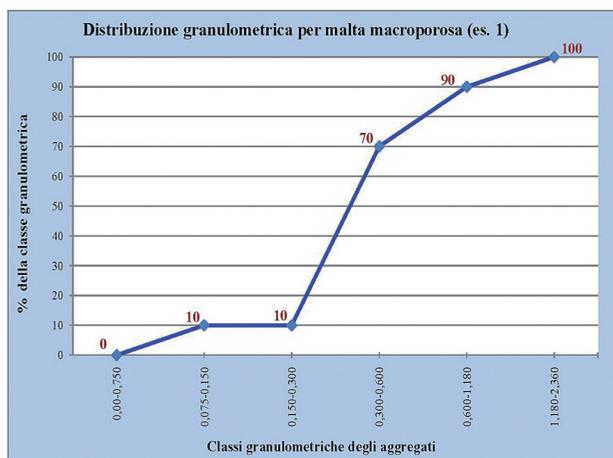
- in primo luogo, l'argilla sostituisce gli aggregati più fini nell'assortimento degli aggregati, colmando dei "vuoti" e riducendo il rapporto legante:aggregato,
- in secondo luogo, l'argilla avvolge molto bene i grani di aggregato

Figg. 4.9-29 e 4.9-30 - Distribuzioni granulometriche di esempio, messe a punto all'interno del Dipartimento ISET (ora ISEG) del Politecnico di Torino. Le quattro curve a sinistra sono state disegnate per sabbie locali con una buona distribuzione anche nelle frazioni più fini. Le quattro curve del grafico a destra sono più indicate per sabbie estratte da corsi d'acqua a carattere torrentizio (o, comunque, con pochi aggregati fini).

Nei due grafici, le curve possono essere riferite a malte o intonaci per diverse funzioni (allettamento, rinzafo, intonaco di corpo o corpo-finitura, finitura). Risulta utile tenere presente due fattori:

- 1 - la miscelazione di malte all'interno di uno stesso cantiere è sempre stata estremamente variabile (indagini anche molto precise sugli edifici storici lo testimoniano); quindi tali curve vanno intese con valore puramente indicativo,
- 2 - un andamento qualitativo delle distribuzioni simile deve essere facilmente ottenibile in cantiere, con due o al massimo tre diversi mucchi di sabbia e con dosaggi "a volumi".

Nota 4.9-12 - L'argilla ridotta in pasta, con quantità d'acqua sufficiente a determinare la bagnatura della polvere trasformandola in un prodotto plastico "saturo", occupa un volume inferiore rispetto all'argilla asciutta. Ciò è imputabile alla struttura mineralogica a lamelle dell'argilla. Pertanto, miscelando alle sabbie argilla in pasta si consegue un duplice risultato: l'argilla non aumenta il fabbisogno di acqua di impasto durante la lavorazione e, al contempo, non aumenta il rischio di ritiri accentuati.



4.9-31

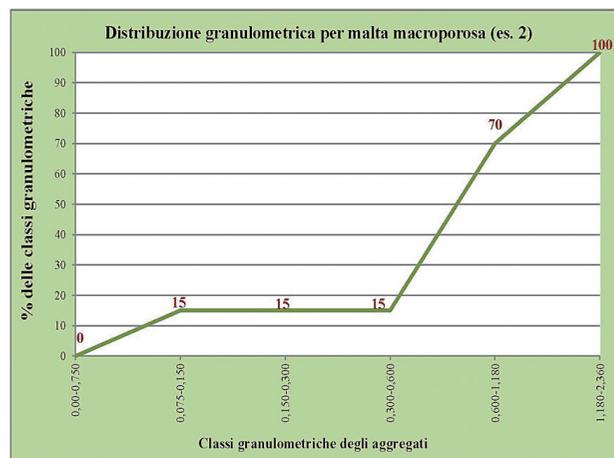
Nota 4.9-13 - In merito alle malte in questione, il termine **macroporose** è quello più appropriato. Tali malte non sono *deumidificanti* né *risananti* (poiché non eliminano le cause alla base dell'umidità di risalita né estraggono l'umidità dai supporti). Sono un valido supporto (spesso di durata limitata nel tempo, come sarà detto più avanti) alle soluzioni di risanamento di tipo edilizio che un progetto prevede.

Nota 4.9-14 - Gli additivi aeranti testati a scala di laboratorio sono stati gentilmente messi a disposizione da una multinazionale che rifornisce i più grandi produttori di malte del mercato nazionale; il loro supporto tecnico è stato determinante per apprendere i basilari "segreti" di miscelazione. Già nell'antichità additivi e aggiunte erano comunemente usati. Per approfondimenti: SICKELS, L.B., *Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars*, in: *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*, IC-CROM Symposium, Roma, 1981, pp. 25-52.

Nota 4.9-15 - Le fibre più comuni sono di materiale poliestere, di differente lunghezza (in mm) e con diametri di pochi *microns*. Nelle malte storiche, spesso erano aggiunte fibre vegetali (di canapa, per esempio).

Nota 4.9-16 - Per esempio, l'uso di metilcellulose modificate conferisce una compattezza adeguata all'impasto e una contemporanea capacità di trattenere l'acqua di miscela anche nei periodi più caldi, evitando evaporazioni repentine e conseguenti ritiri eccessivi con formazione di fessure estese (Norma UNI 459-2:2010, Parte 2, metodi di prova).

Tuttavia con tali additivi l'impasto risulta "colloso" e difficilmente lavorabile; per questo, alle miscele sono aggiunti altri additivi "idrorepellenti" (per esempio, stearato di calcio e oleato di sodio), al fine di avere impasti che non aderiscono agli attrezzi da lavoro



4.9-32

e contribuisce a legare la malta.

Per contro, dato il suo elevato fabbisogno di acqua di impasto (dato dalla sua natura mineralogica) genera di solito evidenti fessurazioni superficiali. Le sperimentazioni condotte a scala di laboratorio, con alcune applicazioni pratiche di cantiere, hanno fornito un'indicazione utile su come può essere risolto questo problema: occorre colmare il volume dei vuoti apparente dell'aggregato con miscele di calce e argilla o, addirittura, con sola argilla ridotta in pasta¹².

4.9.4.3 - Caratteristiche principali di malte macroporose impiegate nel recupero

In presenza di umidità ascendente nelle murature, in molti cantieri viene prescritto l'impiego di malte macroporose¹³ per intonacare la parte inferiore delle murature, di solito dal piano di spiccato oltre la fondazione per un'altezza variabile in rapporto al fenomeno rilevato. Le malte macroporose applicate sono in gran parte premiscelate, soltanto raramente sono confezionate a piè d'opera; per produrle in cantiere occorre conoscere alcuni criteri di miscelazione relativamente semplici.

Innanzitutto, le malte macroporose in commercio hanno una distribuzione degli aggregati che prevede l'esclusione di alcune classi granulometriche: ciò è dovuto al fatto che le malte sono opportunamente additivate con aeranti capaci di produrre pori di diverso diametro, tra loro comunicanti. In questo modo, l'aria inglobata "sostituisce" virtualmente determinate classi di aggregato e permette una maggiore evaporazione dell'acqua dal substrato murario¹⁴. Ovviamente, questo comporta un notevole abbassamento della massa volumica apparente di tali malte e delle loro proprietà di resistenza meccanica. Le figure 4.9-31 e 4.9-32 offrono due esempi di miscelazione di aggregati con "salti" di classi sostituibili con bolle di aria.

Al fine di comunque rendere coese e lavorabili le malte allo stato fresco, nonché per evitare accentuati fenomeni di ritiro durante l'indurimento e la presa, nella miscela sono disperse fibre sintetiche a elevata

bagnabilità, ovverosia capaci di disperdersi molto bene nella miscela con l'aggiunta di acqua e di disporsi nelle tre direzioni dello spazio¹⁵.

L'additivazione con aeranti comporta la necessità di aggiungere altre sostanze di sintesi per ottenere adeguate reologia e lavorabilità allo stato fresco. Per questo nei premiscelati, di solito, sono presenti anche additivi con funzione di addensanti e di ritenzione dell'acqua, nonché di "idrorepellenti"¹⁶.

Da queste sintetiche indicazioni è rilevabile come sia complesso produrre a pié d'opera malte con speciali funzioni o prestazioni come, per esempio, le malte macroporose; soprattutto, si tratterebbe di prodotti non certificati o "marchiati" come previsto dalla normativa e sarebbe impossibile garantirne le predette prestazioni.

L'esistenza di organismi di normazione, di procedure di valutazione e certificazione di prodotti e sistemi è indirizzata a tutelare l'utente finale e a garantire che, effettivamente, i prodotti abbiano precise qualità. Tuttavia, va fatta anche un'altra considerazione. In passato i prodotti e i "sistemi" con essi ottenuti non erano certificati e la loro qualità dipendeva da due fattori: dalla qualità delle materie prime e dai magisteri costruttivi tramandati di padre in figlio o da maestro ad allievo.

Osservando le costruzioni storiche diffuse, non è difficile trovare finiture esterne ultracentenarie bene od ottimamente conservate. E' una semplice constatazione che apre un ampio spazio alla riflessione per tutti noi.

Tornando alle malte macroporose, vale ancora la pena ricordare che quelle a base di grassello di calce, per esempio, sono già per loro costituzione malte dotate di buona traspirabilità. Il grassello di calce stagionato ha un tenore di acqua intorno al 50% della massa; in pratica, nel processo di carbonatazione che trasforma l'idrossido di calcio - Ca(OH)_2 - in carbonato di calcio - CaCO_3 - vi è una sensibile perdita di massa con la creazione di pori. Se a tale aspetto si associa una granulometria di aggregati studiata *ad hoc*, è possibile ottenere malte con discreti livelli di traspirabilità a costi molto contenuti.

4.9.4.4 - Prodotti e sistemi per la tinteggiatura di superfici esterne

In questo paragrafo sono brevemente illustrate le caratteristiche e le possibilità di utilizzo di prodotti e sistemi ritenuti adatti per l'edilizia storica. La trattazione estesa degli argomenti qui sintetizzati è contenuta negli scritti basilari di Paolo SCARZELLA¹⁷.

Innanzitutto, va ricordato come l'impiego di sistemi tradizionali a calce o calce e latte, pigmentati con terre coloranti naturali, oggi propongono due rilevanti limitazioni d'uso, peraltro conosciute da ogni decoratore sufficientemente formato ed esperto:

(a) le tinte a calce non sono in grado di aderire su supporti murari già "compromessi" da precedenti pitturazioni a legante polimerico,

(staggia, cazzuola, frattazzo, ecc.).

Un effetto secondario indotto dagli "idrorepellenti" è quello di ridurre il passaggio dell'acqua in fase vapore dal supporto murario all'aria. In proposito, *tests* di laboratorio hanno fornito esiti sorprendenti: a parità di distribuzione granulometrica, legante utilizzato, rapporto legante:aggregato, le malte con "idrorepellenti" riducono fino a un decimo (cioè, sino a un ordine di grandezza) la capacità di migrazione del vapor d'acqua verso l'esterno. Questo comportamento incide sulla formazione delle florescenze saline, tipico fenomeno visibile sulla superficie degli intonaci in presenza di risalita capillare (*efflorescenze*); con l'impiego di "idrorepellenti" la cristallizzazione dei sali avviene per molto tempo all'interno del sistema di intonaco macroporoso (rinzafo+corpo), formando *criptoflorescenze* che arrivano a essere visibili in superficie solo dopo molti anni. Ecco perché quasi tutti i produttori di premiscelati specificano che il "sistema" deve essere applicato per almeno 22 - 24 mm di spessore; seguendo tali procedure applicative è facile superare un arco temporale di 10 anni senza che il sistema stesso presenti difetti visibili.

Le percentuali di miscela degli additivi sono in genere molto ridotte: possono variare dallo 0,02% allo 0,2% circa rispetto alla massa delle miscele a secco legante:aggregato.

Nota 4.9-17 - Tra i vari contributi sono qui citati:

SCARZELLA, P.; *Ricerche sulla manutenzione e sulla tinteggiatura esterna degli edifici storici torinesi*, in: Scienza e beni culturali, Atti del Convegno di studi, Bressanone 24-27 giugno 1986, pp. 495-504.

SCARZELLA, P.; NATALE, P., *Terre coloranti naturali e tinte a base di terre*, Savigliano, SAN, 1989.

SCARZELLA, P.; *Riferimenti tecnologici per il progetto delle ricoloriture murali degli edifici storici: dati coloristici, mezzi disponibili, indicazioni sperimentali di compatibilità e durabilità*, in: Scienza e beni culturali, Atti del Convegno di studi, Bressanone 26-29 giugno 1990, pp. 317-324.

Nota 4.9-18 - SCARZELLA, P.; ZERBINATTI, M., *Sistemi di ritinteggiatura e sistemi di conservazione di antiche coloriture. Problemi, ricerche, esperienze*, in: SCARZELLA, P.; ZERBINATTI, M., *cit.*

Nota 4.9-19 - Il sistema è "rimovibile" dopo bagnatura senza alterare le tracce delle antiche tinte sottostanti, come si è visto per i sistemi tradizionali a calce; e come per questi, il sistema è proponibile solo per interni e per esterni in ambienti non aggressivi.

Nota 4.9-20 - Cfr. SCARZELLA, P.; TRIVELLA, L.; BROGGI, D.; GASPAROLI, P.; MELZI, M., *Sistemi di tinteggiatura e di pittura murale. Comportamenti a confronto in tre anni di esposizione all'esterno*, in: Arkos, 21/24, settembre 1993, pp. 56-64.

Nota 4.9-21 - I sistemi di pittura murale ai silicati furono messi a punto in Germania intorno alla metà del XIX secolo. Lungamente sperimentati in ambienti aggressivi, contengono una soluzione di silicato di potassio; in fase di applicazione, l'idrolisi del silicato produce acido silicico (gel di silice) che per disidratazione si lega fortemente e durevolmente, sia alle sostanze minerali del supporto (intonaci) assicurando l'aderenza del sistema, sia alle cariche e ai pigmenti della pittura assicurandone la coerenza meccanica interna.

Inoltre presentano un modo di invecchiamento simile a quello illustrato per i sistemi tradizionali a calce (ma in tempi molto più lunghi); per progressiva disgregazione superficiale, con incremento dei caratteri di semitrasparenza del sistema.

Occorre considerare che i sistemi ai silicati hanno bisogno di particolari attenzioni in fase di stesura: le condizioni climatiche sono determinanti ed è necessario portare a termine le campiture senza interruzioni, onde evitare fastidiosi "segnii di ripresa" in opera e sovratoni cromatici.

Figg. 4.9-33 e 4.9-34 - Domodossola. Complesso della ex chiesa di S. Francesco. Le immagini documentano come oggi sia possibile, in interventi di restauro, ottenere effetti di velatura semitrasparente (o semicoprente) su edifici storici.



4.9-33

(b) le tinte a calce presentano durate limitate in ambienti esterni inquinati o aggressivi, in particolare sulle facciate esposte a forte dilavamento meteorico.

Conseguentemente è necessario individuare tra i sistemi di tinteggiatura per gli edifici storici quello più adatto al caso specifico, a seguito di un'adeguata progettazione; questa, per le opere più complesse, è opportuno sia risolta anche con la predisposizione di bozzetti di coloritura eseguiti con i sistemi adottati per l'intervento; l'attività di regolazione e controllo (cfr. Cap. 5) dovrebbe indirizzare anche verso tale compito preliminare¹⁸.

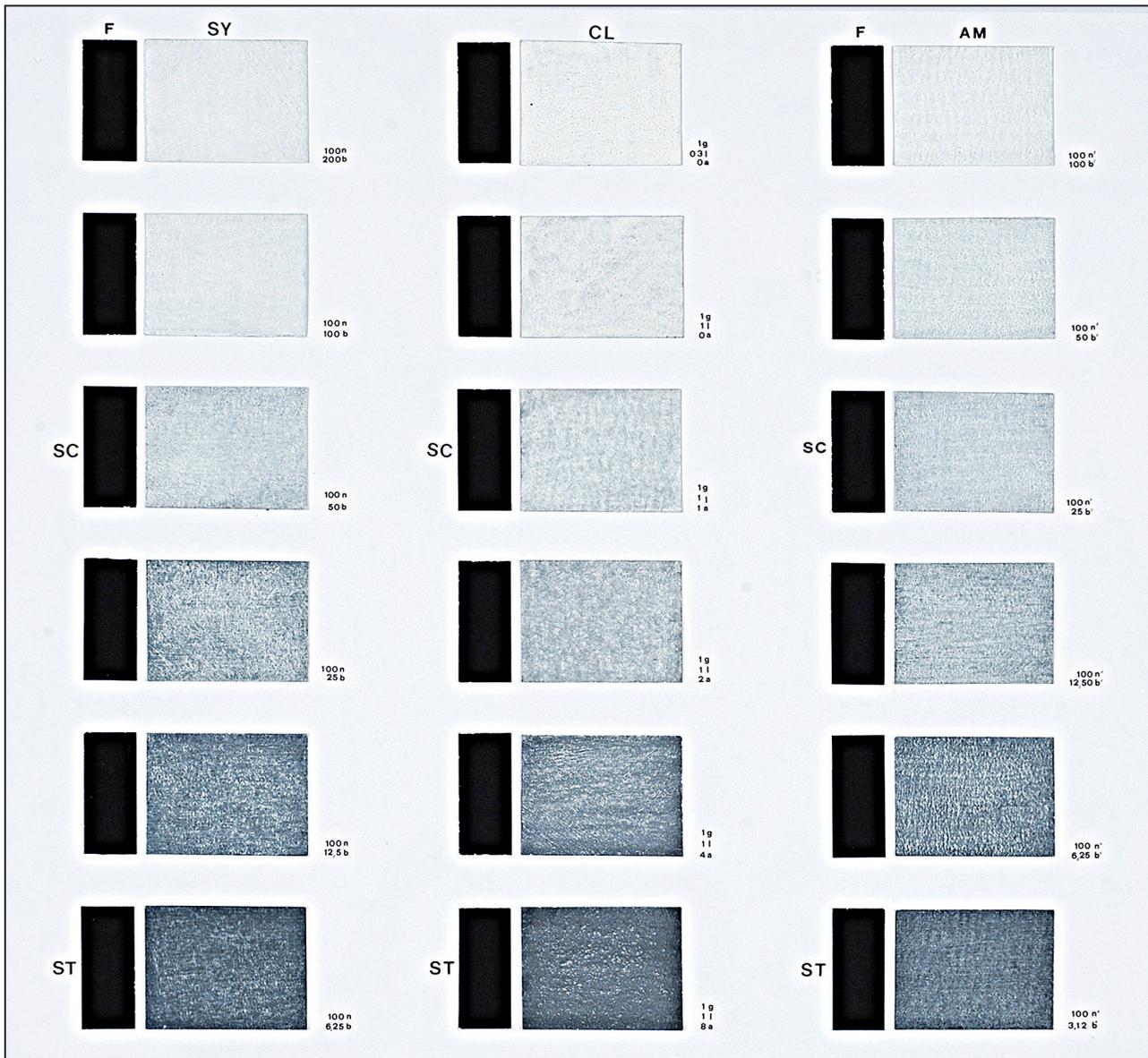
I sistemi a calce e terre coloranti naturali richiedono l'impiego di maestranze preparate; per facilitare l'applicazione per i decoratori, tali sistemi possono essere additivati con un disperdente (per evitare la decantazione dei pigmenti) e con un addensante (eteri di cellulosa, per aumentare la viscosità della pittura). Così, si "facilita" la stesura uniforme della tinta senza alterarne l'esito cromatico, la trasparenza e la tessitura superficiale. Inoltre gli eteri di cellulosa esercitano una funzione "collante" che impedisce alla tinta di "spolverare" al tatto¹⁹.

I sistemi a calce con aggiunta di resine acriliche furono testati in prove di esposizione comparative in ambienti aggressivi (Cinisello B.mo e Roma) e in "cantieri controllati" da P. SCARZELLA, L. TRIVELLA *et al.*²⁰. Considerate le caratteristiche ambientali dell'area tra Ossola e Ticino, sembra indicato suggerire questa possibilità applicativa per ritrattare le superfici compromesse da precedenti pitturazioni polimeriche.

Quando il supporto murario da tinteggiare non è ancora "compromesso" da una precedente pitturazione polimerica, un'importante alternativa ai sistemi a calce è costituita dai sistemi "minerali" semicoprenti ai silicati (in particolare, ai silicati di potassio), con i quali è possibile realizzare caratteri coloristici, di semicoprenza e di tessitura simili a



4.9-34



4.9-35

SISTEMA DI PITTURAZIONE	AMBITO DI APPLICAZIONE CONSIGLIATO		MODI DI APPLICAZIONE			PROBLEMI DI APPLICAZIONE O EVENTUALI INCONVENIENTI RICORRENTI
	INTERNO	ESTERNO	VELATURA SEMITRASPARENTE	VELATURA SEMICOPRENTE	VELATURA COPRENTE	
Sistemi a calce e terre naturali coloranti	Si	Si, in ambienti non inquinati o aggressivi	Si	Si	Solo con alcuni pigmenti, con rapporti di miscelazione particolari e con numerose "mani". I colori non sono stabili come quelli di pigmenti artificiali (ossidi).	Il film pittorico "spolvera" se sfregato, all'esterno è facilmente dilavabile
Sistemi a calce, latte e terre naturali coloranti	Si	Si, in ambienti non inquinati o aggressivi	Si	Si		Come per il precedente, occorrono maestranze esperte. All'esterno il film pittorico è facilmente dilavabile
Sistemi a calce, terre naturali coloranti, additivi addensanti e dispersanti	Si	Si, in ambienti non inquinati o aggressivi	Si	Si		Anche in questo caso occorrono maestranze esperte. All'esterno il film pittorico è facilmente dilavabile
Sistemi a calce con resine acriliche	No	Si, anche su supporti compromessi da precedenti pitture polimeriche	Si	Si		Tutti i sistemi a calce, anche additivati con resine, non permettono interruzioni di stesura sulle campiture, pena evidenti segni di ripresa ai lembi di sovrapposizione, con "sovratoni" di colore antestetici
Sistemi ai silicati di potassio	No	Si	Si	Si	Si	I silicati non possono essere applicati a basse temperature (< 7 °C, altrimenti non silicizzano), quando piove o in presenza di forte vento. I silicati non permettono interruzioni di stesura sulle campiture, pena, come per la calce, evidenti segni di ripresa ai lembi di sovrapposizione, con "sovratoni" di colore antestetici
Sistemi a base di metilossiani	No	Si	Si	Si	Si	Non possono essere applicati a basse temperature (< 5 °C). È opportuno evitare di interrompere la stesura sulle campiture per evitare "sovratoni" e saturazioni di tinta

4.9-36

di resine acriliche in dispersione. Si tratta di un sistema di pitturazione prevalentemente “minerale” (simile ai sistemi ai silicati) che offre alcuni vantaggi applicativi: (a) di poter aderire anche su precedenti pitturazioni a base polimerica, (b) di offrire una notevole idrorepellenza che limita la penetrazione di acqua piovana e l’adesione del pulviscolo atmosferico, (c) di poter conseguire, per miscelazione con le tinte coprenti della stessa linea, valori coloristici (di tono cromatico, di microtessitura superficiale e di graduabile semitrasparenza) simili a quelli delle tradizionali tinteggiature a calce e terre coloranti, (d) di essere “sovraverniciabile” con un’analogia pittura a base metilsilossanica.

Inoltre, nella stessa sperimentazione fu applicato con successo un prodotto trasparente a elevata traspirabilità; la sua funzione è quella di aumentare lo spessore del film pittorico senza alterare i valori coloristici e di semitrasparenza. Un maggiore spessore del film significa una più elevata durabilità del sistema in opera, anche sotto l’azione degli agenti meteorici (fig. 4.9-37).

Per favorire l’avvio di specifiche progettazioni di coloriture ai silicati di potassio o ai metilsilossani di un edificio storico, il Politecnico di Torino ha realizzato una tabella con tre scale di campioni di tinta bianca dotati di trasparenza crescente, applicati su uno stesso fondo nero di contrasto (figura 4.9-35).

La colonna centrale (CL) contiene la scala di riferimento, costituita da campioni di tinta bianca tradizionale a calce - latte - acqua, con trasparenza crescente dall’alto al basso, carattere percepibile dall’occhio per il tono di grigio crescente dovuto al trasparire del fondo nero. La colonna di sinistra contiene gli stessi effetti di velatura per semicoprenza e semitrasparenza ottenuti con i silicati di potassio (SY), mentre la colonna di destra gli analoghi effetti ottenuti con i metilsilossani (AM). La tabella comparativa dimostra come sia possibile ottenere gli effetti di velatura desiderati anche utilizzando prodotti “facilitati”.

Nota 4.9-22 - Il rapporto in peso grassello di calce / acqua è costante in tutti i campioni ed è quello mnemonico ottimale (1:1) per assicurare un’affidabile formazione di “caseinato di calcio” in funzione legante ed “antispolvero”. Con la crescente dose d’acqua nella tinta dei campioni (da 1:1:0 a 1:1:8, nella proporzione in peso grassello : latte : acqua, proporzione indicata a fianco dei campioni), cresce la trasparenza dei campioni stessi.

BIBLIOGRAFIA Cap. 4.9

SCARZELLA, P.; NATALE, P., *Terre coloranti naturali e tinte a base di terre*, Savigliano, SAN, 1989.

SCARZELLA, P., *Riferimenti tecnologici per il progetto delle ricoloriture murali degli edifici storici: dati coloristici, mezzi disponibili, indicazioni sperimentali di compatibilità e durabilità*, in: *Scienza e beni culturali*, Atti del Convegno di studi, Bressanone 26-29 giugno 1990, pp. 317-324.

NEVILLE, A.M., *Properties of concrete*, Longman, IV ed. 1996.

GASPAROLI, P., *Le superfici esterne degli edifici. Degradati, criteri di progetto, tecniche di manutenzione*, Firenze, Alinea, 2002.

SCARZELLA, P.; ZERBINATTI, M., *Superfici dell’edilizia storica. Restauro e manutenzione*, Firenze, Alinea, 2010.