

2.3 - METODI E STRUMENTI PER IL RILIEVO E LA RAPPRESENTAZIONE DEI TESSUTI EDIFICATI

ISABELLA BIANCO, PABLO ANGEL RUFFINO, MARCO ZERBINATTI

Questo paragrafo intende fornire una serie di criteri metodologici e pratici ai professionisti che si accingono a intervenire sul patrimonio architettonico e ambientale degli insediamenti alpini.

Le attività di recupero e di conservazione di tali costruzioni richiedono conoscenze storiche, attenzione e sensibilità nell'agire quali condizioni basilari per la comprensione dei valori di unicità di ogni edificio oggetto di interesse. I criteri di intervento saranno infatti delineati come conseguenza di un'indagine conoscitiva di base, finalizzata a porre in evidenza gli elementi di pregio storico, architettonico o ambientale (possibilmente da tutelare e conservare), distinguendoli da quelli di minor pregio (la cui modifica non crea sostanziali alterazioni d'immagine). L'analisi critica non si limita a considerare il singolo edificio, ma prende in considerazione anche il contesto territoriale e il periodo storico di concezione e realizzazione. Osservando un ambiente costruito con adeguato spirito critico è possibile comprendere la temperie culturale che lo ha generato e identificare i caratteri che maggiormente lo connotano.

Procedendo con un'analisi comparativa tra edifici coevi con le stesse destinazioni d'uso sarà dunque possibile delineare i caratteri connotanti che caratterizzano queste costruzioni. A questo punto ogni singolo edificio può essere analizzato nel dettaglio per mettere a fuoco la sua particolare individualità architettonica: pur presentandosi in analogia con altri edifici o manufatti dello stesso o di altri insediamenti, esso possiederà proprie peculiarità in rapporto a specifiche esigenze, condizioni, vincoli.

Tali analisi e interpretazioni permettono a tutte le persone coinvolte in un lavoro di conservazione e recupero (come proprietari, progettisti, funzionari, maestranze) di intervenire con una maggiore consapevolezza all'interno di una azione corale.

A tal proposito il rilievo diretto può prefigurarsi come utile strumento di indagine e comprensione. Esso ha il compito riportare informazioni che risultino utili per una corretta interpretazione storico-architettonica, sia d'insieme sia inerente le singole costruzioni. Tale strumento non è un mero rilevamento geometrico, bensì è finalizzato a fornire informazioni di tipo filologico-congetturale. Esso è dunque diretto a interpretare la configurazione stratificatasi nel tempo dei tessuti edificati. In ragione delle caratteristiche delle borgate alpine, il rilievo filologico deve essere in grado di delineare un chiaro quadro circa l'integrazione tra le parti che compongono il tessuto edificato e il rapporto tra questo e il contesto ambientale. Per quanto concerne gli edifici, può essere significativo reperire informazioni sulle epoche in cui essi sono stati realizzati ed eventualmente modificati, sulle destinazioni d'uso storiche degli ambienti,

sugli elementi caratteristici dell'architettura alpina in pietra (per esempio, l'*astic*, i timpani aperti), gli elementi che scandiscono la modulazione (aperture, ingressi). La rappresentazione del contesto evidenzia gli elementi naturali (fiume, bosco, ecc.), le strutture di colonizzazione (terrazzamenti, colture, muri, ad esempio) e i servizi della borgata (lavatoi, fontane, piloni votivi) e sottolinea l'inscindibile legame che lo unisce alle architetture.

Il metodo di rilievo che il gruppo di ricerca Interreg-Alpstone propone in questo paragrafo è stato elaborato *ad hoc* per l'architettura di pietra situata tra Ossola e Ticino e si propone come una integrazione alla Norma UNI 7310:1974. I fondamenti di questo contributo sono radicati nella pluridecennale esperienza maturata in ricerche applicate e dibattite sui temi del recupero e della conservazione dell'edilizia storica. Il sistema di rilievo è stato messo a punto nell'ambito di due programmi CNR dal 1972 al 1976 da Augusto Cavallari Murat e i suoi collaboratori nell'Istituto di Architettura Tecnica del Politecnico di Torino¹.

Il sistema di rappresentazione assunto è stato preso dalla norma UNI 7310:1974, la quale ha stabilito la "simbologia convenzionale da usarsi per la cartografia destinata alla rappresentazione grafica della consistenza architettonica, urbanistica e monumentale degli aggregati urbani storici aventi una configurazione prevalentemente caratterizzata da edifici multipiani"².

Per quanto riguarda la rappresentazione delle borgate montane, nel 1973 è stata pubblicata una "Proposta di simbologia convenzionale dalla cartografia di aggregati spontanei montani" dai professori F. Mellano, L. Morra, R. Nelva.

Le tecniche di analisi e rappresentazione degli aggregati edilizi in territorio montano sono invece state elaborate nel corso di una ricerca finanziata dal CNR dall'Istituto di Architettura Tecnica (responsabile della ricerca: R. Nelva) negli anni compresi tra il 1979 e il 1982.

Il metodo e la simbologia proposti in seguito sono basati sui predetti studi e si pongono come loro integrazione e adattamento per l'analisi e l'interpretazione delle tipiche costruzioni di pietra situate nelle vallate tra alpine tra Ossola e Canton Ticino.

Nota 2.3-1 - Hanno lavorato, a vario titolo, nei gruppi di ricerca: NELVA R., DESIDERI E., NOVELLO MASSAI G., COPPO S., BARDELLI P. G., GIANARRO G., COTTA RAMUSINO A.

Nota 2.3-2 - Norma UNI 7310:1974, p. 1.

Fig. 2.3-1 - Vista della via di accesso a Veglio (Montecrestese).



2.3-1

2.3.1 - Metodi e strumenti operativi

Per un corretto rilievo a scala urbana sono proposte essenzialmente cinque fasi operative: la documentazione preliminare, l'indagine preliminare, l'individuazione della simbologia di rappresentazione, il rilievo diretto e la fase di restituzione e analisi critica.

2.3.1.1 - Documentazione preliminare

Affinchè l'indagine *in situ* sia solidamente fondata e risulti più efficace è prassi corretta consultare precedentemente le fonti documentarie relative all'area di interesse. A seconda degli specifici obiettivi da perseguire può essere utile analizzare e comparare catasti attuali e storici, cabrei, ortofoto, cartografie, documenti d'archivio, ecc. (per questo aspetto si rimanda al cap. 2.1). Manuali e fonti bibliografiche possono inoltre fungere da supporto per le successive fasi di studio. La documentazione è particolarmente importante per l'analisi di situazioni ove sono presenti parti danneggiate o difficilmente documentabili con indagini dirette.

2.3.1.2 - Indagine preliminare

Un rilievo efficace dipende in larga misura dalla significatività degli elementi rappresentati e dalla chiarezza grafica. Per raggiungere tali obiettivi è consigliata una preliminare fase di studio presso l'aggregato alpino di interesse, volta a identificare i caratteri costruttivi che connotano il complesso ambientale. Questa fase, solitamente piuttosto speditiva, è di notevole importanza in quanto aiuta a delineare i criteri da utilizzare nella successiva fase di rilievo.

2.3.1.3 - Individuazione della simbologia di rappresentazione

I riscontri *in situ* hanno portato ad ampliare la simbologia di riferimento, mutuata dagli studi citati (cfr. Nota 2.3-1) e della Norma UNI 7310:1974, con la rappresentazione di elementi che connotano specificatamente l'architettura alpina di pietra di questo particolare contesto culturale. Alcuni simboli grafici sono stati infatti elaborati *ad hoc* per i manufatti di insediamenti nelle valli Ossola (frazioni di Montecrestese), Vigezzo (Craveggia, Toceno, Crana), Val Bavona (Sabbione e San Carlo). La simbologia qui adottata potrà ancora essere affinata nel tempo. In relazione a ciò, pare utile fare due considerazioni:

1) i simboli utilizzati per ampliare il lessico grafico potranno entrare "ufficialmente" in un apparato normativo ufficiale solo quando questo dovesse essere rivisto dalla Commissione di riferimento, rispettando l'iter procedurale previsto;

2) come per altri capitoli del manuale, questo approfondimento è "aperto":

sarà possibile proporre integrazioni o modifiche suggerendo fondate osservazioni (tali contributi potranno provenire, per esempio, da tecnici, professionisti, cultori). Di seguito è riportata la simbologia ad oggi elaborata suddivisa in elementi di contesto ed elementi edilizi. A ogni elemento corrispondono una breve descrizione, una o più fotografie e il simbolo grafico associato.

2.3.1.4 - Simbologia degli elementi di contesto

Convenzioni e simboli

Indicazioni altimetriche con curve di livello

Al fine di determinare e rappresentare le informazioni altimetriche del terreno è possibile utilizzare i dati ricavabili dai modelli digitali del terreno (DTM³). Le curve di livello sono rappresentate mediante linee continue, come mostrato in Fig. 2.3-2. Il valore delle quote è indicato in prossimità dei margini della rappresentazione grafica.

Indicazioni altimetriche puntuali delle curve di livello

Quando la rappresentazione delle curve di livello interferisce con la lettura del rilievo (per esempio, dove sono rappresentati insediamenti e piccoli aggregati edilizi) è conveniente interrompere le curve e integrare le informazioni altimetriche con indicazioni puntuali. Il simbolo è mostrato in Fig. 2.3-3.

Indicazioni altimetriche da strumentazione topografica

Al fine di individuare la quota di particolari elementi o per fornire indicazioni altimetriche di dettaglio, possono essere effettuati rilievi con strumentazione topografica. In questo modo è possibile determinare le quote di più punti e ottenere dei piani quotati. L'indicazione altimetrica da strumentazione topografica avviene per mezzo del simbolo in Fig. 2.3-4.

Orientamenti e scala grafica

“Ogni rilievo è corredato dallo schema del corso apparente del sole adottato dall'Istituto di Architettura Tecnica del Politecnico di Torino. Le carte vengono orientate (salvo casi eccezionali) con il Nord verso l'alto”⁴ e integrate con una scala grafica (Fig. 2.3-5).

Nota 2.3-3 - I DTM (dall'inglese *Digital Terrain Model*) sono rappresentazioni tridimensionali del terreno in grado di descrivere la superficie terrestre con un livello di precisione variabile a seconda degli strumenti e delle tecniche utilizzate. Il rilievo in scala 1:500 prevede la definizione di curve di livello ogni 0.5 m di dislivello. Tuttavia, poiché il DTM disponibile per la zona in esame presenta un livello di accuratezza pari a 4, è al contempo necessario prendere in considerazione le precisioni raggiungibili da tale modello digitale. Il DTM di livello 4 è realizzato tramite un insieme di punti quotati disposti in modo planimetricamente regolare secondo un grigliato di passo costante pari a 5 m. A tale livello l'accuratezza in quota è pari a 0.6 m in campo aperto e 1.2 m in caso di copertura arborea con estensione maggiore al 70% (Brovelli M. A., Cina A., Crespi M., Lingua A., Manzini A., Garretti L., *Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala. Linee guida*, p. 68). Di conseguenza la precisione mediamente raggiungibile è quella corrispondente a una scala di rappresentazione 1:2000, cioè con curve di livello ogni 2 m di dislivello.

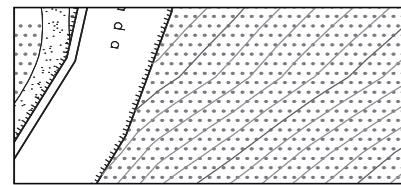


Fig. 2.3-2 - Simbolo rappresentante le curve di livello.



Fig. 2.3-3 - Simbolo rappresentante le indicazioni altimetriche puntuali.

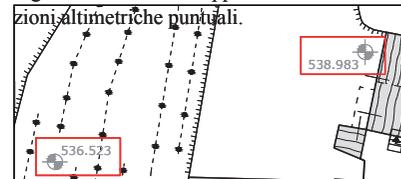


Fig. 2.3-4 - Simbolo rappresentante le indicazioni altimetriche da strumentazione topografica.

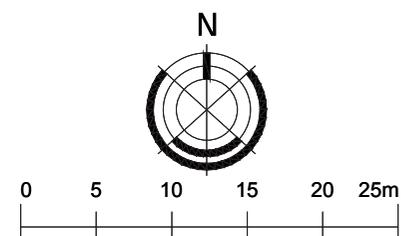


Fig. 2.3-5 - Simboli indicanti il nord e la scala grafica.

Nota 2.3-4 - MELLANO F., MORRA L., NELVA R., (1973), *Proposta di simbologia convenzionale dalla cartografia di aggregati montani*. In: Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia, Torino, 1973, p. 2.

Vie di comunicazione

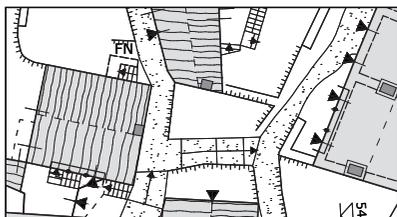


Fig. 2.3-6 - Simbolo rappresentante le vie di comunicazione.

Fig. 2.3-7 - Esempi di vie di comunicazione.
a) Mulattiera ad Altoggio (Montecrestese); b) Strada pedonale a Coimo (Druogno).



2.3-7a



2.3-7b

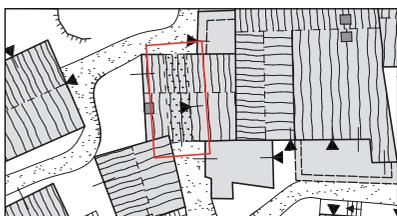


Fig. 2.3-8 - Simbolo rappresentante il passaggio sotto gli edifici.

Fig. 2.3-9 - Esempi di passaggi sotto edici a Veglio (Montecrestese).



2.3-9a



2.3-9b

Strade pedonali, mulattiere, carrarecce

Strade pedonali, mulattiere e carrarecce sono ampiamente diffuse in ambito montano, caratterizzando fortemente il paesaggio.

La loro rappresentazione nel rilievo dei borghi è fondamentale per una efficace lettura dei percorsi di comunicazione e, quindi, del territorio. In planimetria sono indicati con i contorni in linea continua e con una campitura irregolare a punti.

La presenza di scalini è indicata con linee trasversali; la successione di gradini è rappresentata con una freccia indicante il senso di percorrenza in ascesa (Fig. 2.3-6).

Passaggi

Quando una via di comunicazione transita all'interno dell'impronta planimetrica di un edificio, è solito riscontrare un passaggio al piano terreno. In questo caso, i passaggi sono raffigurati dalla compresenza del simbolo di cui al punto precedente (evidenziato tuttavia da un tratto di maggiore spessore) (Fig. 2.3-6) e di quello rappresentante le coperture (Fig. 2.3-34).

Si specifica che non sono considerati i passaggi di collegamento fra cortili privati, ma unicamente quelli appartenenti a una via di comunicazione.

Ponti

I ponti sono indicati con il contorno laterale a doppia linea continua e campitura interna a punti irregolari, come mostrato in Fig. 2.3-10.

In ambito montano i ponti rivestono sovente un ruolo fondamentale per la continuità delle vie di comunicazione. Essi possono presentare diversi generi di parapetti, come parapetti in scapoli di pietra (Fig. 2.3-11a) o avere avuto protezioni di legno incastrate in elementi appositamente formati, per esempio (Fig. 2.3-11b).

Per semplicità di rappresentazione e per maggiore chiarezza grafica il simbolo è unico.

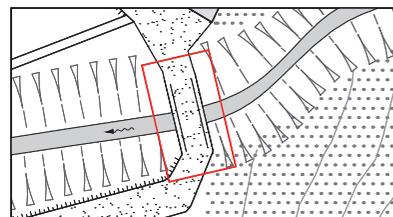


Fig. 2.3-10 - Simbolo rappresentante i ponti.

Fig. 2.3-11 - Esempi di ponti. a) Ponte con parapetto di pietra a Pontemaglio; b) Ponte situato a Veglio (Montecrestese) avente, in origine, un parapetto di legno.



2.3-11a



2.3-11b

Opere di terrazzamento e confinamento

Ciglioni

“I ciglioni sono scarpate senza muri, con cospicuo spostamento di terra, ma con ridotta regolazione idraulica”.⁵

Essi erano realizzati principalmente al fine di ottenere uno spazio terrazzato per utilizzo agricolo.

La Fig. 2.3-13b mostra una sezione verticale dei ciglioni.

Il simbolo di rappresentazione dei ciglioni è mostrato in Fig. 2.3-12.

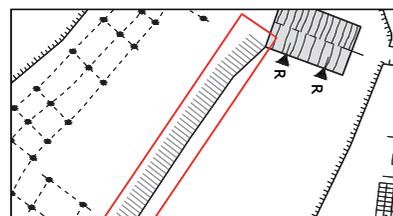


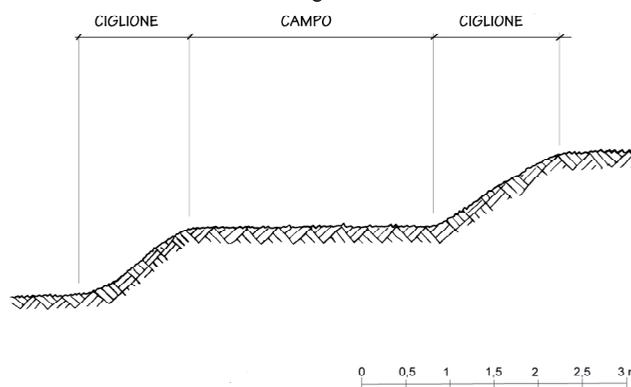
Fig. 2.3-12 - Simbolo indicante i ciglioni.

Nota 2.3-5 - SCARAMELLINI G., VAROTTO M., *Paesaggi terrazzati dell'arco alpino*, Marsilio, 2008, p. 11

Fig. 2.3-13 - a) Ciglione a Coimo (Druogno); b) Schema rappresentante la sezione verticale di un ciglione.



2.3-13a



2.3-13b

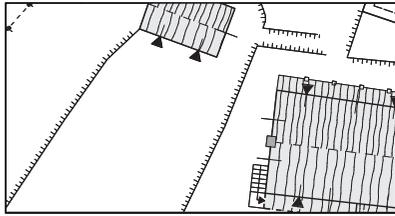
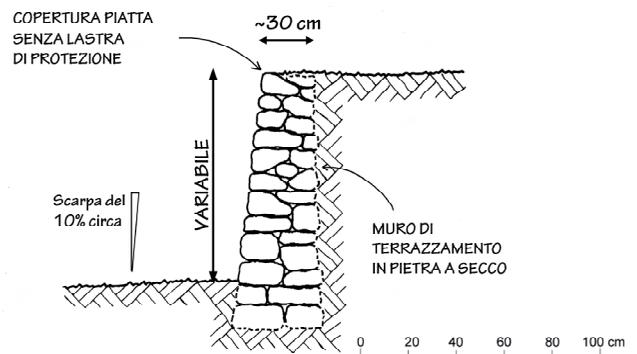


Fig. 2.3-14 - Simbolo rappresentante i muri di terrazzamento semplici.

Fig. 2.3-15 - a) Muro di terrazzamento semplice a Naviledo (Montecrestese); b) Sezione verticale di un terrazzamento semplice.



2.3-15a



2.3-15b

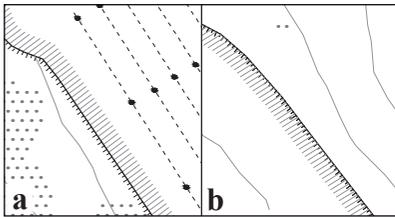
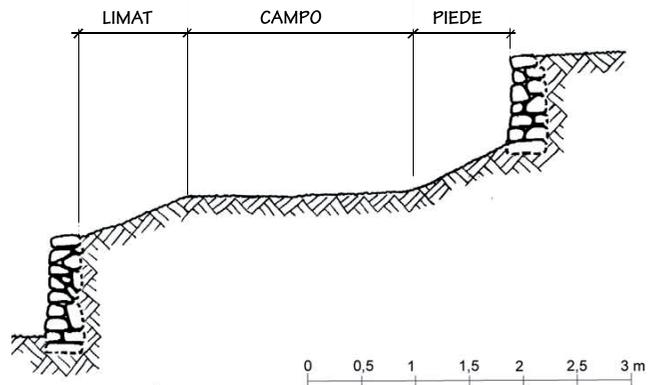


Fig. 2.3-16 - Simbolo rappresentante i muri di terrazzamento con piede (a) e *limat* (b).

Fig. 2.3-17 - a) Muro di terrazzamento con piede a Naviledo (Montecrestese); b) Sezione verticale di terrazzamenti con *limat* e piede.



2.3-17a



2.3-17b

Muri di terrazzamento semplice

I terrazzamenti alpini situati nell'area tra Ossola e Ticino erano solitamente realizzati costruendo muri di contenimento di pietra a secco. Essi hanno la duplice funzione di creare spazi disponibili per l'utilizzo agricolo e di contenere i frequenti fenomeni franosi e di dilavamento dalle piogge. Tali muri hanno spessore di sezione variabile (ma mai inferiore a 30-35 cm) in funzione dell'altezza e del materiale impiegato. La Fig. 2.3-15b mostra una sezione verticale dei muri di terrazzamento semplice. La presenza di muri di terrazzamento è indicata con una linea continua a cui è applicato, sul lato a quota inferiore, un tratteggio costituito da linee corte perpendicolari alla linea del muro (Fig. 2.3-14).

Muri di terrazzamento con *limat* e piede

Si tratta di un caso particolare del muro di terrazzamento semplice. Il *limat* è una fascia di terreno a pendenza variabile, lunga 2-3 m e posta a monte del muro di terrazzamento. Esso ha la funzione di ridurre il dislivello nei casi in cui la capacità portante dei tradizionali muri di contenimento non sia sufficiente a sostenere il terreno per l'intero dislivello. Esso è inoltre utilizzato per il passaggio e per la raccolta di materiale.

E' invece definito piede la fascia di terreno a pendenza variabile posta a valle del muro (Fig. 2.3-17b).

Il *limat* e il piede sono rappresentati con il tratteggio indicato nelle Figg. 2.3-16a e 2.3-16b, posto rispettivamente a monte e a valle del muro di terrazzamento.

Muri di cinta

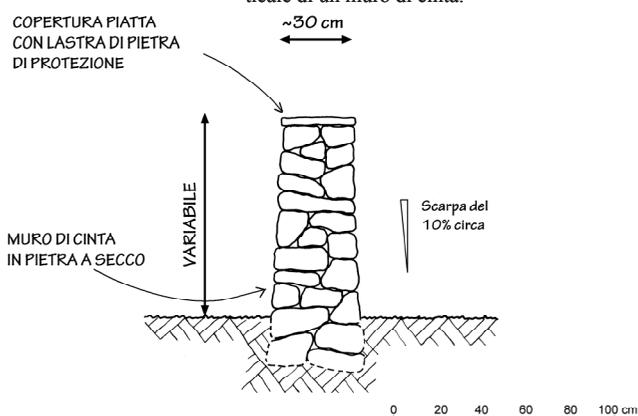
I muri di cinta sono muri di pietra a vista o intonacata, aventi funzione di confinamento di terreni o di delimitazione e protezione lungo le vie di comunicazione.

In molti casi i muri di cinta (anche quelli contro terra) sono stati realizzati con sassi raccolti sul posto durante le operazioni di spietramento dei campi.

La Fig. 2.3-19b ne schematizza la sezione verticale. Essi sono indicati con due linee continue parallele simboleggianti la geometria in pianta del muro (Fig. 2.3-18).



2.3-19a



2.3-19b

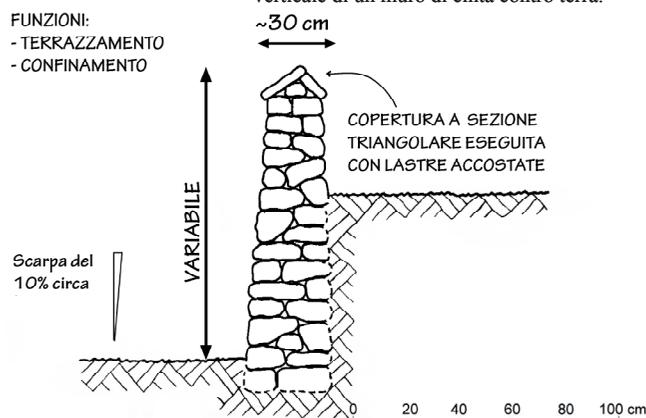
Muri di cinta contro terra

I muri di cinta contro terra sono muri di pietra aventi sia funzione di confinamento sia di terrazzamento, come mostrato nella sezione in Fig. 2.3-21b. Essi infatti delimitano un terreno, una via di comunicazione o un passaggio e fungono al contempo da muro di contenimento per ottenere degli spazi destinati a coltura agricola.

Il simbolo che li rappresenta è di conseguenza dato dall'unione dei simboli del muro di cinta e del muro di terrazzamento, come indicato in Fig. 2.3-20.



2.3-21a



2.3-21b

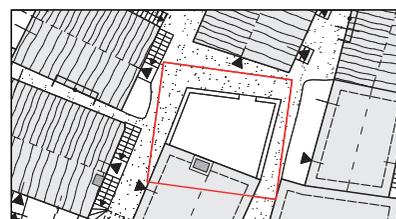


Fig. 2.3-18 - Simbolo rappresentante i muri di cinta.

Fig. 2.3-19 - a) Muro di cinta situato a Pusala (Montecrestese); b) Schema della sezione verticale di un muro di cinta.



Fig. 2.3-20 - Simbolo rappresentante i muri di cinta contro terra.

Fig. 2.3-21 - a) Muro di cinta contro terra a Sagrogn (Druogno); b) Schema della sezione verticale di un muro di cinta contro terra.

Costruzioni di servizio



Fig. 2.3-22 - Simbolo rappresentante le fontane.

Fontane

Tra le costruzioni di servizio si trovano le fontane, sistematicamente distribuite sul territorio. Esse sono spesso costruite con lastre di pietra collegate o, più raramente, con elementi monolitici.

Poichè le fontane solitamente hanno dimensioni piuttosto ridotte, nel rilievo a scala 1:500 è riportata unicamente l'annotazione FN (Fig. 2.3-22); non vengono dunque fornite informazioni relative alla geometria, alla tipologia, ecc.

Fig. 2.3-23 - Esempi di fontane. a) Veglio (Montecrestese); b) Mergozzo



2.3-23a



2.3-23b

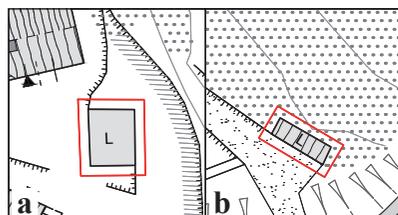


Fig. 2.3-24 - Simbolo rappresentante i lavatoi e gli abbeveratoi. a) Senza copertura; b) Protetti da una copertura.

Fig. 2.3-25 - Esempi di lavatoi e abbeveratoi. a) Naviledo (Montecrestese); b) Veglio (Montecrestese).

Lavatoi e abbeveratoi

Lavatoi e abbeveratoi sono costruzioni piuttosto diffuse lungo le vie di comunicazione degli insediamenti alpini, in quanto erano funzionali alle attività agropastorali e alle necessità della tradizionale società rurale. Se i lavatoi e gli abbeveratoi sono protetti da una copertura, essi sono rappresentati in pianta con le indicazioni circa le falde e la geometria del tetto, come indicato in Fig. 2.3-24b. Viceversa, nel caso in cui essi non siano coperti, il simbolo si limita a raffigurarne il contorno (Fig. 2.3-24a). In entrambi i casi, la rappresentazione è accompagnata dalla sigla L.



2.3-25a



2.3-25b

Piloni votivi, oratori, cappelle

Lungo le vie di comunicazione tra gli insediamenti alpini oppure in posizioni paesisticamente rilevanti sono spesso presenti degli edifici a carattere religioso (devozionale, votivo, propiziatorio, per esempio). Essi sono indicati rappresentando il perimetro della costruzione e segnando all'interno una croce, come mostrato in Fig. 2.3-26.

Quando il manufatto rappresentato fa parte di un sistema⁶ (per esempio, di un percorso devozionale, di una Via Crucis) al simbolo è associata la sigla S.

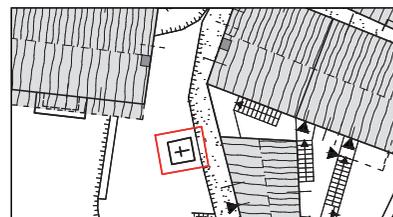


Fig. 2.3-26 - Simbolo rappresentante i piloni votivi.

Nota 2.3-6 - Si veda, per confronto: BERGAMASCHI A., *Cannobina, La Borromea e dintorni*, Alberti Libraio Editore - Verbania, 2011, p. 43.

Fig. 2.3-27 - Esempi di piloni votivi. a) Druggo; b) Pusala (Montecrestese).



2.3-27a



2.3-27b

Elementi naturali e coltivazioni

Corsi d'acqua

I corsi d'acqua sono rappresentati con linee continue che ne delimitano il contorno e con una campitura interna piena.

La direzione del flusso d'acqua è indicata con delle frecce ondulate il cui verso indica la discesa (Fig. 2.3-28). In ambito montano, spesso le rive dei corsi d'acqua sono scoscese o presentano scarpate, con un andamento irregolare e fortemente connotante il contesto.

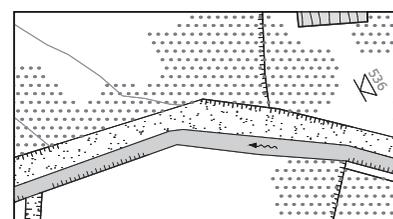


Fig. 2.3-28 - Simbolo rappresentante i corsi d'acqua.

Coperture arboree

La copertura arborea è un elemento di contesto che connota fortemente il territorio e l'intorno degli insediamenti alpini.

La sua rappresentazione avviene per mezzo di una campitura puntinata a disegno regolare (Fig. 2.3-29). Al fine di evitare l'intersezione di simboli diversi e facilitare la lettura delle informazioni, la campitura è omessa in corrispondenza delle vie di comunicazione, dei corsi d'acqua e degli edifici. Per le caratteristiche stesse della copertura arborea questa campitura avrà una estensione approssimativa; il simbolo non tiene conto dei confini tra proprietà, né della differenza tra il bosco "storicamente" presente in un ambiente e il bosco invasivo (sovrapposti, per esempio, sui campi terrazzati o sui pascoli dopo l'abbandono).

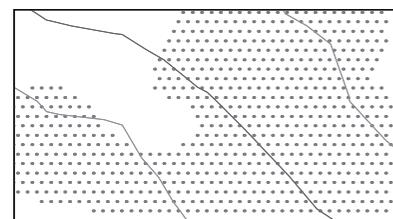


Fig. 2.3-29 - Simbolo rappresentante la copertura arborea.

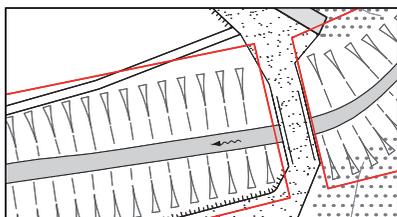


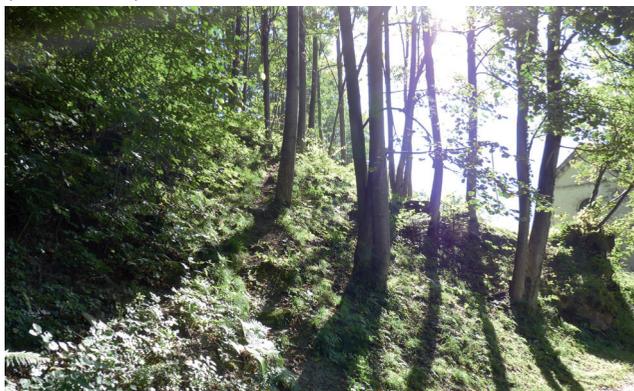
Fig. 2.3-30 - Simbolo indicante le scarpate.

Scarpate

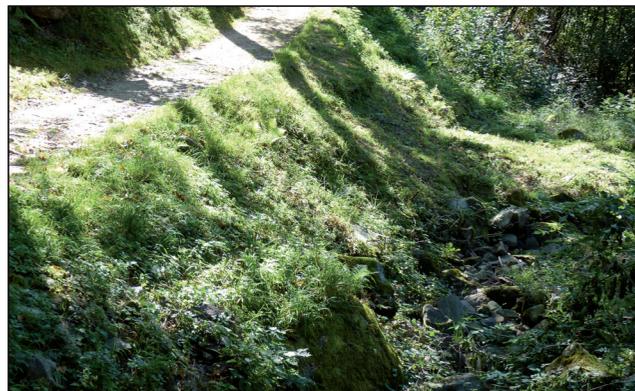
Il territorio alpino è spesso caratterizzato da brusche rotture del profilo topografico, dette scarpate. Esse possono essere di origine naturale oppure artificiale (dovute, per esempio, al taglio del pendio per opere stradali).

Le scarpate sono rappresentate con il simbolo mostrato in Fig. 2.3-30, in cui la base del triangolo è perpendicolare alla linea di massima pendenza e indica la zona a quota maggiore. Le dimensioni di sviluppo della scarpata sono pari, in scala, alla somma della lunghezza del triangolo e della relativa linea di prolungamento.

Fig. 2.3-31 - Esempi di scarpate a Veglio (Montecrestese).



2.3-31a



2.3-31b

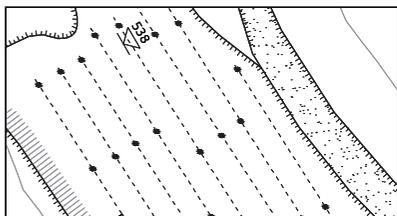


Fig. 2.3-32 - Simbolo indicante i vigneti.

Vigneti

L'agricoltura locale era spesso caratterizzata dalla presenza della vite, la quale ha fortemente connotato il paesaggio.

Il simbolo rappresentato in Fig. 2.3-32 raffigura il pergolato di supporto alla vite: i cerchi campiti indicano i pali verticali di sostegno all'impalcatura orizzontale; quest'ultima è invece raffigurata con delle linee tratteggiate.

Nel caso di vigneti in disuso, sono rappresentati unicamente i pali verticali.

Fig. 2.3-33 - a) Esempio di vigneto in uso situato a Naviledo (Montecrestese); b) Esempio di vigneto in disuso situato a Veglio (Montecrestese).



2.3-33a



2.3-33b

2.3.1.5 - Simbologia degli elementi edilizi

Coperture

Geometria del tetto

L'architettura montana locale è caratterizzata da sporti di gronda molto ridotti (talvolta quasi inesistenti, talvolta dell'ordine di 20-30 cm). Per questo motivo, è opportuno far coincidere la linea di gronda con quella raffigurante la muratura. I colmi, i displuvi e i compluvi sono indicati con linee a tratti corti; si tratta di una semplificazione grafica, in quanto tali linee, nella realtà, risultano essere irregolari o frutto di raccordi ad andamento curvilineo. Per facilitare la lettura della geometria del tetto, le falde sono rappresentate mediante campiture con linee aventi interassi differenti. Per convenzione, si assume che le falde esposte a sud e sud-est siano rappresentate con una campitura meno fitta rispetto a quella associata alle falde rivolte prevalentemente a nord. Per quanto riguarda le costruzioni aventi una falda singola, il senso di inclinazione può essere indicato con una freccia posta secondo la massima pendenza e il cui verso indica la discesa (Fig. 2.3-34).

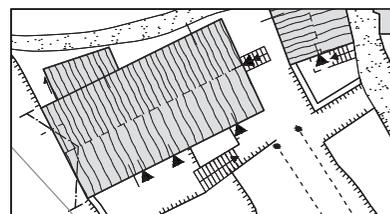


Fig. 2.3-34 - Simbolo rappresentante la geometria del tetto.

Fig. 2.3-35 - Esempi di tipiche geometrie di tetti di piode. a) Insediamento dell'Alpe Biscià; b) Edifici di Varzo; c) Edifici di Domodossola; d) Alpeggi di Craveggia.



2.3-35a



2.3-35b



2.3-35c



2.3-35d

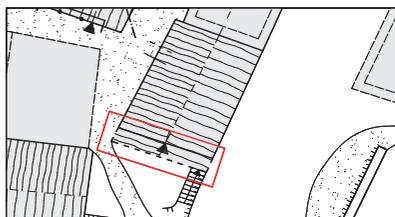


Fig. 2.3-36 - Simbolo rappresentante gli sporti della copertura.

Fig. 2.3-37 - Esempi di sporti. a) Sporto molto ridotto di un edificio situato a Naviledo (Montecrestese); b) Sporto di dimensioni maggiori di un edificio di Varzo.



2.3-37a



2.3-37b

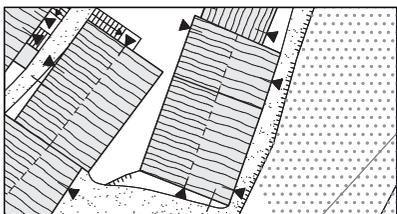


Fig. 2.3-38 - Simbolo rappresentante le coperture originali.

Fig. 2.3-39 - Esempi di coperture originali di pioede. a) Edifici di Varzo; b) Edificio situato nella zona degli alpeggi di Craveggia.



2.3-39a



2.3-39b

Sporti

Come accennato al punto precedente, nell'architettura alpina analizzata gli sporti sono solitamente dell'ordine di poche decine di centimetri e di conseguenza non sono rappresentati. Tuttavia talvolta sono di dimensioni maggiori al fine di proteggere sottostanti elementi edilizi distributivi (quali balconi, scale); in questi casi il profilo di gronda è indicato mediante una linea tratteggiata che delimita, per quel lato dell'edificio, l'area di campitura della falda (Fig 2.3-36).

Per chiarezza grafica gli elementi edilizi sottostanti allo sporto non sono rappresentati.

Coperture originali

Si tratta di coperture che al momento del rilievo non presentano segni di rifacimenti estesi.

Esse sono rappresentate con una linea continua spessa, indicante il perimetro della copertura; l'area interna, che coincide approssimativamente con la superficie in planimetria del tetto, è riempita con una campitura costituita da linee continue e irregolari, la cui direzione è parallela alla linea di massima pendenza delle falde (Fig. 2.3-38).

Coperture recuperate

Si tratta di coperture che hanno subito recenti interventi di parziale recupero o di intero rifacimento. In questo caso l'area di definizione delle falde di copertura del tetto è riempita con una campitura costituita da linee rette continue, poste parallelamente alla direzione della linea di massima pendenza.

La sostituzione del manto di pioda è frequentemente associata alla sostituzione dell'orditura lignea (anche se il mantenimento di una orditura originaria in buono stato di conservazione è da privilegiare).



2.3-41a



2.3-41b

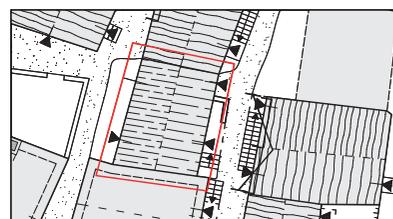


Fig. 2.3-40 - Simbolo delle coperture recuperate.

Fig. 2.3-41 - Esempi di coperture di pioda recuperate. a) Copertura di edificio situato a Domodossola; b) Edificio situato a San Carlo (Comune di Cevio, Svizzera).

Timpani aperti

Semplici

Negli edifici con il lato minore orientato verso sud, l'eventuale fienile è posto, solitamente, nel locale sottotetto. Per favorire la conservazione del fieno, il timpano è spesso lasciato aperto.

Sono ascritti alla categoria di timpani aperti semplici i timpani totalmente aperti o la cui parte laterale tamponata ha una misura molto contenuta (\leq dello spessore del muro). In caso di tamponamento di consistente larghezza, l'apertura è invece considerata una "grande apertura" (simbolo mostrato in Fig. 2.3-53b). Il simbolo da utilizzare per la rappresentazione dei timpani aperti semplici è riportato in Fig. 2.3-42.

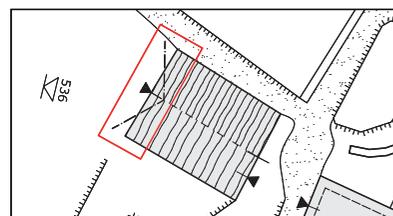
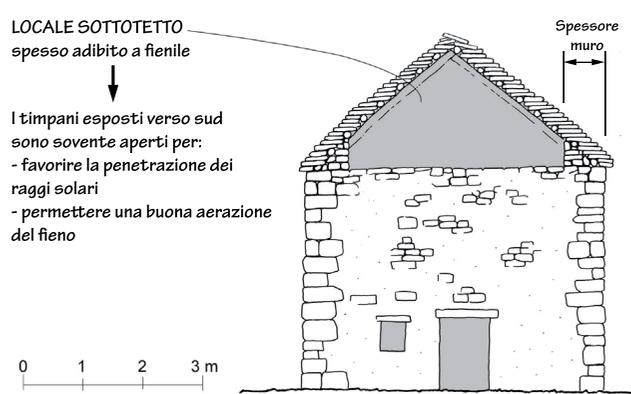


Fig. 2.3-42 - Simbolo dei timpani aperti semplici.

Fig. 2.3-43 - a) Esempio di timpano aperto semplice situato in val Vigezzo; b) Schema illustrante la geometria dei timpani aperti.



2.3-43a



2.3-43b

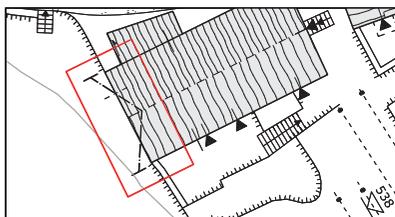


Fig. 2.3-44 - Simbolo rappresentante i timpani aperti estesi.

Fig. 2.3-45 - a) Timpano aperto esteso a Naviledo (Montecrestese); b) Schema del timpano aperto esteso.

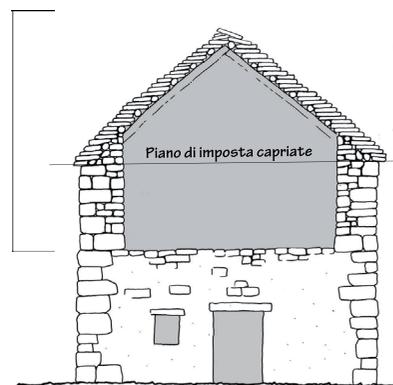


2.3-45a

AMBIENTE UNICO
spesso adibito a fienile

↓

Le capriate sono in vista
e il timpano aperto è
esteso fino al piano
inferiore rispetto al piano
di imposta della copertura



2.3-45b

Aperture

Ingressi

Per ingressi si intendono le aperture di accesso principale localizzate lungo il perimetro dell'edificio. Essi sono raffigurati con un simbolo formato da una linea e un triangolo posti in corrispondenza dell'asse dell'apertura (Fig. 2.3-46). A ogni ingresso corrisponde una sigla, la quale indica la destinazione d'uso del locale a cui si accede. Quando sono presenti più ingressi posizionati su piani diversi e con assi coincidenti, è indicato un solo simbolo corredato dalle sigle di ognuna delle funzioni. Quando un ingresso si trova in asse con una finestra è rappresentato solamente il simbolo dell'ingresso.

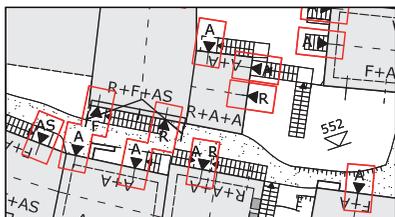


Fig. 2.3-46 - Simbolo degli ingressi.

Fig. 2.3-47 - Esempi di ingressi. a) Edificio dell'Alpe Piana in Val Vigezzo; b) edificio di Corippo (Canton Ticino).



2.3-47a



2.3-47b

Finestre

Le finestre sono rappresentate con una linea posta in corrispondenza dell'asse dell'apertura. Nel caso di finestre appartenenti al piano principale, l'asse è indicato con una linea continua, mentre in caso contrario la linea è tratteggiata. L'individuazione del piano principale è basata su una gerarchia data dall'importanza funzionale delle originarie destinazioni d'uso. L'ordine gerarchico è il seguente: abitazione, forno, stalla, *astic*, fienile e deposito. Per maggiore chiarezza grafica, le finestre poste su livelli diversi con assi lievemente sfalsati, sono indicati con un unico asse. Le porte che non costituiscono un ingresso principale (porte di accesso ai balconi, ecc.) sono rappresentate come le finestre.



2.3-49a



2.3-49b



Fig. 2.3-48 - Simbolo delle finestre principali (rappresentate con una linea continua) e secondarie (linea tratteggiata).

Fig. 2.3-49 - Esempi di finestre di edifici situati a Veglio (Montecrestese).

Astic

Si è in presenza di un *astic* quando la costruzione di pietra ha “un lato lungo aperto al piano superiore con pilastri e travi di legno a vista. L'*astic* forniva uno spazio coperto, per seccare le granaglie e le foglie d'alloro per i letti, più ampio delle balconate e dei timpani aperti negli edifici con il colmo orientato nord sud”.⁷ Gli *astic* sono indicati con il simbolo mostrato in fig. 2.4-50. I due tratti trasversali al perimetro dell'edificio rappresentano la muratura che delimita in larghezza l'apertura, mentre i cerchi rappresentano i montanti verticali di legno.

Nota 2.4-7 - G.A.L. Laghi e Monti del Verbano Cusio e Ossola s.c.a.r.l., *Studio per la realizzazione degli interventi di restauro e di valorizzazione sul patrimonio locale. Manuale per il recupero architettonico*, Domodossola, 2013, p. 44.



Fig. 2.3-50 - Simbolo degli *astic*.

Fig. 2.3-51 - Esempi di *astic* situati a Veglio (Montecrestese).



2.3-51a



2.3-51b



Fig. 2.3-52 - Simbolo delle grandi aperture.

Fig. 2.3-53 - Esempio di grande apertura in un edificio di Pontetto (Montecrestese); b) Schema illustrativo della geometria delle grandi aperture.



2.3-53a

CLASSIFICAZIONE APERTURE

FINESTRA

$l_{\text{apertura}} < 1,20 \text{ m}$

$l_{\text{tamponamento}} > \text{spessore muro}$

GRANDE APERTURA

$l_{\text{apertura}} > 1,20 \text{ m}$

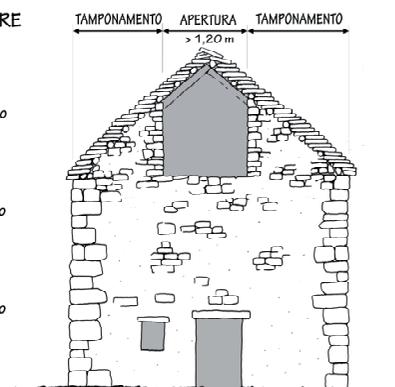
$l_{\text{tamponamento}} > \text{spessore muro}$

TIMPANO

$l_{\text{apertura}} > 1,20 \text{ m}$

$l_{\text{tamponamento}} \leq \text{spessore muro}$

0 1 2 3 m



2.3-53b



Fig. 2.3-54 - Simbolo dei timpani aperti ad arco.

Fig. 2.3-55 - Esempi di grandi aperture ad arco situate a Roledo (comune di Montecrestese).



2.3-55a

Grandi aperture ad arco

Si tratta di un caso particolare di grande apertura, che si contraddistingue per un arco di muratura che la sovrasta. Le grandi aperture ad arco sono elementi di forte peculiarità nell'architettura analizzata. Per tale ragione, è utilizzato un simbolo specifico caratterizzato dalla presenza di una linea ad arco (Fig. 2.3-54).

Quando l'apertura ad arco presenta una larghezza inferiore a 1.20 m circa, come nel caso precedente, essa è considerata una finestra e viene indicata con il simbolo riportato in Fig. 2.3-48; è conseguentemente omessa l'informazione relativa alla presenza dell'arco.



2.3-55b

Bifore, trifore e quadrifore

Gli edifici a destinazione abitativa sono talvolta caratterizzati da facciate vivacizzate da bifore, trifore o quadrifore.

Le bifore sono rappresentate con il simbolo mostrato in Fig. 2.3-56, dove i tratti perpendicolari alla linea di facciata indicano la mezzeria dell'apertura. Trifore e quadrifore si ottengono aggiungendo un numero di elementi pari al numero di finestre.

La rappresentazione di tali elementi rimane invariata indipendentemente dall'appartenenza o meno al piano principale.

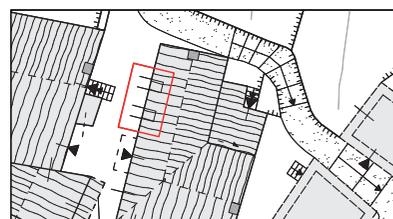


Fig. 2.3-56 - Simbolo delle bifore.

Fig. 2.3-57 - a) Esempio di quadrifora situato a Santa Maria Maggiore; b) Esempio di trifora situato a Vanzone.



2.3-57a



2.3-57b

Logge

Le facciate di alcuni edifici a destinazione prevalentemente residenziale sono arricchite con delle aperture a loggia, poste in genere all'ultimo piano e delimitate da archi e colonnine di pietra.

“Le aperture di logge poste agli ultimi piani degli edifici sono indicate con simboli trasversali analoghi alle note musicali” (Norma UNI 7310:1974). Il simbolo è riportato in Fig. 2.3-58.

Poichè il prospetto degli edifici è maggiormente connotato dalle logge rispetto alle aperture interne, quest'ultime non sono rappresentate.



Fig. 2.3-58 - Simbolo delle logge.

Fig. 2.3-59 - Esempi di logge. a) Edificio di Craveggia; b) Edificio di Domodossola.



2.3-59a



2.3-59b

Balconi e lobbie



Fig. 2.3-60 - Simbolo dei balconi.

Balconi

Gli edifici presentano dei balconi realizzati con mensole e lastre di pietra o di legno e ringhiere, montanti e catene di collegamento di ferro battuto.

I balconi sono rappresentati con una linea tratteggiata che ne individua il contorno (Fig. 2.3-60). La loro rappresentazione è omessa nel caso in cui essi siano sovrastati da uno sporto di larghezza analoga o superiore.

Fig. 2.3-61 - Esempi di balconi di edifici.

a) Pontetto (Montecrestese); b) Domodossola.



2.3-61a



2.3-61b



Fig. 2.3-62 - Simbolo delle pareti attrezzate.

Pareti attrezzate o lobbie

“Le pareti attrezzate sono ballatoi collegati fra loro da montanti verticali sovente estesi fino agli spioventi del tetto e destinate a consentire lo sfruttamento, per tutto il fronte della costruzione e con una moltiplicazione in verticale, di spazi particolarmente protetti e ben esposti per la conservazione ed essiccazione dei prodotti agricoli, dei prodotti forestali, ecc”.⁸ Le pareti attrezzate sono indicate con una linea intervallata da quadrati (i quali hanno uno scopo puramente simbolico e non coincidono necessariamente con i singoli montanti).

Fig. 2.3-63 - Esempi di pareti attrezzate. a) Edificio situato a San Carlo; b) Edificio situato a Varzo.

Nota 2.4-8 - MELLANO F., MORRA L., NELVA R., *cit.*



2.3-63a



2.3-63b

Camini e comignoli

Comignoli semplici

Per comignoli semplici si intendono tutti i comignoli che non presentano particolari peculiarità in termini architettonici, artistici o di dimensioni e che non sovrastano la zona fuoco.

Essi vengono indicati con un quadrato riempito con una campitura grigia (Fig. 2.3-64). Il simbolo, avendo forma e dimensioni simboliche, non fornisce informazioni circa la geometria, la tipologia e l'orientamento del comignolo.



2.3-65a



2.3-65b

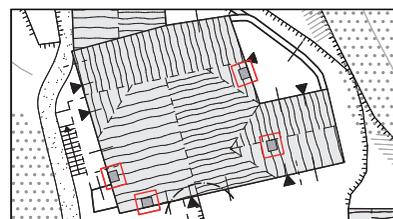


Fig. 2.3-64 - Simbolo rappresentante i comignoli semplici.

Fig. 2.3-65 - Esempi di comignoli semplici in val Vigizzo.

Comignoli "monumentali"

Gli edifici tradizionali sono talvolta fortemente connotati dai comignoli che, per particolari peculiarità architettoniche, assumono una grande incidenza percettiva.

Sono indicati con questo aggettivo i comignoli con una o più delle seguenti caratteristiche: grandi dimensioni, elevata altezza di spicco rispetto al manto di copertura, particolari soluzioni costruttive, caratteri formali e decorativi ricercati, per esempio.

Essi sono rappresentati con il simbolo mostrato in Fig. 2.3-66.



2.3-67a



2.3-67b

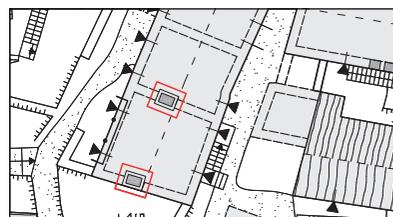


Fig. 2.3-66 - Simbolo dei comignoli "monumentali".

Fig. 2.3-67 - Esempi di comignoli "monumentali" a Craveggia.

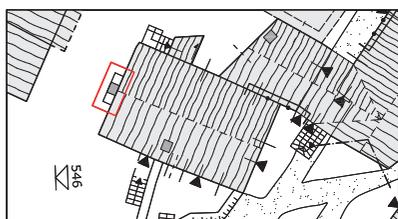


Fig. 2.3-68 - Simbolo dei camini abitabili.

Camini abitabili

Per camino abitabile si intende un “grande camino che sovrasta l’appendice sporgente della cucina, destinata alla zona fuoco”.⁹ Come mostrato in Fig. 2.3-68, tale elemento edilizio è indicato con un rettangolo (coincidente con l’impronta a terra del camino abitabile), al cui interno è presente un quadrato con campitura grigia (rappresentante la proiezione in pianta della canna fumaria).

Fig. 2.3-69 - Esempi di comignoli abitabili.
a) Bei (Bognanico); b) Naviledo (Montecrestese).



2.3-69a



2.3-69b

Nota 2.4-9 - DEMATTEIS L., 1985, *Case contadine nelle valli dell’Ossola*, Cusio e Verbano, Priuli & Verlucca, 2005, p. 71.

Scale esterne



Fig. 2.3-70 - Simbolo rappresentante le scale esterne semplici.

Scale semplici

Le scale esterne semplici sono elementi che connotano fortemente l’aspetto delle costruzioni alpine tradizionali dell’area in esame. Si tratta di scale di collegamento realizzate all’esterno del volume dell’edificio. Esse possono essere strutture autonome rispetto al corpo dell’edificio, oppure essere realizzate con elementi monolitici incastrati nella muratura. La loro presenza è indicata con il simbolo mostrato in Fig. 2.3-70; la larghezza della rampa e il numero di gradini sono puramente simbolici. Il senso di salita è indicato col verso di una freccia posta in mezzzeria.

Fig. 2.3-71 - Esempi di scale esterne semplici.
a) a Bannio; b) a Pontetto (Montecrestese).



2.3-71a



2.3-71b

Scale con passaggio sottostante

Si tratta di scale di collegamento esterne agli edifici, che, a differenza del caso mostrato in precedenza, si caratterizzano per la struttura realizzata in modo tale da permettere il sottostante passaggio di persone (o anche di animali).

In questo caso la rappresentazione è analoga a quella delle scale semplici, ma con linee tratteggiate, così da evidenziare la continuità del passaggio sottostante. Se il passaggio fa parte di una via di comunicazione è inoltre presente la relativa campitura a punti irregolari (Fig.2.3-72).



Fig. 2.3-72 - Simbolo delle scale esterne con passaggio sottostante.

Fig. 2.3-73 - Esempi di scale esterne con passaggio sottostante situate a Montecrestese.

a) frazione di Veglio; b) frazione di Naviledo.



2.3-73a



2.3-73b

Tetto scala

I tetti scala, pur non essendo largamente diffusi, rappresentano una peculiarità dell'architettura locale.

Si è in presenza di un tetto scala quando la scala di collegamento tra il piano terra e un piano superiore funge contemporaneamente da manto di copertura per un altro locale.

Esso è rappresentato dalla sovrapposizione del simbolo del tetto e di quello delle scale semplici (omettendo, per maggiore chiarezza grafica, le linee di delimitazione laterali).



Fig. 2.3-74 - Simbolo delle scale esterne con passaggio sottostante.

Fig. 2.3-75 - a) Tetto scala a Naviledo (Montecrestese); b) Tetto a Veglio (Montecrestese), il quale, precedentemente alla tamponatura dell'ingresso, fungeva da tetto scala.



2.3-75a



2.3-75b

Nota 2.4-10 - Classificazione tratta da: MEL-
LANO F., MORRA L., NELVA R., cit.

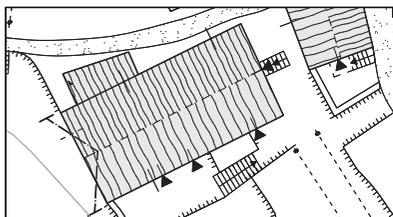


Fig. 2.3-76 - Insieme di simboli indicanti gli edifici integri.

Fig. 2.3-77 - Esempi di edifici integri. a) Edificio dell'Alpe Buscain; b) Edificio situato sugli alpeggi di Craveggia.



2.3-77a



2.3-77b



Fig. 2.3-78 - Simbolo indicante gli edifici privi di copertura.

Fig. 2.3-79 - Edifici privi di copertura a Veglio.



2.3-79a



2.3-79b

Stato di conservazione degli edifici¹⁰

Edifici integri

Si considerano “integri” gli edifici in buono stato di conservazione o che presentano danneggiamenti ai setti murari di modesta entità. Inoltre, condizione necessaria per poter ascrivere un edificio a questa categoria è la presenza della copertura al momento del rilievo.

Essi sono raffigurati con una linea continua che rappresenta il perimetro esterno dell'impronta a terra (Fig. 2.3-76).

Come già accennato, tale perimetro delimita la campitura del manto di copertura a meno che lo sporto sia di dimensioni consistenti.

Edifici privi di copertura

Gli edifici che, pur presentando murature pressoché intatte, sono privi di copertura, sono raffigurati con una linea continua che definisce il perimetro esterno dell'edificio e una linea tratteggiata che individua il perimetro degli ambienti interni. Inoltre, pur non essendo presente la copertura, è rappresentata la linea di colmo in modo tale da fornire indicazioni relative all'andamento delle falde (Fig. 2.3-78).

Edifici diroccati

Si intendono diroccati gli edifici con crolli di murature d'ambito o di controvento più o meno estesi, ove gli ingressi e le aperture non sono sempre chiaramente identificabili. In genere, sono edifici privi di copertura, al più con qualche elemento di orditura ancora in opera.

Il simbolo che li rappresenta è una doppia linea tratteggiata (Fig. 2.3-80).



2.3-81

Edifici scomparsi o di cui esistono solo le fondamenta

Nel caso in cui l'edificio sia completamente distrutto o ne restino soltanto le fondamenta, l'ipotetica traccia dell'edificio è rappresentata con una linea tratteggiata (Fig. 2.3-82).



2.3-83

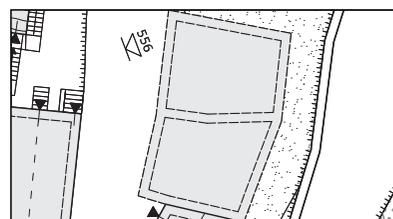


Fig. 2.3-80 - Simbolo indicante gli edifici diroccati.

Fig. 2.3-81 - Esempio di edificio diroccato a Veglio (comune di Montecrestese).



Fig. 2.3-82 - Simbolo degli edifici scomparsi o di cui esistono solo più le fondamenta.

Fig. 2.3-83 - Esempio di edificio di cui esistono solo più le fondamenta a Veglio (comune di Montecrestese).

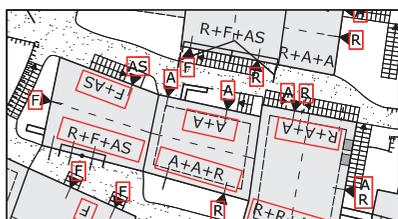


Fig. 2.3-84 - Simboli indicanti le destinazioni d'uso.

Indicazioni destinazioni d'uso e numero di piani

La destinazione d'uso degli ambienti a cui è possibile accedere dall'esterno è segnato vicino al simbolo dell'ingresso secondo la seguente convenzione:

A= abitazione	As= astic
F= fienile	D= deposito
S= stalla	T= torchio
FR= forno	C= cappella

L'insieme delle funzioni presenti negli edifici è inoltre indicato, con le medesime lettere, all'interno della geometria del tetto, parallelamente alla linea di gronda. Per ciascun piano è dichiarata la destinazione d'uso preponderante. L'ordine con cui vengono indicate le funzioni corrisponde alla loro posizione in altimetria (dal piano più basso a quello più alto); il numero di piani è di conseguenza desumibile dal numero di funzioni indicate (Fig. 2.3-84).

Fig. 2.3-85 - Vista della cappella e del territorio circostante a Veglio (Montecrestese).



2.3.1.6 - Rilievo diretto

Il rilievo diretto consiste in una serie di azioni condotte durante un sopralluogo; sul posto il professionista annota gli elementi che caratterizzano gli edifici e il loro contesto secondo la simbologia precedentemente definita. Egli dovrà dunque preferibilmente essere munito di una base cartografica dell'insediamento alpino di interesse, stampata ad una scala di rappresentazione tale da permettere una chiara e agevole assunzione di informazioni. Inoltre è consigliabile scattare una serie di fotografie a supporto del rilievo grafico, in modo da facilitare la successiva fase di restituzione.



2.3-86

Fig. 2.3-86 - Momento di rilievo diretto presso Veglio (Montecrestese).

2.3.1.7 - Fase di restituzione e di analisi critica

Si tratta del momento di sintesi, in cui le annotazioni prese durante il rilievo diretto sono restituite in un documento il più possibile chiaro, esaustivo e agevolmente leggibile. Il supporto informatico più diffuso per questa fase è il disegno CAD, ma il professionista è libero di scegliere altri strumenti quali, per esempio, la restituzione a mano libera o per mezzo di database informativi (il GIS per esempio). La scelta del mezzo, ovviamente, può condizionare la successiva trasmissione del documento o il suo inserimento in basi di dati

La restituzione e la successiva analisi critica sono fasi che rivestono una particolare importanza: esse permettono ai professionisti di indivi-

duare gli aspetti più significativi dell'insediamento alpino studiato e, di conseguenza, di delineare dei criteri di intervento consoni.

Seguono due esempi di rilievo a scala urbana eseguiti dal gruppo di lavoro Interreg-AlpStone. Entrambi rappresentano l'insediamento di Veglio (frazione di Montecrestese), tipica borgata rurale della val d'Ossola. Veglio è infatti un villaggio nato presumibilmente nel XV secolo in cui sono presenti tradizionali costruzioni di pietra. Oggi tuttavia la borgata è prevalentemente in stato di degrado a causa dell'abbandono, avvenuto in prevalenza tra gli Anni '50 e '60 del secolo scorso, da parte degli abitanti. L'auspicabile recupero dovrebbe dunque tenere conto tanto della geometria e dei caratteri connotanti degli edifici tradizionali, quanto della storia e degli originari significati che ogni manufatto rivestiva.

Gli elaborati che seguono si differenziano per gli aspetti che vogliono sottolineare: mentre il primo intende analizzare soprattutto gli aspetti geometrici e le peculiarità architettoniche degli edifici e del loro contesto, il secondo si caratterizza per il rilievo delle originarie destinazioni d'uso degli ambienti.

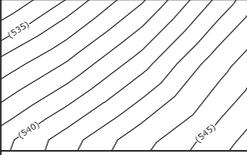
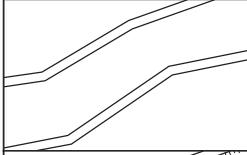
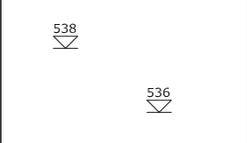
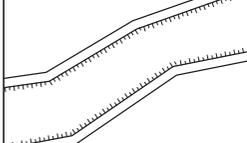
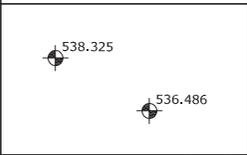
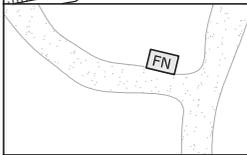
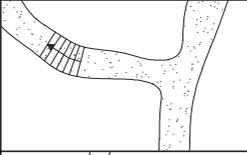
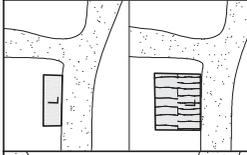
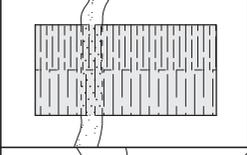
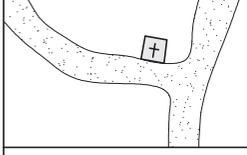
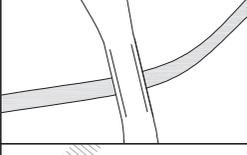
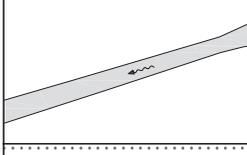
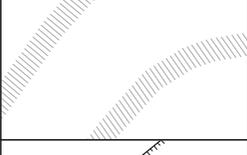
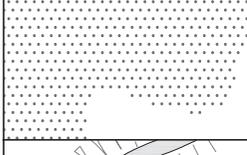
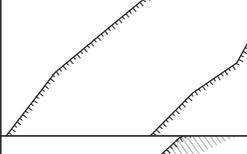
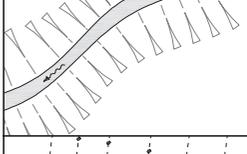
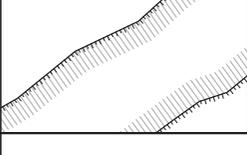
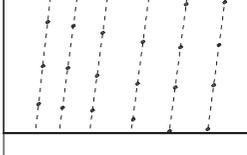
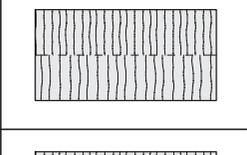
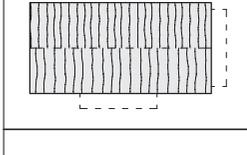
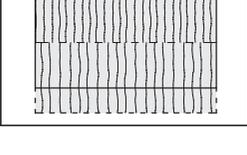
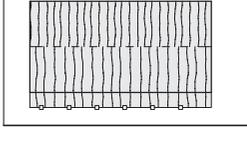
Manca il rilievo filologico-congetturale relativo ai modi di aggregazione delle cellule edilizie. La lettura delle stratificazioni storiche e della successione degli eventi di trasformazione edilizia è ancora in corso e sarà terminata oltre la scadenza temporale data dal progetto Interreg-AlpStone.





Fig. 2.3-87 - Rilievo diretto dell'insediamento alpino di Veglio (Montcrestese)

TABELLA RIASSUNTIVA DELLA SIMBOLOGIA

	INDICAZIONI ALTIMETRICHE CON CURVE DI LIVELLO		MURO DI CINTA	
	INDICAZIONI ALTIMETRICHE PUNTUALI DELLE CURVE DI LIVELLO		MURO DI CINTA CONTRO TERRA	
	INDICAZIONI ALTIMETRICHE PUNTUALI		FONTANA	
	STRADA PEDONALE, MULATTIERA, CARRARECCIA		LAVATOIO E ABBEVERATOIO	
	PASSAGGI		PILONE VOTIVO	
	PONTE		CORSI D'ACQUA	
	CIGLIONE		COPERTURA ARBOREA	
	MURO DI TERRAZZAMENTO SEMPLICE		SCARPATA	
	MURO DI TERRAZZAMENTO CON LIMAT E PIEDE		VIGNETI	
	GEOMETRIA DEL TETTO		BALCONI	
	SPORTI		PARETI ATTREZZATE O LOBBIE	

	COPERTURE ORIGINALI			COMIGNOLI SEMPLICI	
	COPERTURE RECUPERATE			COMIGNOLI "MONUMENTALI"	
	TIMPANI APERTI SEMPLICI			CAMINI ABITABILI	
	TIMPANI APERTI ESTESI			SCALE ESTERNE SEMPLICI	
	INGRESSI			SCALE ESTERNE CON PASSAGGIO SOTTOSTANTE	
	FINESTRE			TETTO SCALA	
	ASTIC			EDIFICI INTEGRI	
	GRANDI APERTURE SEMPLICI			EDIFICI PRIVI DI COPERTURA	
	GRANDI APERTURE AD ARCO			EDIFICI DIROCCATI	
	BIFORE			EDIFICI SCOMPARI O DI CUI ESISTONO SOLO LE FONDAMENTA	
	LOGGE			DESTINAZIONE D'USO E NUMERO DI PIANI	<ul style="list-style-type: none"> A Abitazione S Stalla AS Astic D Deposito F Fienile FR Forno C Cappella

BIBLIOGRAFIA Cap. 2.3

- BERGAMASCHI A., *Cannobina, La Borromea e dintorni*, Alberti Libraio Editore, Verbania, 2011
- CONTI G. M., ONETO G., *Paesaggio di Pietra, Alberi e Colore. L'architettura tradizionale nel Verbano-Cusio-Ossola*, Alberti Libraio Editore, Verbania 2008
- DEMATTEIS L., 1985, *Case contadine nelle valli dell'Ossola*, Cusio e Verbano, Priuli & Verlucca, 2005
- EL-HAKIM S., BERALDIN J.A., BLAIS F., *A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-D vision systems*, in E.A. Fedosov (ed.), SPIE Proceedings, Conference on Digital Photogrammetry and Remote Sensing, 2646, St. Petersburg, 1995
- G.A.L. Laghi e monti del Verbano Cusio e Ossola s.c.a.r.l., *Studio per la realizzazione degli interventi di restauro e di valorizzazione sul patrimonio locale. Manuale per il recupero architettonico*, Domodossola, 2013
- MELLANO, F., MORRA, L., NELVA, R., *Proposta di simbologia convenzionale dalla cartografia di aggregati montani*. In: Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia, Torino, 1973
- SCARAMELLINI G., VAROTTO M., *Paesaggi terrazzati dell'arco alpino*, Marsilio, 2008

2.4 - IL RILIEVO METRICO DEI TESSUTI EDIFICATI

ISABELLA BIANCO, ANDREA MARIA LINGUA, PAOLO PIUMATTI

2.4.1 - Nozioni circa il rilevamento metrico

Le tecniche di rilevamento metrico sono richieste per determinare informazioni che devono essere verificabili e ripetibili. Nell'ambito di una attività di rilevamento metrico possono essere individuati 3 aspetti fondamentali in termini di qualità del rilievo:

- le caratteristiche della misura;
- il tipo di contenuto;
- il livello di dettaglio.

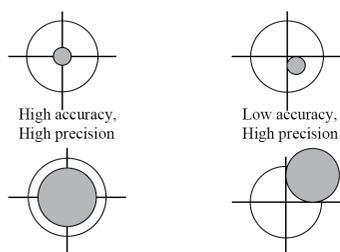
2.4.1.1 - Le caratteristiche della misura

Accuratezza e precisione sono spesso usati per descrivere quanto sia buona una misura, una posizione o una coordinata. Una distinzione importante deve essere svolta tra accuratezza e precisione. L'*accuratezza* è il grado di vicinanza di osservazioni di una grandezza rispetto al valore reale della grandezza. Viene considerata alta quando il valore stimato è molto vicino al valore teorico, bassa quando il valore stimato è distante dal valore vero.

Viene determinata mediante comparazione tra le osservazioni e il loro valore "vero" determinato con osservazioni dotate di accuratezza intrinseca molto più elevata. In questo modo, l'accuratezza si esprime mediante il valore RMSE (*Root Mean Square Error*) ovvero la radice quadrata della media di un insieme di differenze al quadrato tra l'insieme delle coordinate stimate e il valore corrispondente per gli stessi punti determinato con una sorgente indipendente avente un'accuratezza molto più alta. Le cause di bassa accuratezza sono spesso imputabili alla presenza, nelle osservazioni della grandezza, di errori sistematici e/o grossolani, che comportano una distorsione della media stimata. Essa definisce un indice di qualità oggettivo indipendente dalle osservazioni effettuate.

La *precisione* è il grado di vicinanza delle osservazioni di una grandezza rispetto alla loro media stimata. Viene considerata alta quando le osservazioni sono concentrate nell'intorno della media stimata, bassa quando le osservazioni sono distribuite intorno alla media stimata in modo molto più ampio. Può essere anche considerata un indice di consistenza sulla ripetizione delle misure, ovvero un indice di qualità interno in quanto legato alle stesse misure della grandezza. L'indicatore della precisione più comunemente utilizzato è la deviazione standard o scarto quadratico medio (sqm) in genere indicato σ .

Fig. 2.4-1 - Accuratezza e precisione.



2.4-1

La Fig. 2.4-1 illustra le varie relazioni tra questi due parametri: il valore vero della grandezza misurata è posto nell'intersezione della croce, l'area grigia indica l'involuppo delle osservazioni della grandezza, il centro dell'area grigia corrisponde al valore stimato (misurato) della grandezza, il raggio dell'area grigia è una misura dell'incertezza della stima (precisione) riconducibile ad una funzione dello sqm. In assenza di errori grossolani e sistematici, l'accuratezza e la precisione coincidono.

2.4.1.2 - Precisione e tolleranza di un rilievo

La *precisione* di una operazione di rilievo deve garantire la ripetibilità entro valori commisurati con la scala prevista di rappresentazione. Il confronto si attua immaginando di confrontare i punti rilevati con analoghi punti di controllo determinati mediante tecnica di un ordine di grandezza più precisa (ovvero tale da esprimere sostanzialmente il valore vero) determinandone la distanza. Tale distanza deve soddisfare un valore legato al disegno al tratto dell'oggetto. Dato l'errore di graficismo pari a 0.2 mm alla scala della rappresentazione 1: n la precisione può essere espressa mediante lo scarto quadratico medio (sqm, σ) pari a:

$$\sigma = 0.2 \cdot n$$

Ammettendo che almeno il 95 % delle differenze determinate tra punti di rilievo e punti di controllo debba essere inferiore a una soglia di confronto, si può affermare che la *tolleranza* (al 95%) è pari a 2 volte lo sqm:

$$T = 2 \cdot \sigma = 0.4 \cdot n$$

Scala	Precisione σ [mm]	Tolleranza al 95% T [mm]
1:500	100	200
1:200	40	80
1:100	20	40
1:50	10	20
1:20	4	8
1:10	2	4

Tabella 2.4-1 - Scala di rappresentazione e tolleranza.

2.4.1.3 Il livello di dettaglio

L'efficacia di una operazione di misura si esprime in funzione del minimo dettaglio che deve essere rappresentato.

Da non confondere con precisione/accuratezza, la *risoluzione* o densità di punti è la più piccola variazione della grandezza da misurare che può essere letta da uno strumento di misura. E' ovvio che questa densità può essere aumentata e diminuita in funzione della geometria dell'oggetto del rilievo.

Le tecniche indirette di acquisizione dati (particolarmente la scansione laser) devono soddisfare in fase di acquisizione una densità di cattura che deve garantire la possibilità di rilevare correttamente la dimensione dell'oggetto minimo da registrare.

Non è possibile mantenere costante la densità su tutto l'oggetto durante il rilievo, ma si deve cercare di mantenerla il più regolare possibile. E' necessario fissare la minima densità richiesta, anche in fase di appalto. La scelta della minima densità di rilievo si può attuare mediante la relazione seguente:

$$Q=1-m/\lambda$$

dove:

- Q è la qualità del dato espressa in percentuale (%);
- m è la densità di punti, ovvero la minima distanza tra i punti di rilievo;
- λ è la dimensione del minimo dettaglio richiesto.

Per esempio:

- Se la densità di punti è 10 mm e devo rilevare le giunte dei mattoni (5 mm) :

$$Q=1-10/5=-1 \text{ (ovvero qualità insufficiente)}$$

- Se uso una densità di acquisizione di 5 mm: $Q = 0$ (ovvero qualità nulla)
- Se uso una densità di 2 mm si ottiene $Q = 0.60$ indica che il 60 % delle giunzioni saranno individuate correttamente.

In analogia, è possibile utilizzare la seguente tabella che fornisce alcuni parametri riassuntivi medi:

Scala	Densità delle nuvole di punti [mm]	Densità della restituzione [mm]	Densità del rilievo diretto
1:500	75	75-750	0.1-1.5m (max 10 m)
1:200	30	30-300	50-600 mm (max 5m)
1:100	15	15-100	20-200 mm (max 3 m)
1:50	5	5-50	10-100 mm (max 2 m)
1:20	3	3-30	5-60 mm (max 1 m)
1:10	1	1-15	2-30 (max 0.5 m)

Tabella 2.4-2 - La densità di punti rilevati e rappresentati.

2.4.2.4 - Il tipo di contenuto

Una operazione di misura può generare 3 tipologie di contenuto metrico:

- 2D (bidimensionale) in cui vengono descritti gli elementi caratteristici proiettati su un piano di riferimento. Ogni vertice descrittivo viene memorizzato nelle sole due coordinate (X,Y) (planimetriche) oltre alla relativa codifica;
- plano-altimetrico, del tutto analogo alla cartografia tradizionale. Anche in questo caso gli elementi caratteristici sono descritti mediante la loro proiezione su un piano di riferimento e ogni vertice viene nelle sole due coordinate (X,Y) (planimetriche). In aggiunta sono presenti informazioni supplementari specifiche (per es. punti quotati e curve di livello) che sono rappresentate in 3D (X, Y, Z);
- 3D in cui tutti gli elementi caratteristici vengono descritti mediante punti tridimensionali ovvero memorizzati mediante le 3 coordinate (X, Y, Z).

Nel caso di rilevamento mediante scansione laser o tecnica fotogrammetrica le informazioni estratte dal rilievo e dalla sua elaborazione sono sempre tridimensionali. Possono essere trasformate in bidimensionali per permetterne una più efficace rappresentazione.

2.4.1.5 - Sistema di riferimento

Un sistema di riferimento (SR) è un insieme di regole e misure per la determinazione della posizione spazio-temporale di un qualsiasi punto sulla Terra¹.

Nel corso degli anni diversi ellissoidi sono stati definiti e utilizzati come sistemi di riferimento, da ogni nazione o gruppo di nazioni che preferiva definire un ellissoide locale in modo che, nella zona considerata fosse più vicino al geoide. La nascita del GPS (Global Positioning System) ha portato all'affermazione di un ellissoide comune per tutto il mondo (World Geodetic System 1984, WGS84) con centro localizzato nel baricentro della Terra e asse minore diretto secondo l'asse di rotazione terrestre.

Il sistema di posizionamento GPS (satelliti e rete di ricevitori permanenti sulla superficie terrestre) permette, assieme ad altre tecniche geodetiche, di definire e adattare i sistemi di riferimento nel tempo, seguendo, ad esempio, i movimenti della deriva delle placche continentali. Per questo motivo i sistemi di riferimento che li utilizzano sono detti "dinamici". Il sistema dinamico legato alla placca europea (cioè che trascura gli spostamenti di tale placca relativamente agli altri continenti minimizzando le deformazioni nel breve termine) è l'ETRF (European Terrestrial Reference Frame), periodicamente aggiornato.

Per poter essere rappresentata nelle mappe, la superficie dell'ellissoide viene proiettata su superfici che possono essere sviluppate sul piano secondo diverse modalità tra cui la rappresentazione conforme.

Nota 2.4-1 -La Terra somiglia molto a una sfera, ma in realtà non lo è e considerarla tale porta a un'approssimazione che in alcuni casi è accettabile, ma in altri risulta troppo grossolana. I geodeti infatti assumono come superficie matematica della Terra il geoide, ovvero la superficie perpendicolare alle linee di forza del campo di gravità terrestre, passante per un determinato punto fisico costituito in genere dal livello medio del mare mediante le misure dei mareografi. Nonostante il geoide abbia un preciso significato fisico, ha una forma complessa piena di gobbe e non può pertanto essere utilizzato come superficie di riferimento per la rappresentazione cartografica della Terra (vedi Fig. 2), operazione che richiede l'utilizzo di una superficie regolare, geometricamente nota e esprimibile in modo semplice, come per esempio un ellissoide di rotazione (Fig. 2 in grigio). Per definire la forma dell'ellissoide si utilizzano alcuni parametri fondamentali come il semiasse maggiore (a, equatoriale) e il semiasse minore (c, polare).

Basata sulla carta di Gauss, viene denominata internazionalmente Universal Transverse Mercatore (UTM) ed è interpretabile geometricamente mediante una proiezione dell'ellissoide a partire dal centro della Terra stessa su un cilindro tangente ad un meridiano (Fig. 3a). Questo sistema di rappresentazione suddivide la Terra in 60 fusi di ampiezza pari a 6° di longitudine numerati in senso antiorario a partire dall'anti-meridiano di Greenwich. L'Italia è compresa nei fusi 32, 33 e 34 (penisola salentina), ma l'area di studio è situata nel fuso 32 (Fig. 3b).

La direttiva europea INSPIRE

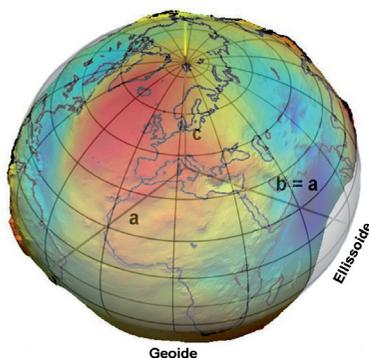
INSPIRE (<http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm>) è una direttiva dell'Unione Europea, in atto dal 2007, che ha come obiettivo la definizione di regole e linee guida comuni per costruire un'infrastruttura affinché i dati cartografici europei possano essere facilmente scambiati, condivisi e armonizzati. Questo dovrebbe essere la corretta premessa per la conduzione di politiche territoriali e ambientali comuni.

I mezzi previsti sono principalmente un Geoportale attraverso cui accedere ai dati cartografici degli Stati membri e una serie di norme da seguire nella redazione dei nuovi prodotti:

- un sistema di riferimento comune;
- i formati di memorizzazione dei metadati
- un modello concettuale di riferimento per la produzione di cartografia numerica
- requisiti e accesso ai servizi di rete per la condivisione.

Queste stesse regole sono da seguire per l'armonizzazione tra i prodotti cartografici nazionali.

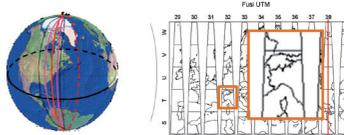
INSPIRE è stata adottata in Italia mediante il Decreto 10 novembre 2011 "Adozione del Sistema di riferimento geodetico nazionale", in cui si stabilisce che il sistema di riferimento geodetico nazionale italiano è costituito dalla realizzazione ETRF 2000, basato sull'ellissoide IAG GRS80 ottenuta da IGM (Istituto Geografico Militare) nella Rete Dinamica Nazionale (rete di stazioni GPS che ricevono segnali in modo permanente). La rappresentazione cartografica è la rappresentazione UTM.



2.4-2

Fig. 2.4-2 - Sistemi di riferimento per la Terra: il geoide e l'ellissoide.

Fig. 2.4-3 (a, b) - La rappresentazione conforme UTM.



2.4-3

Sistemi di coordinate locali

Le operazioni di rilievo metrico degli edifici e dei beni culturali inquadri sul territorio richiede la definizione di coordinate tridimensionali che devono essere espresse in uno specifico sistema di coordinate. Questo sistema di coordinate deve essere stabile nel tempo e materializzato permanentemente mediante vertici tridimensionali opportunamente segnalizzati e monografati al fine di riferire l'esecuzione delle varie operazioni di misura che si svolgono nel tempo sempre allo stesso sistema di coordinate, entro ovviamente le precisioni e le tolleranze prefissate dall'applicazione in atto.

Nella gran parte dei casi è consigliabile riferire sempre le proprie

osservazioni ad un sistema di coordinate globali (vedi paragrafi precedenti) come per altro consigliato dalla normativa di riferimento nazionale ed europea (INSPIRE).

Qualora l'estensione del rilievo non richieda una scala territoriale ma sia legato al singolo oggetto architettonico (o piccolo insieme di edifici) considerato avulso da un adeguato contesto cartografico, è possibile ricorrere alla definizione di un sistema di coordinate locale stabilito arbitrariamente. Tale sistema di coordinate può essere definito mediante almeno 3 vertici noti nelle tre coordinate tridimensionali opportunamente posizionati intorno alla zona di rilievo, materializzati in modo permanente e monografati con precisione in modo da permetterne il ritrovamento e la ricostruzione nel tempo.



2.4.2 - Strumenti di misura tridimensionale

La continua evoluzione delle tecniche di rilievo e modellazione 3D basate su sensori e lo sviluppo di sistemi sempre più performanti per la visualizzazione di dati digitali evidenziano il valore aggiunto dato dall'uso di queste metodiche nell'ambito del rilevamento urbano e architettonico². In particolare appare sempre più chiaro il contributo attivo che tali tecnologie possono fornire nella fase interpretativa, nella conservazione e archiviazione dei dati e nella valorizzazione del bene attraverso il web.

L'interesse sulle diverse tecniche e metodologie di rilievo digitale e di modellazione tridimensionale nel rilievo urbano e architettonico è evidenziato dalla crescita della richiesta, dal loro sempre più frequente impiego e dalla necessità di utilizzare sempre di più forme di registrazione e archiviazione digitale a differenti livelli di scala e risoluzione. Ovviamente l'uso di questi strumenti si inserisce all'interno di un processo conoscitivo ben codificato, nel quale particolare attenzione deve essere posta proprio nella fase di integrazione tra le metodiche tradizionali e quelle innovative. La definizione di un sistema conoscitivo che integri tutte queste forme di analisi è il risultato di un processo nel quale vengono coinvolte differenti competenze e professioni che hanno la capacità di comunicare e condividere un obiettivo comune³.

Questo risultato può essere raggiunto grazie a uno sforzo comune, profuso da un lato dagli esperti del *3D Imaging* nel cercare di comprendere e interpretare le necessità nell'ambito di queste applicazioni, dall'altro dai tecnici che operano nel settore nel conoscere le potenzialità e il funzionamento di base di queste tecnologie, al fine di poterne valutare la reale efficacia e utilità in relazione alla condizione di utilizzo.

Nota 2.4-2 - GUARNIERI A., REMONDINO F., VETTORE A., *Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 5, on CD-Rom, 2006.

Nota 2.4-3 - GUIDI G., RUSSO M., BERARDINI J.A., *Acquisizione e modellazione poligonale*, Milano, McGraw-Hill, 2010.



Fig. 2.4-4 - Visualizzazione di una nuvola di punti relativa ad alcune baite della frazione Veglio (comune di Montecrestese), ottenute con laser scanner FARO.

Questa parte del testo si propone di delineare in maniera sintetica, ma esaustiva, i metodi di applicazione e i principi di funzionamento degli strumenti di acquisizione 3D più utilizzati, evidenziandone i pregi e i difetti.

2.4.2.1 - Classificazione dei sensori 3D

I sensori tridimensionali sono strumenti che consentono di generare un'immagine 3D della scena che inquadrano. La classe di sensori trattati è quella basata sull'uso della radiazione luminosa, all'interno della quale si può fare un'ulteriore distinzione in funzione della natura della luce che viene impiegata per effettuare la misura. Se si tratta di luce naturale i metodi di misura si dicono "passivi" (tecnica fotogrammetrica, teodoliti, etc.); se invece la luce è codificata in maniera da svolgere un ruolo nel processo di misura, si parla di "sensori attivi" (laser scanner, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, stazioni totali, ecc.).

La creazione di modelli tridimensionali *reality-based* di manufatti può avvenire attraverso l'impiego di dati 3D generati da entrambe le tecnologie descritte⁴.

La scelta dei dati da impiegare o della tecnica di rilievo da utilizzare avviene in funzione della caratterizzazione della superficie da rilevare, l'accuratezza e il dettaglio geometrico richiesti, le dimensioni dell'oggetto, la collocazione spaziale, l'esperienza, i costi del progetto, etc.

I sensori ottici attivi^{5,3} (indicati nello schema di Fig. 2.4-5), permettono di ottenere direttamente la posizione spaziale della superficie o del

Nota 2.4-4 - MÜLLER P., WONKA P., HÄGLER S., ULMER A., VAN GOOL L, *Procedural modeling of buildings*, ACM Transactions on Graphics – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006, 25, 3, 2006, p. 614-623.

Nota 2.4-5 - BLAIS F., *A review of 20 years of range sensors development*, Journal of Electronic Imaging, 13, 1, 2004, p. 231-240.

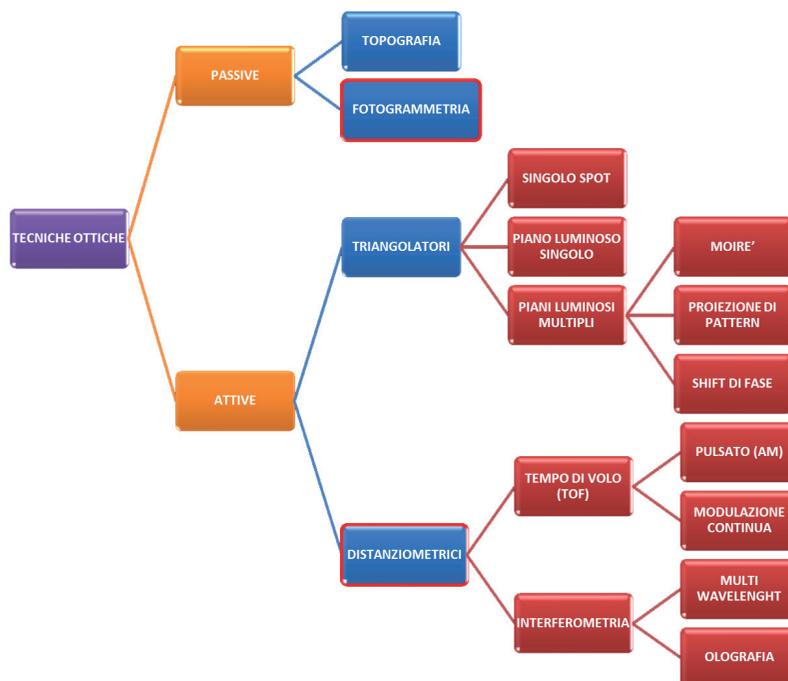
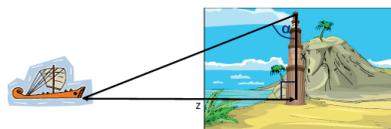


Fig. 2.4-5 - Classificazione delle tecniche ottiche.

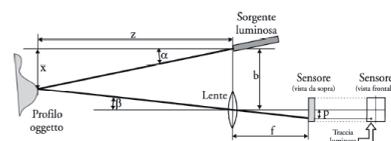
Nota 2.4-6 - EL-HAKIM S., BERARDIN J.A., BLAIS F., *A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-D vision systems*, E.A. Fedosov (ed.), SPIE Proceedings, Conference on Digital Photogrammetry and Remote Sensing, 2646, St. Petersburg, 1995, p. 14-25.

Nota 2.4-7 - REMONDINO F., EL-HAKIM S., *Image-based 3D modelling: A review*, Photogrammetric Record, 21, 115, 2006, p. 269-291.



2.4-6

Fig. 2.4-6 - La triangolazione proposta da Talete.



2.4-7

Fig. 2.4-7 - Il principio di funzionamento dei laser scanner triangolatori:

$$y = 0$$

$$\tan \beta = p/f$$

$$z = b/(\tan \alpha + \tan \beta)$$

$$x = z/\tan \alpha.$$

Fig. 2.4-8 - Esempi di laser scanner triangolatore (Faro CAM2 3D Imager).



2.4-8

punto rilevato, a volte accoppiata all'informazione del colore (anche se di bassa qualità); quest'ultima può essere registrata dal sensore stesso o da una fotocamera digitale esterna ad integrazione dello strumento. Si possono acquisire direttamente e in poco tempo grandi quantità di dati relativi a una geometria complessa con accuratezze elevate. Per contro i sensori attivi sono molto costosi, normalmente voluminosi e definiti da una limitata flessibilità di utilizzo. L'insieme di queste caratteristiche rende questa tipologia di strumenti ideale per molte applicazioni, soprattutto nell'ambito dei Beni Culturali, ma non adattabile a tutte le condizioni ambientali e alle caratteristiche materiche dei manufatti⁶.

I metodi basati sulla elaborazione metrica delle immagini (*image-based*, la fotogrammetria come tecnica ottica passiva in Fig. 2.4-5) richiedono una ben precisa formulazione matematica (geometria proiettiva o prospettica) per trasformare i dati estratti dalle immagini in coordinate metriche 3D⁷. Negli ultimi tempi, le tecniche di elaborazione tratte dalla *Computer Vision (Structure for Motion)* hanno permesso di ottenere dalle immagini digitali informazioni realistiche in modo più semplice e automatico. Le immagini contengono tutte le informazioni necessarie per riprodurre sia la geometria sia la texture del manufatto fotografato, rendendo possibile la generazione di modelli tridimensionali con un contenuto informativo ottimale.

2.4.2.2 - I laser scanner

I laser scanner triangolatori

Il metodo sfruttato dai laser scanner triangolatori risale al VI secolo a.C. ed è stato proposto da Talete. Noto un cateto (x) e l'angolo acuto adiacente (α) è possibile risolvere un triangolo rettangolo e ricavare l'altro cateto z ($z = x \cdot \tan \alpha$).

Il metodo, come indicato in Fig 2.4-6, veniva usato per la stima della distanza delle navi avvistate dalle numerose torri presenti sul territorio per difendere le coste, un problema molto importante per la Grecia Antica.

Al giorno d'oggi, il sistema è stato modificato per permetterne l'applicazione in termini automatici basandosi su un sensore ottico attivo che permette di misurare fondamentalmente le distanze restituendo direttamente un grande numero di coordinate 3D della superficie misurata. I sensori ottici attivi più impiegati in architettura e archeologia sono i laser scanner (terrestri o aerei) e i sistemi a proiezione di frange (o luce strutturata). Questi strumenti di misura sono costituiti da un emettitore di luce e da un sensore per registrarne la risposta.

La forma di luce che per prima ha consentito di creare uno scanner 3D è la luce laser che per le sue proprietà fisiche permette di generare spot luminosi estremamente focalizzati su intervalli di distanza anche elevati. La sorgente laser genera un sottile fascio di luce che produce un puntino luminoso sulla superficie da misurare. Attraverso un sen-

sore da ripresa, quale ad esempio una videocamera digitale, spostato lateralmente rispetto alla sorgente di luce, viene ripresa l'immagine del puntino luminoso, in maniera che la sorgente, il centro di proiezione sul sensore e il punto luminoso riflesso dalla superficie vengano a formare un triangolo (Fig. 2.4-7). Attraverso la conoscenza di una serie di parametri noti a priori (base b , angolo α e lunghezza focale f) e grazie ad alcune semplici relazioni trigonometriche² è possibile risalire alla distanza z tra lo strumento e l'oggetto e di conseguenza alla posizione spaziale del punto sull'oggetto.

Per arrivare ad avere un'immagine tridimensionale relativa a una porzione di un oggetto è necessario muovere tali sensori attivi in maniera meccanicamente controllata, il che porta al concetto di scansione, producendo come risultato una *range map* relativa ad un'area rettangolare la cui dimensione dipende dall'estensione del movimento^{8,9,10}.

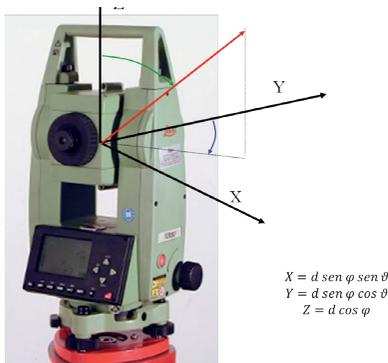
Quindi i sistemi a triangolazione permettono elevate prestazioni di misura, con risoluzioni fino al decimo di millimetro e una incertezza di misura di poche decine di micron (Fig. 2.4-9). Per contro, sono sistemi che lavorano a distanze limitate (entro i 2 m) e con campi di inquadratura limitati.

I laser scanner a triangolazione sono pertanto strumenti molto raffinati che permettono di raggiungere elevate accuratezze utili, in ambito architettonico, per l'acquisizione di piccoli oggetti con dettagli decorativi importanti.

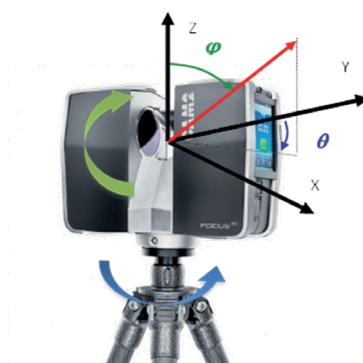
I laser scanner distanziometrici

Per il rilievo di oggetti più grandi come edifici, scavi archeologici e intere aree territoriali, è possibile ricorrere ai laser scanner distanziometrici. Il principio di funzionamento sfrutta il concetto del rilievo celerimetrico proposto agli inizi del XIX secolo da Ignazio Porro che mise in evidenza come la sola misura della distanza non sia sufficiente a localizzare un punto nello spazio: occorre infatti definire la direzione nello spazio (lungo cui è misurata la distanza) mediante 2 angoli tra loro ortogonali, un angolo sul piano orizzontale denominato angolo azimutale e un angolo nel piano verticale denominato angolo zenitale (Fig. 2.4-5).

I laser scanner distanziometrici sono l'evoluzione delle moderne



2.4-10



2.4-11

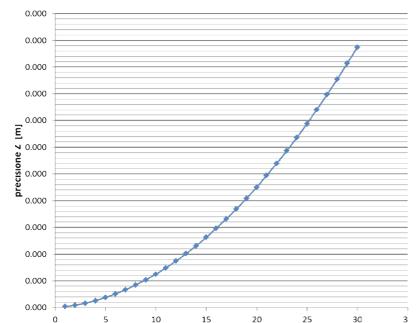
Nota 2.4-8 - BERARDIN J.A., BLAIS F., BOULANGER P., COURNOYER L., DOMEY J., EL-HAKIM S., GODIN G., RIOUX M., TAYLOR J., *Real world modeling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 55, 4, 2000, p. 230-250.

Nota 2.4-9 - Applicando la legge di propagazione della varianza alle relazioni precedenti è possibile determinare le precisioni con cui vengono determinate le coordinate dei punti rilevati ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) in funzione della geometria del sistema e della precisione con cui vengono determinati i parametri misurati (α, p).

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{z^2}{fb}\right)^2 \sigma_f^2 + \left(\frac{z}{\cos^2 \alpha}\right)^2 \sigma_a^2}$$

$$\sigma_x \cong \sigma_y = \sqrt{\left(\frac{1}{\tan \alpha}\right)^2 \sigma_f^2 + \left(\frac{z}{\cos^2 \alpha}\right)^2 \sigma_a^2}$$

Si nota che la precisione σ_z varia con il quadrato della distanza stessa z come si può osservare in Fig. 2.4-9 in una composizione strumentale tipica ($b = 1m, \sigma_p = 5 \mu m, \sigma_a = 0.01^\circ$). Generalmente, al variare delle caratteristiche degli strumenti, già a 5-10 m la σ_z è maggiore di 1 cm. Per piccole distanze invece possono garantire precisioni/accuratezze molto elevate fino a 20 μm .



2.4-9

Fig. 2.4-9 - La precisione nella misura di un distanziometro triangolatore.

Nota 2.4-10 Attualmente per incrementare la distanza operativa si suddividono i sistemi in due parti: un triangolatore che può essere posizionato in prossimità dell'oggetto e un tracciatore che determina la posizione nello spazio del triangolatore permettendo di rilevare in questo modo coordinate 3D molto accurate (fino a 0.1 mm).

Fig. 2.4-10 - Il metodo celerimetrico moderno.

Fig. 2.4-11 - Il principio di funzionamento dei laser scanner distanziometrici.

Nota 2.4-11 - Le strategie utilizzabili per misurare la distanza sono principalmente tre:

- l'invio di impulsi luminosi o *Pulsed Wave* (PW) sulla scena, e la misura diretta del ritardo tra impulso trasmesso e ricevuto (tempo di volo);
- l'invio di una radiazione luminosa continua a frequenza fissa o *Continuous Wave* (CW) e la misura indiretta del tempo di volo, attraverso la stima dello sfasamento tra segnale trasmesso e ricevuto;
- l'invio di una radiazione luminosa continua a frequenza variabile o *Continuous Wave-Frequency Modulated* (CW-FM) e la misura indiretta del tempo di volo, attraverso l'insieme degli sfasamenti tra segnale trasmesso e ricevuto alle diverse frequenze, e delle corrispondenti alterazioni delle ampiezze. Quest'ultima tecnica molto sofisticata richiede un livello di elaborazione del segnale che la rende estremamente costosa. Il principale vantaggio risiede nella elevatissima precisione ottenibile, migliore di un decimo di millimetro. Per contro il sistema è piuttosto lento pur mantenendo un *range* di lavoro limitato a poche decine di metri.

Il distanziometro ad impulsi (PW), a parità di energia emessa, permette maggior portata (fino a qualche km) in quanto si attiva la misura anche con segnali di ritorno molto limitati. Sono meno precisi (5-25 mm+1-2 mm/km) e generalmente più lenti (10-10000 punti/s).

I distanziometri a misura di fase (CW) richiedono, per una corretta misurazione della distanza, che l'onda di ritorno sia sinusoidale (almeno in prima approssimazione); essa deve pertanto tornare con una certa energia per attivare la misura, per cui la portata si riduce a qualche decina-centinaia di metri (in funzione dell'energia emessa) e aumenta la possibilità di avere punti non misurati all'interno della griglia di acquisizione. Le misurazioni sono però più veloci (fino a 1000000 punti/s) e più precise (1-2 mm+ 1-2 ppm).

Applicando la legge di propagazione della varianza alle relazioni precedenti (Fig. 2.4-4) è possibile determinare le precisioni con cui vengono determinate le coordinate dei punti rilevati (σ_x , σ_y , σ_z) in funzione della geometria del sistema e della precisione con cui vengono determinati i parametri misurati (φ , θ , d)

E' possibile determinare la precisione con cui viene posizionato un punto mediante:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$

$$\sigma_x = \sqrt{(\text{sen } \varphi \cdot \cos \theta)^2 \cdot \sigma_d^2 + (d \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta)^2 \cdot \sigma_\varphi^2 + (-d \cdot \text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \theta)^2 \cdot \sigma_\theta^2}$$

$$\sigma_y = \sqrt{(\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \theta)^2 \cdot \sigma_d^2 + (d \cdot \cos \varphi \cdot \text{sen } \theta)^2 \cdot \sigma_\varphi^2 + (d \cdot \text{sen } \varphi \cdot \cos \theta)^2 \cdot \sigma_\theta^2}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\cos^2 \varphi \cdot \sigma_d^2 + (-d \cdot \text{sen } \varphi)^2 \cdot \sigma_\varphi^2}$$

che è stata diagrammata in Fig. 2.4-12.

Si può notare che la precisione di localizzazione dei punti varia con legge parabolica rispetto alla precisione della misura di distanza e con

stazioni totali motorizzate e sono in grado di misurare con grande precisione la direzione di puntamento lungo la quale è disposto un distanziometro che prevede l'invio di impulso laser e la successiva misura del tempo impiegato dalla luce per andare sulla superficie e tornare fino allo strumento di misura (*Time of Flight, ToF*). Tale intervallo di tempo consente di risalire alla distanza tra lo strumento e la superficie, che integrata con la conoscenza degli angoli permette di definire le coordinate 3D della zona puntata dal laser. Uno scanner a tempo di volo automatizza l'operazione di puntamento usando due motori (per rotazioni verticali e orizzontali) che modificano automaticamente la direzione di puntamento su una zona opportunamente programmabile.

I laser scanner ToF a causa dell'elevata velocità della luce (circa 300000 km/s) sono limitati ad accuratezze millimetriche e si utilizzano essenzialmente per oggetti di grandi dimensioni, per i quali un errore assoluto di qualche millimetro è relativamente piccolo. I sistemi che si basano sul principio della misura di distanza sono in genere indicati come Laser Radar o LIDAR, acronimo di *Light Detection And Ranging* che sta ad indicare una pura funzione di misura di distanza tramite la luce¹¹.

Classificazione e caratteristiche dei laser scanner terrestri

In base alla portata nominale i laser scanner terrestri possono essere classificati in:

- strumenti a piccola portata (< 1 m): triangolatori, precisioni sub-millimetriche
- strumenti a media portata (1 m ÷ 50 m): distanziometrici o triangolatori, precisioni da 0.2 mm a 6 mm
- strumenti a lunga portata (50 m ÷ 1000 m): distanziometrici, precisioni centimetriche.

La precisione e la portata non sono che due degli aspetti che devono essere considerati per stabilire la qualità di uno strumento laser scanner nel rilievo di un particolare oggetto (forma, dimensione, natura, localizzazione). Non meno importanti risultano altri parametri che permettono di definire correttamente l'utilizzo dello strumento.

Uno dei parametri più importanti è la *risoluzione di scansione* che può essere definita mediante l'ampiezza dell'angolo di rotazione del raggio laser tra due punti adiacenti (γ in Fig. 2.4-13) ed esprime la capacità di una scansione di descrivere i dettagli geometrici di piccola dimensione. Ovviamente questo parametro ha effetti differenti sulla superficie dell'oggetto in funzione della forma dell'oggetto e dell'inclinazione della superficie da rilevare rispetto alla direzione del laser scanner. Spesso si preferisce definire la *densità di scansione* (m) come la distanza tra un punto misurato e quelli vicini sulla superficie dell'oggetto. I punti rilevati con ogni scansione sono tra loro equidistanti rispetto a una superficie sferica concentrica allo strumento ma non può essere costante su tutta la superficie dell'oggetto rilevato. La Tabella 2.4-1 mostra la densità di scansione per varie distanze con una risolu-

γ	0.01 gon									
$d [m]$	10	20	30	40	50	100	200	300	500	1000
$m [mm]$	1.6	3.1	4.7	6.3	7.9	15.7	31.4	47.1	78.5	157.1

Tabella 2.4-1

zione angolare pari a 0.01 gon¹².

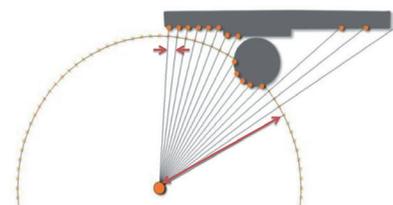
Il *campo di misura* è la porzione di spazio che lo strumento è in grado di acquisire con una sola acquisizione¹³ (Fig. 2.4-13).

La *portata effettiva* del laser scanner dipende dai caratteri specifici dalla singola operazione di scansione che devono essere considerati. In particolare, essa dipende:

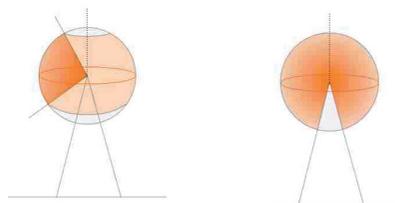
- dal mezzo nel quale si propaga il raggio laser (rifrazione);
- dal materiale che costituisce l'oggetto e dalla sua rugosità;
- dalla presenza di radiazioni di disturbo quali luce solare riflessa, radiazioni artificiali dell'oggetto o di altri corpi posti in prossimità dell'oggetto.

La *velocità di acquisizione* incide sulla durata dell'acquisizione. Velocità superiori a 100000 pt/s non consentono di rendere realmente più rapida la scansione di un oggetto complesso, in considerazione dei tempi di configurazione dello strumento, di analisi dei dati acquisiti e di spostamento dello strumento nelle varie posizioni.

Attualmente alcuni laser scanner, oltre alla capacità di registrare la riflettanza della superficie alla lunghezza d'onda del laser, sono dotati di un sensore RGB interno che associa a ogni punto acquisito il colore rilevato sull'area di impatto del raggio di misura. La risoluzione non consente alcun uso pratico di tale immagine. In Fig. 2.4-15 è mostrata una immagine di scansione colorata mediante la camera interna e un esempio di informazione di riflettanza acquisita per ogni punto 3D rilevato. In altri casi lo strumento viene integrato da una camera digitale disposta in posizione calibrata che permette di acquisire informazioni in forma di immagini digitali ad alta risoluzione molto utili per completare la documentazione del bene rilevato. Per ricoprire tutti i dettagli dell'oggetto ripreso è necessario procedere con numerose scansioni



2.4-13



2.4-14

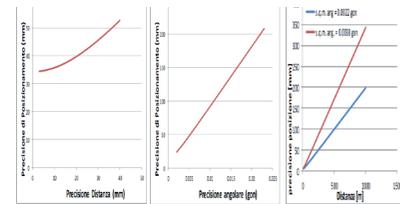


2.4-15



legge lineare rispetto alla precisione di misura degli angoli. In particolare, al crescere della distanza misurata diviene molto significativa la precisione con cui vengono misurati gli angoli che definiscono la direzione del laser; per distanze più brevi è più significativa la precisione con cui si misura la distanza stessa.

Ne consegue che, se l'applicazione richiede la misura di distanze brevi (entro qualche decina di metri) occorre dotarsi di laser scanner con distanziometro più preciso; se è necessario misurare distanze elevate occorre utilizzare strumenti che misurino con precisione gli angoli.



2.4-12

Fig. 2.4-12 - La precisione dei laser scanner distanziometrici.

Fig. 2.4-13 - L'effetto della densità di scansione sulla superficie dell'oggetto.

Fig. 2.4-14 - Il campo di misura.

Nota 2.4-12- La divergenza del raggio laser è collegata con la risoluzione angolare. Nella realtà un laser, per quanto ben progettato e costruito, non riesce a garantire il completo parallelismo delle onde luminose in quanto i fasci che compongono un'emissione laser sono affetti da una leggera divergenza che, entro distanze ridotte, è assolutamente irrisoria e quindi praticamente inesistente (Fig. 2.4-12). Oltre una determinata distanza, la divergenza del raggio laser è tale da non essere più trascurabile, comportando dunque un'impresione nella misura delle distanze. Le distanze misurate sono infatti la media delle distanze dei punti contenuti nell'area di impatto del raggio. In alcuni casi la divergenza del laser può superare la risoluzione angolare comportando la risoluzione della densità effettiva.

Nota 2.4-13 Ricordando che la sfera ha un'ampiezza di 4π steradiani i laser scanner terrestri possono essere fissi con campo pari a 0.5 steradiani (analogo al campo di una camera fotografica), rotanti attorno a un asse con campo non superiore a 5 steradiani, rotanti attorno a due assi con campo variabile tra 11.6 steradiani e 4π steradiani.

Tabella 2.4-1 - La densità di scansione a varie distanze per una risoluzione angolare pari a 0.01 gon

Fig. 2.4-15 - Il dato cromatico e la riflettanza acquisite dai moderni laser scanner terrestri.

realizzate da posizioni differenti. Tutte le scansioni devono essere unite e fuse per ottenere informazioni coerenti tra le varie acquisizioni mediante una procedura che si chiama registrazione. Alcuni laser scanner sono dotati di software per la registrazione delle scansioni mediante riconoscimento automatico di segnali ad alta riflettività o di forma nota.

2.4.3.3 - L'utilizzo dei dati acquisiti mediante laser scanner terrestre

Il processo che definisce il passaggio dall'acquisizione del dato reale fino alla generazione del modello poligonale digitale prende il nome di *Reverse Modeling*, a sottolineare il processo "inverso" rispetto a quello che viene normalmente compiuto in fase progettuale dal modello (digitale e non) alla sua realizzazione fisica.

La prima fase, cioè quella di progetto del rilievo digitale, è la più delicata di tutto il processo. La sua importanza è data dalle scelte che vengono operate e dalle conseguenze che queste comportano in tutti i successivi passaggi fino alla generazione del modello digitale finale. La prima valutazione riguarda la tipologia di strumento e i relativi parametri di rilievo (risoluzione, precisione, accuratezza) ed è dettata da un'analisi critica di dimensione, geometria, posizione e materiale del manufatto. A questa si aggiunge la pianificazione del "progetto di presa", che deve tenere conto del tipo di strumento, della complessità del modello e della possibilità di muoversi attorno ad esso, controllando le caratteristiche ambientali. Tutte queste valutazioni fatte a priori hanno la duplice finalità di ottimizzare il processo e nel contempo prevederne le possibili problematiche¹⁴.

La fase di acquisizione tridimensionale rappresenta spesso uno dei passaggi più rapidi dell'intero processo. Nell'ipotesi si tratti di un'acquisizione con uno scanner a triangolazione, a causa del piccolo campo di vista dello strumento, bisogna prevedere un grande numero di prese tali da coprire l'intera superficie ed avere una sovrapposizione tra nuvole di punti contigue dell'ordine del 30-40%. Questo permette di ottenere un rilievo completo e dettagliato dell'oggetto e di registrare correttamente le varie scansioni. Diverso è il modo di procedere con uno strumento a tempo di volo, per cui sono necessarie molte meno scansioni e non è sempre fondamentale ottenere un'ampia sovrapposizione dei dati grazie all'utilizzo di target esterni nell'ambiente, che permettono di orientare le singole prese rispetto ai punti noti. È però molto importante dedicare una fase di rilievo all'acquisizione dei target, poiché da essa può dipendere la qualità dell'allineamento e di conseguenza l'accuratezza del modello finale. I principali parametri legati alla misurazione tridimensionale sono la risoluzione geometrica, l'accuratezza e l'incertezza di misura (precisione)¹⁴.

Ogni singola scansione viene acquisita rispetto al sistema di riferimento locale dello strumento, quindi la fase di allineamento (o registrazione) delle prese è un passo fondamentale per la creazione del modello

Nota 2.4-14 - BERARDIN J.A., BLAIS F., COURNOYER L., RIOUX M., BERNIER F., HARRISON N., *Portable digital 3-D imaging system for remote sites*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998, p. 488-493.

Fig. 2.4-16 - Alcuni esempi di marker per la registrazione delle scansioni.



digitale finale. La fase successiva all'allineamento consiste, normalmente, nella creazione di un'unica superficie poligonale (*mesh*) dalle diverse nuvole di punti che compongono il modello, avendo cura di ridurre punti ridondanti o errati. La superficie poligonale così ottenuta necessita di una prima elaborazione, che consiste nell'eliminazione di tutte le incoerenze topologiche presenti nella *mesh*. Quindi si passa alla "lisciatura" della superficie, utile nel caso in cui si voglia migliorare le porzioni del modello caratterizzate da un andamento della superficie molto irregolare rispetto alla realtà, mentre è da evitare se si vuole preservare tale caratteristica. Infine il modello presenta quasi sempre delle lacune, generate dalla presenza di zone d'ombra, che possono essere chiuse se la natura del manufatto e l'applicazione per la quale viene rilevato lo consentono.

La fase di ottimizzazione del modello poligonale dipende nuovamente dall'applicazione per la quale deve essere utilizzato. In generale la decimazione della *mesh* è indispensabile per migliorare la gestione informatica del modello e la relativa visualizzazione, ma se non controllata può apportare pesanti modifiche alla geometria del modello.^{15,16} Accanto alla decimazione, il processo di *remesh* permette di regolarizzare la maglia poligonale, riordinandola dopo tutte le modifiche apportate nella fase di editing.

Infine il modello poligonale può essere preparato per una sua visualizzazione fotorealistica mediante applicazione di *texture* reali ed esportato in diversi formati (dall'STL considerato oramai uno standard *de facto* dei formati poligonali, all'OBJ fino al VRML). La scelta del formato dipenderà dall'applicazione per cui viene prodotto il modello poligonale¹⁷. Per la texturizzazione del modello poligonale, se vengono impiegate immagini acquisite da una camera esterna o separata allo strumento, è necessario identificare almeno 6 punti omologhi per poter registrare la *mesh* con i dati immagine, sfruttando le tecniche derivate dalla fotogrammetria.

Per l'intera procedura di modellazione 3D con sistemi ottici attivi, è bene considerare in generale un rapporto di 1:5 tra tempi di acquisizione dei dati (singole scansioni) e tempi di allineamento, pulitura, generazione della *mesh* poligonale e *texturing*¹⁸.

2.4.3.3 - Fotogrammetria e *imaging*

La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere misure accurate da fotografie (immagini) acquisite con sensori terrestri, aerei o satellitari. Partendo da diversi punti omologhi individuati nelle immagini, le tecniche fotogrammetriche consentono di determinare informazioni metriche sulle dimensioni, forma e posizione di un oggetto o scena. La fotogrammetria pertanto stabilisce una relazione geometrica fra le immagini e la scena reale al momento della ripresa fotografica. Una volta ricostruita questa relazione geometrica proiettiva, è possibile ottenere informazioni metriche sull'oggetto attraverso l'impiego di almeno due

Nota 2.4-15 - Il processo di allineamento può contare su tre differenti approcci metodologici, basati su:

- allineamento tra prese che contengano al loro interno target fissi o punti riconoscibili sulla scena visti da posizioni diverse. Questo metodo si usa solamente con i sistemi a tempo di volo per calcolare la roto-traslazione necessaria per l'allineamento delle scansioni, applicando in un secondo momento i parametri della trasformazione all'intera nuvola da registrare. Il contenuto numero di punti coinvolti in questo metodo di allineamento non comporta necessariamente una diminuzione nella qualità del risultato, qualora l'identificazione dei target avvenga con un livello di sofisticazione superiore rispetto agli altri punti della scena;
- allineamento tra prese adiacenti che prevedano un certo livello di ridondanza tramite l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point* e le sue innumerevoli varianti). Questo caso coinvolge normalmente i dati provenienti da scanner a triangolazione e prevede una prima fase di allineamento grezzo di coppie di prese, identificando 3-4 punti in comune tra le due nuvole di punti e una seconda fase di allineamento fine, in cui vengono minimizzate le differenze tra tutti i punti delle nuvole;
- allineamento guidato da sensori esterni in grado di fornire al laser scanner la propria posizione e orientamento (ad es. laser scanner integrato con ricevitori GPS/GNSS e sensori inerziali). Questo metodo fornisce sicuramente un risultato più rapido per l'eliminazione della fase di post-elaborazione necessaria nei primi due approcci, sebbene la qualità dell'allineamento possa variare significativamente a seconda della qualità del sensore esterno. Ad esempio in meccanica esistono laser scanner guidati da *Coordinate Measurement Machines* (CMM) con accuratze migliori di 10 micrometri, mentre l'allineamento basato su GPS/GNSS e sensori inerziali può consentire al massimo accuratze centimetriche.

Nota 2.4-16 - SOUCY M., LAURENDEAU D., *A general surface approach to the integration of a set of range views*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 4, 17, 1995, p. 344-358.

Nota 2.4-17 - LENSCH H.P.A., GOESELE M., KAUTZ M., SEIDEL H.P., *A framework for the acquisition, processing, transmission, and interactive display of high quality 3D models on the web*, Tutorial Notes for DAGM, Munich, 2001.

Nota 2.4-18 - Negli ultimi anni questo rapporto sta mutando, poiché l'introduzione dei sistemi ToF-AM permette di ridurre il tempo di acquisizione 3D a discapito della fase di elaborazione dei dati, che deve trattare una grandissima quantità di informazioni.

Nota 2.4-19 - RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, *Archeologia e Calcolatori* 22, 2011, p. 169-198.

Nota 2.4-20 - VERGAUWEN M., VAN GOOL L., *Web-based reconstruction service*, *Machine Vision and Applications*, 17, 6, 2006, p.411-426.

Nota 2.4-21 - GRUEN A., REMONDINO F., ZHANG L., *Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan*, *The Photogrammetric Record*, 19, 107, 2004, p.177-199.

Nota 2.4-22 - La fotogrammetria si basa sul principio della collinearità (Fig. 2.4-15a) che stabilisce come il centro di proiezione della fotocamera C, un punto I sull'immagine e il suo corrispondente punto O nello spazio, devono giacere su una linea retta. Quando molteplici raggi di collinearità vengono intersecati per calcolare le coordinate 3D di un punto identificato in almeno due immagini, si parla di fotogrammetria con immagini multiple (Fig. 2.4-15b).

Nota 2.4-23 - I sensori e le fotocamere digitali in grado di acquisire immagini sono normalmente utilizzati da terra oppure montati su piattaforme aeree (aeroplani, palloni, aquiloni, elicotteri, UAV, etc.) o satellitari (Ikonos, World-View, Spot, Quickbird, etc.). Si possono quindi distinguere:

- fotocamere terrestri: attualmente sul mercato ci sono a disposizione diversi tipi di fotocamere (o macchine fotografiche) digitali. Le due principali tipologie di camere digitali terrestri sono denominate "compatte" (o amatoriali) e "reflex" (SLR professionali) che si distinguono a seconda del tipo di sensore (CCD o CMOS, a matrice o lineare), ottica (fissa o intercambiabile), stabilità, costo, utilizzo, ecc.
- camere avio-trasportate: vengono normalmente distinte in piccolo, medio e grande formato e acquisiscono immagini con sensori digitali lineari oppure frame. Le camere aeree analogiche che acquisivano fotografie con le marche fiduciali sono ormai state completamente abbandonate;
- sensori montati su piattaforme satellitari: sono generalmente di tipo lineare, accoppiati ad un'ottica che permette di acquisire immagini da 400-700 km d'altezza con elevate risoluzioni geometriche (<1 m) e radiometriche (8-16 bit).

Fig. 2.4-17a - Il fotogramma come prospettiva centrale.

Fig. 2.4-17b - Fotogrammetria con immagini multiple.

immagini.

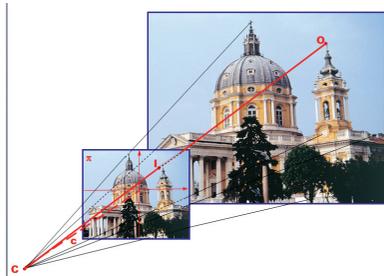
In fotogrammetria, analogamente a quanto avviene nella visione umana, se un oggetto viene ripreso in almeno due immagini scattate da punti di vista differenti, le diverse posizioni dell'oggetto nelle immagini (la cosiddetta parallasse) consentono di ottenere viste stereoscopiche e derivare informazioni 3D dalle aree di sovrapposizione nelle immagini¹⁸. I recenti sviluppi di questa tecnologia ne hanno aumentato le prestazioni e automatizzato molte procedure di restituzione, riportandola come tecnica di base anche per il rilievo architettonico.

Attualmente, per la restituzione di un modello completo, preciso e dettagliato, l'intervento manuale di un utente all'interno della pipeline di modellazione fotogrammetrica è ancora necessario. Se l'obiettivo è quello di creare un modello 3D da utilizzare per semplici visualizzazioni o per applicazioni di realtà virtuale, procedure completamente automatizzate (*structure-from-motion*) possono essere impiegate²⁰. Paragonata ad altre tecniche *image-based* per ottenere informazioni 3D (come computer vision, ecc.), la fotogrammetria non mira ad una completa automazione delle procedure di restituzione, ma ha come obiettivo primario l'acquisizione di informazioni metriche accurate (precise e affidabili) e dettagliate dal punto di vista geometrico.

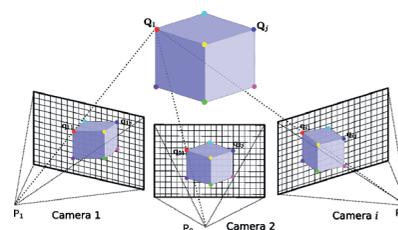
Rispetto ai sensori attivi, i rilievi fotogrammetrici utilizzano immagini che contengono tutte le informazioni (geometria e tessitura) utili alla restituzione di modelli 3D. Inoltre con la fotogrammetria è possibile rilevare, impiegando immagini di archivio, oggetti o scene che non sono più disponibili o sono state danneggiate²¹. Gli strumenti fotogrammetrici (camere e software) sono generalmente meno costosi (è possibile utilizzare camere digitali commerciali, oltre che telefoni cellulari), portatili e semplici da utilizzare.

La fotogrammetria può essere applicata utilizzando una singola immagine (come per esempio il raddrizzamento fotografico), o coppie (stereo) o più immagini (*bundle-block adjustment*). Per applicazioni di fotoraddrizzamento, una singola immagine viene rettificata rispetto ad un piano di riferimento utilizzando una trasformazione proiettiva e conoscendo le coordinate di almeno 4 punti.^{22,23}

Nel caso di riprese terrestri, l'operatore deve cercare di acquisire le immagini in modo da ricoprire l'intera superficie dell'oggetto da rilevare, evitando le zone d'ombra e garantendo sempre un sufficiente grado di sovrapposizione tra le diverse immagini. Un punto viene restituito tridimensionalmente solo se è visibile (e misurabile) in almeno due im-



2.4-17a



2.4-17b

magini, riprese da punti di vista differenti.

Una volta acquisite le immagini, l'intero flusso di lavoro per derivare informazioni metriche e 3D di una scena attraverso la procedura fotogrammetrica consiste in:

- calibrazione della fotocamera per determinarne l'orientamento interno;
- triangolazione delle immagini per determinarne l'orientamento esterno;
- restituzione 3D della scena per derivarne una nuvola di punti non strutturata;
- creazione di un modello geometrico 3D strutturato;
- *texture mapping* e visualizzazione del modello 3D finale fotorealistico.

L'elaborazione fotogrammetrica di dati raccolti con fotocamere digitali

È necessario distinguere fra parametri di orientamento interno ed esterno delle fotocamere. I parametri di orientamento interno vengono ottenuti mediante la procedura di calibrazione e consistono nella distanza principale della camera (o lunghezza focale f), posizione del punto principale (ξ_0, η_0) e alcuni parametri addizionali (AP) usati per modellare eventuali errori sistematici dovuti, ad esempio, alla distorsione dell'ottica. I parametri di orientamento esterno consistono nella posizione nello spazio della camera e nelle tre rotazioni della camera rispetto all'origine del sistema di riferimento. Questi parametri vengono generalmente ottenuti utilizzando due immagini (orientamento relativo) o un set di immagini (soluzione *bundle*) e un modello matematico rigoroso (collinearità) o empirico (per esempio attraverso dei Polinomi Razionali).

Per poter utilizzare una camera o sensore digitale a fini metrici e per un'accurata e dettagliata restituzione 3D, deve essere eseguita una procedura detta di "calibrazione"²⁴. Per camere terrestri (amatoriali, SLR o panoramiche) la calibrazione deve essere eseguita dall'operatore ad intervalli di tempo abbastanza frequenti. La calibrazione delle camere digitali costituisce quindi un prerequisito per il rilievo metrico tridimensionale a partire da immagini. Una camera è calibrata quando sono note la sua lunghezza focale, la posizione del punto principale e alcuni parametri aggiuntivi atti a modellare eventuali errori sistematici (ad esempio causati dalla distorsione della lente). In molte applicazioni, la fase di calibrazione delle camere consiste nella sola determinazione della lunghezza focale (che attualmente viene riportata in alcuni campi memorizzati nel file che contiene l'immagine, EXIF), mentre per effettuare restituzioni più accurate vengono generalmente calcolati tutti i parametri di orientamento interno. Con la procedura di calibrazione si determina quindi la deviazione geometrica fra la realtà (collinearità) e il sistema di acquisizione delle immagini. Una restituzione 3D con una camera calibrata è in grado di ottenere risultati con un'accuratezza fino a 10 volte superiore (migliore) rispetto alla stessa restituzione ma senza calibrazione. La procedura di calibrazione normalmente viene effettuata

Nota 2.4-24 - REMONDINO F., FRASER C., *Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 36, 5, 2006, p. 266-272.

Nota 2.4-25 - I target possono avere coordinate 3D note (per esempio misurate con una stazione totale) e quindi essere utilizzati come punti di controllo nella soluzione del *bundle adjustment*. Si possono misurare anche punti naturali, ma la loro misura avrà una precisione inferiore rispetto ai target. Oggetti planari possono anche essere impiegati per calibrare una camera digitale, con l'accortezza di acquisire molte immagini convergenti e a distanze diverse dall'oggetto, in modo da compensare le diverse correlazioni tra i parametri incogniti da calcolare all'interno del *bundle*. L'algoritmo di *bundle adjustment*, generalmente accoppiato con il modello stocastico ai minimi quadrati di Gauss-Markov, restituisce simultaneamente tutti i parametri incogniti del sistema, oltre alla stima delle precisioni e delle correlazioni dei parametri stessi. I parametri incogniti del sistema sono l'orientamento della camera (interno ed esterno), le coordinate 3D dei punti omologhi misurati nelle immagini e i parametri aggiuntivi (AP). Le osservazioni sono le coordinate bidimensionali dei punti omologhi misurati in almeno due immagini (ed eventualmente le coordinate di alcuni punti di controllo). Per ciascuna osservazione, un'equazione di collinearità viene scritta e il sistema di equazioni, linearizzato e risolto iterativamente, fornisce le incognite cercate. Il sistema del *bundle adjustment*, per essere risolto, necessita della definizione (per esempio le coordinate di almeno 3 punti di controllo) oppure in modalità *free-network*, ovvero senza punti di controllo e fornendo almeno una distanza nota per restituire correttamente la scala. Nel caso in cui siano disponibili punti di controllo, è possibile calibrare una camera anche utilizzando una sola immagine (resezione spaziale), ottenendo comunque un risultato qualitativamente molto inferiore rispetto al processo di *bundle adjustment* descritto precedentemente. Per effettuare una calibrazione corretta, è preferibile fotografare un oggetto tridimensionale con una decina di immagini convergenti, riprese a differenti distanze dall'oggetto, ruotando anche la fotocamera di ± 90 gradi (per ridurre le correlazioni tra i parametri) e con una distribuzione uniforme e non complanare dei punti nelle diverse immagini. Un progetto di ripresa fotografica che non rispetta questi requisiti può generare delle elevate correlazioni tra i parametri del sistema e determinare un'instabilità nella stima ai minimi quadrati.

Nota 2.4-26 - Come accennato precedentemente, la soluzione può essere ottenuta in maniera relativa o assoluta. In quest'ultimo caso, soprattutto per applicazioni di fotogrammetria aerea o satellitare, è necessario fornire ulteriori informazioni esterne, quali, ad esempio, dei punti di controllo sul terreno (almeno tre). In fotogrammetria terrestre, si può lavorare anche senza punti di controllo (soluzione free-network). Per avere un risultato metrico e correttamente scalato è però necessario definire una distanza nota fra due punti.

acquisendo immagini di un oggetto tridimensionale, costituito da punti segnalizzati (target) ben riconoscibili e misurabili automaticamente e con elevata precisione (inferiore a 1/10 di pixel) nelle immagini.²⁶

Una volta che i parametri di orientamento interno sono noti, si può passare alla fase di orientamento esterno, ovvero alla determinazione delle posizioni e rotazioni di ciascuna immagine che si sta utilizzando rispetto a un particolare sistema di riferimento nello spazio. Di solito le fasi di calibrazione e di orientamento esterno sono distinte poiché la geometria di presa più consona alla calibrazione di una camera è molto diversa rispetto alla geometria di presa di immagini utili per ricostruire in 3D un oggetto o una scena (Fig. 2.4-18). Una volta determinati i parametri di calibrazione e orientamento, è possibile iniziare la fase di restituzione 3D della scena attraverso ulteriori misure (manuali, semiautomatiche o automatiche) di punti omologhi tra le immagini. I punti vengono individuati nelle zone più salienti della scena da restituire, in modo da poterla poi definire attraverso linee e superfici (soprattutto per applicazioni architettoniche). Misurazioni manuali o semiautomatiche vengono effettuate quando la geometria di un oggetto può essere ricostruita digitalmente utilizzando pochi punti, come ad esempio nel caso di edifici o semplici strutture architettoniche o archeologiche, in cui gli spigoli definiscono le forme geometriche principali. Procedure automatiche di restituzione (generalmente chiamate correlazione o *image matching*) vengono invece utilizzate quando devono essere restituite superfici irregolari con dettagli e discontinuità, come basso e altorilievi, scavi, terreni, statue, ecc. I recenti sviluppi e risultati nel campo della correlazione automatica di immagini (*image matching*: Remondino et al. 2008) testimoniano le grandi potenzialità del metodo fotogrammetrico per derivare informazioni 3D dettagliate e precise alle diverse scale, paragonabili a quelle ottenute con sensori ottici attivi. Una volta estratte le corrispondenze tra le immagini, le coordinate 3D dell'oggetto vengono calcolate utilizzando nuovamente le equazioni di collinearità e i parametri interni ed esterni ottenuti precedentemente. A seconda del numero e della densità di punti 3D restituiti, sono derivate nuvole di punti dense o sparse (Fig. 2.4-12). L'insieme di punti viene di solito segmentato (nel caso di strutture architettoniche restituite con nuvole sparse) o convertito direttamente in una superficie poligonale (mesh). Per una visualizzazione fotorealistica, il modello geometrico viene poi

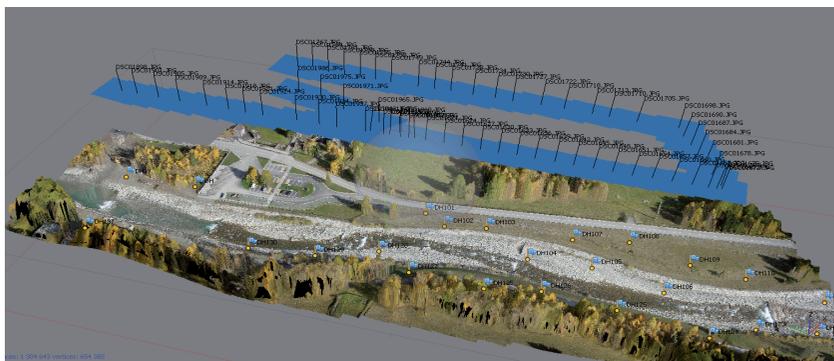


Fig. 2.4-18 - La ricostruzione 3D dell'oggetto ripreso.

texturizzato, proiettando direttamente le immagini (in applicazioni terrestri) o creando un'ortofoto (nel caso di applicazioni aeree o satellitari).

2.4.3 - Applicazioni di tecniche di misura tridimensionale al rilievo di edifici di pietra a secco

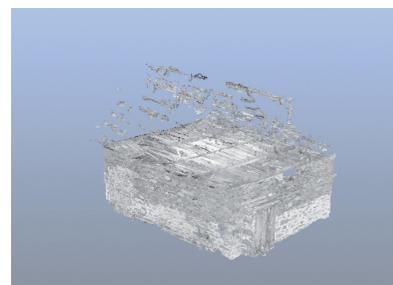
In questo paragrafo sono illustrati alcuni esempi di rilievo che sono stati eseguiti al fine di documentare e approfondire lo studio dei tradizionali edifici di pietra della Val d'Ossola. In particolare, sono state utilizzate le tecniche LIDAR e la fotogrammetria digitale di tipo *image-based*, le quali permettono di ottenere delle nuvole di punti aventi informazioni di tipo geometrico tridimensionale.

2.4.3.1 - Rilievo LIDAR e *image-matching* di murature irregolari. Caso studio: pareti interne a Veglio (Montecrestese)

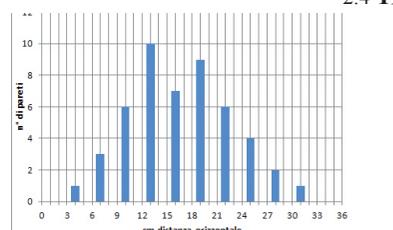
Poiché le forti irregolarità della pietra possono influenzare alcuni aspetti legati alle soluzioni tecniche di recupero (il miglioramento energetico, sismico, la distribuzione degli spazi,...) il gruppo di ricerca Interreg-Alpstone ha condotto uno studio al fine di quantificare il grado di non-planarità di alcune superfici murarie interne degli edifici. Tale analisi è stata sviluppata per mezzo di diverse tecniche di rilievo.

La tecnica LIDAR è stata utilizzata per il rilievo degli ambienti interni di 21 edifici. Le nuvole di punti ottenute sono state processate per mezzo del software Faro Scene (Fig. 2.4-19), il quale ha permesso la pulitura, la misurazione e l'allineamento di scansioni diverse. I dati sono successivamente stati elaborati con il software Photoscan: sono state create le triangolazioni per l'ottenimento di superfici (*mesh*) che descrivono l'andamento dei muri e sono state svolte elaborazioni per quantificare lo scostamento delle pareti dalla planarità verticale. Tramite la creazione di piani verticali interpolanti i punti di ciascuna parete è infatti stato possibile attribuire ad essi colorazioni diverse a seconda della loro distanza dal piano verticale di riferimento; le Figg. 2.4-22 mostrano alcune immagini ricavate da Photoscan da cui è possibile dedurre la distanza tra il punto più arretrato e quello più in aggetto di ogni parete. Il grafico di Fig. 2.4-20 mostra la distribuzione degli scostamenti orizzontali sulla base dell'analisi di 49 pareti di edifici situati a Veglio (comune di Montecrestese).

La tecnica della fotogrammetria digitale di tipo *image-matching* è stata prevalentemente utilizzata per il rilievo delle pareti interne di un edificio situato a Veglio (frazione di Montecrestese) adibito a fienile e avente dimensioni di circa 7 x 5 m (Fig. 2.4-21). Prima di procedere con la campagna fotografica è stato necessario scegliere con criterio le posizioni da cui scattare le fotografie. Come suggerito dal manuale del software Photoscan²⁷, esse sono state progettate in



2.4-19



2.4-20

Fig. 2.4-19 - Nuvola di punti ricavata da un rilievo laser scanner eseguito all'interno di un edificio rurale di Veglio (Montecrestese)

Fig. 2.4-20 - Grafico relativo all'irregolarità dei muri delle baite di Veglio. Sull'asse delle ascisse le distanze orizzontali [cm]; sull'asse delle ordinate la quantità di pareti presentanti la stessa irregolarità

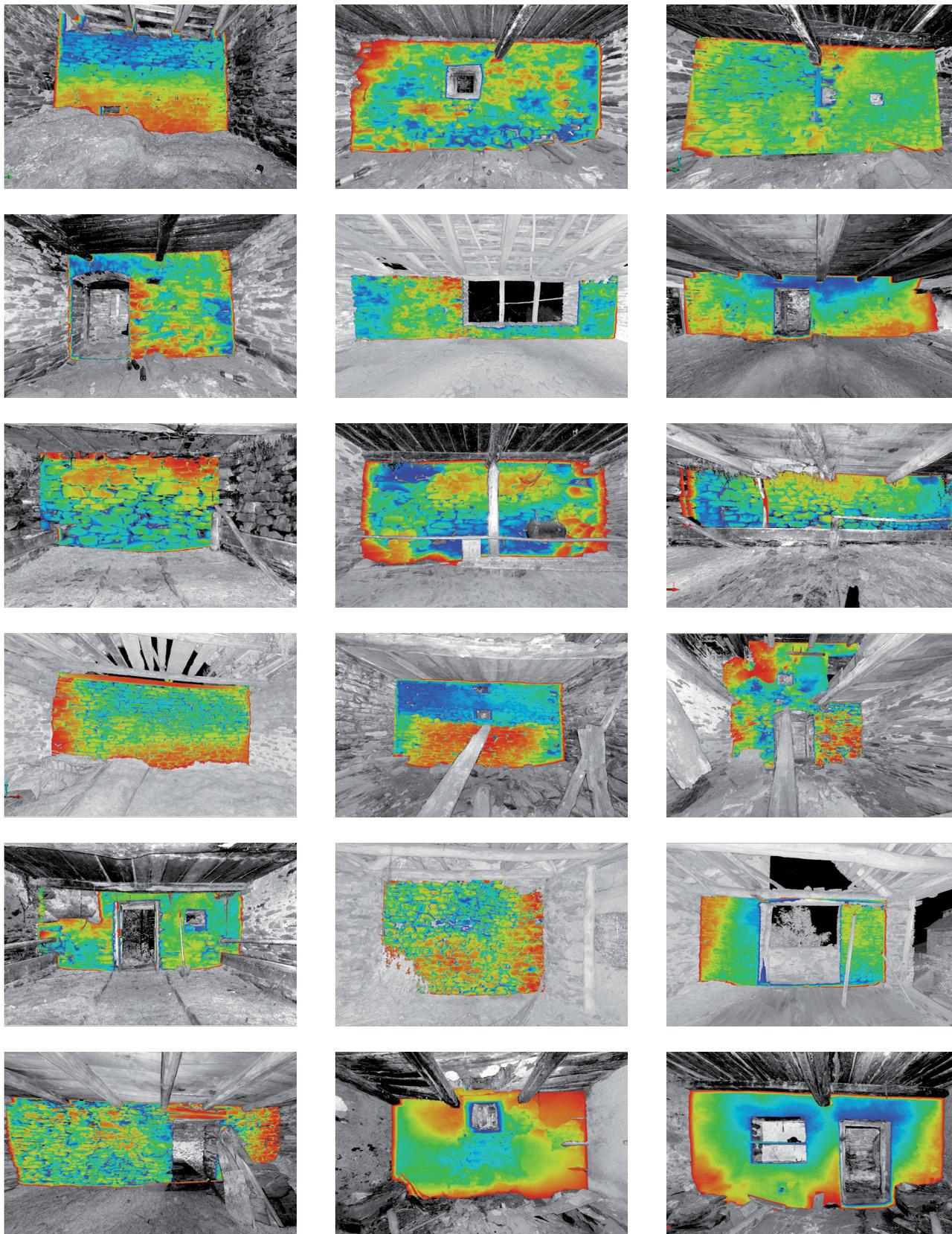
Nota 2.4-27 - Agisoft LLC, *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 0.9.0*, 2012, p. 5.

Fig. 2.4-22 - Elaborazioni realizzate con il software Faro Scene su nuvole di punti ottenute con tecnica LIDAR. La distanza orizzontale tra i punti blu (punti più arretrati) e quelli rossi (punti più in aggetto), varia, a seconda dei casi dai 5 ai 15 cm.

Fig. 2.4-21 - Tipico edificio di pietra situato a Veglio (Montecrestese). Esso ha costituito un caso studio per la sperimentazione del rilievo tramite la tecnica di fotogrammetria digitale di tipo *image-based*.



2.4-21

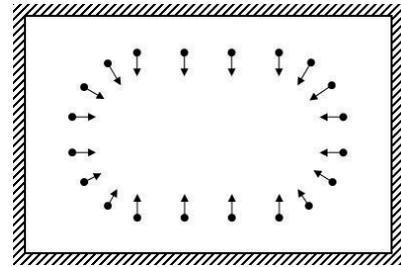


modo tale da avere l'asse della macchina fotografica perpendicolare alla parete (Fig. 2.4-23) e con una sovrapposizione tra scatti adiacenti di circa il 70-80%. Essendo un processo largamente automatizzato, occorre inoltre favorire il riconoscimento dei parametri interni della camera. Per tale ragione è quindi necessario scattare le immagini mantenendo la stessa lunghezza focale e le stesse impostazioni fotografiche (rotazione, distanza dall'oggetto), evitare lenti fisheye e grandangolo, non tagliare o cambiare la geometria delle immagini. Anche le condizioni di luce giocano un ruolo importante in quanto la modellazione è basata sul riconoscimento di pixel omologhi. Le immagini devono essere scattate sempre senza flash per non alterare la posizione delle ombre e possibilmente in un arco di tempo limitato, in modo tale da limitare cambiamenti cromatici dovuti alla variabilità della luce solare. Sono inoltre da evitare fotografie sovraesposte, sottoesposte o con forti contrasti di luminosità (a tal fine, è consigliabile scattare i fotogrammi durante giornate con luce diffusa, condizione che si realizza in presenza di cielo nuvoloso). Oggetti in movimento, lucidi o trasparenti sono possibilmente da escludere durante gli scatti. La campagna fotografica eseguita a Veglio ha fornito circa 60 immagini, le quali hanno costituito il dato di input per i software di fotomodellazione. Sono state eseguite prove di processamento con Autodesk 123D Catch, Agisoft Photoscan e Arc 3D. Al fine di verificare la bontà dei dati ottenuti, è stato eseguita una valutazione per individuare lo scostamento della nuvola di punti ottenuta dalla fotogrammetria rispetto a quella ricavata dal rilievo LIDAR (quest'ultima è stata presa come riferimento in ragione delle note precisioni di output). Le due nuvole di punti sono state sovrapposte con il software Meshlab, il quale ha permesso il calcolo e la visualizzazione grafica (Fig. 2.4-24) della loro distanza reciproca. Ne è risultato che il modello dato dalla fotomodellazione si scosta in media di 2-3 cm (su un muro di superficie totale di circa 50 m²) rispetto a quello fornito dal laserscanner. A fronte di questo dato, considerando l'irregolarità della superficie e gli obiettivi della ricerca, questa precisione è stata valutata decisamente adeguata allo sviluppo delle successive analisi sull'edificio.

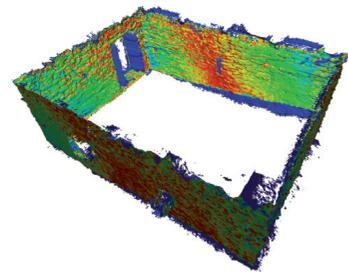
La mesh eseguita con Photoscan è stata scelta per la fase di post-processamento in quanto presentava le caratteristiche migliori. Il modello è stato successivamente importato sul software MeshLab, al fine di quantificare il grado di non-planarità verticale delle pareti. In questo caso è stata utilizzata una funzione di Meshlab (Filters/Color Creation and Processing/Per Vertex Color Function) in grado di dare colorazioni differenti ai punti di ogni singola parete a seconda della loro distanza da un piano verticale. La Fig. 2.4-25 mostra un'immagine ricavata da MeshLab, da cui sono stati dedotti risultati analoghi a quelli forniti dall'elaborazione dei dati LIDAR.

2.4.3.2 - Rilievo mediante metodi fotogrammetrici *low-cost*. Caso studio: alpeggi nel comune di Craveggia (Val Vigizzo)

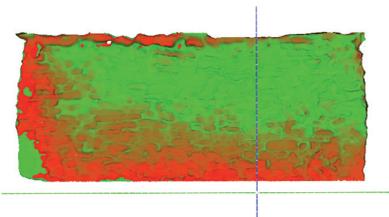
La tecnica della fotogrammetria difgitale basata sull'*image-matching* è stata



2.4-23
Fig. 2.4 - 23 - Schema per una corretta presa delle fotografie all'interno di un locale (tratto dal manuale citato in nota 2.4-25).



2.4-24
Fig. 2.4 - 24 - Confronto tra la nuvola di punti ottenuta con laser scanner e quella derivante dalla fotogrammetria digitale: i colori variano dal rosso (indicanti punti a distanza minima) al blu (distanza massima, impostata a 5 cm).



2.4-25
Fig. 2.4 - 25 - Elaborazione realizzata con il software MeshLab su una nuvola di punti ottenuta con fotomodellazione digitale al fine di quantificare la non-planarità di una muratura di pietra. La distanza orizzontale tra i punti verdi (punti più arretrati) e quelli rossi (punti più in aggetto) è pari a 15 cm.

Fig. 2.4-26 - Elaborato tridimensionale di un agglomerato di alpeggi situati a Craveggia. Realizzato con i software Agisoft Photoscan e MeshLab.



Figg. 2.4-27 e 2.4-25- Prospetti est (24) e nord (25) di un tradizionale edificio situato a Veglio (Montecrestese), realizzati con i software PointCab e AutoCad.

2.4-26

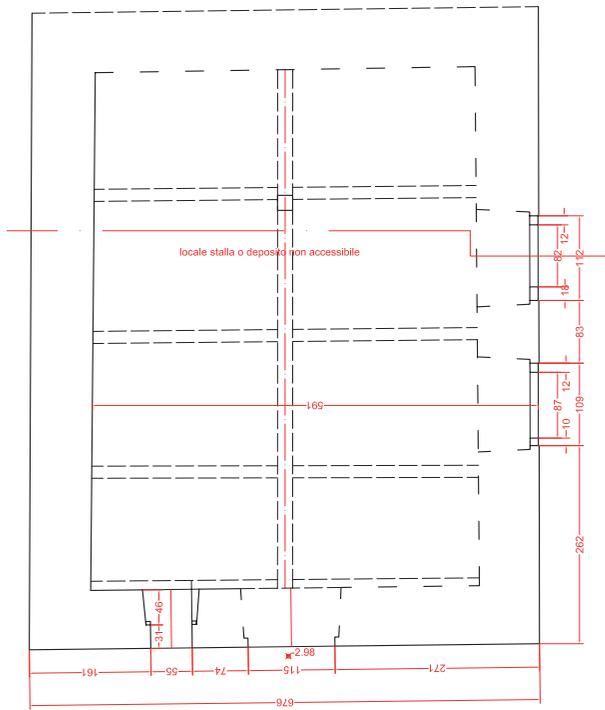
utilizzata anche per lo studio di complessi edilizi al fine di indagare come questi si relazionano alla morfologia del territorio montano. Il caso studio è stato individuato negli alpeggi di Craveggia in val d'Ossola, dove sono state rilevate tre baite dell'Alpe Marco.

Sono state scattate circa 500 fotografie, con lo scopo di modellare non solo gli edifici, ma di avere un accenno di modellazione anche del territorio immediatamente circostante. Per ogni posizione in pianta della macchina fotografica è stata scattata una coppia di fotografie: una ad altezza di circa 1 m e l'altra di circa 1,80 m da terra. Il software Photoscan ha permesso la modellazione separata delle tre baite, successivamente allineate tramite MeshLab. E' stato dunque ottenuto un modello d'insieme correttamente scalato grazie alle misure prese sul luogo (Fig. 2.4-23).

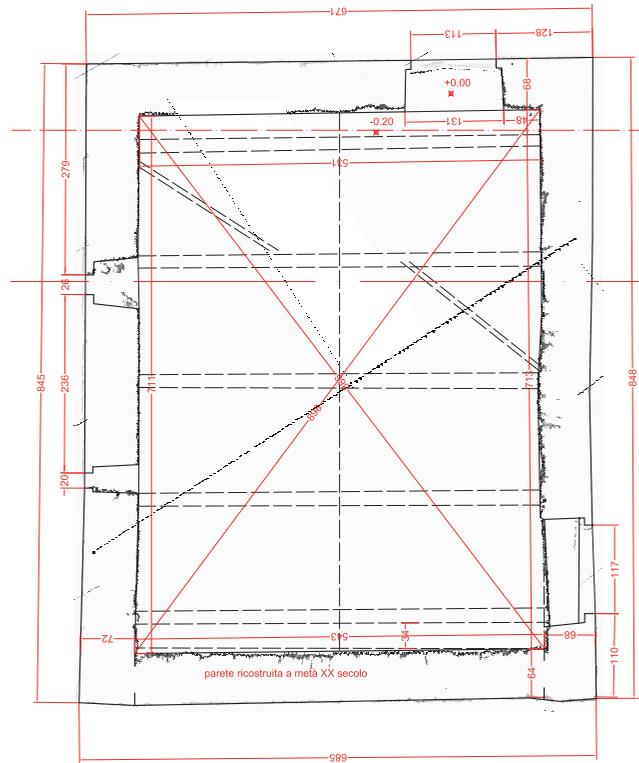
Per ciò che concerne la modellazione del terreno i risultati sono meno precisi rispetto a quelli relativi agli edifici. Ciò è probabilmente dovuto al gran numero di foto che servono a descrivere il terreno, alla ridotta altezza da cui sono state scattate, ai colori tendenzialmente simili (ricordiamo che la fotomodellazione lavora facendo corrispondere pixel omologhi in immagini diverse) e al fatto che il vento muovesse la vegetazione.

2.4.3.3 - Generazione di sezioni bidimensionali e restituzione critica a partire da dati 3D

A partire dal rilievo eseguito con strumentazione laserscanner o tramite fotogrammetria speditiva è inoltre possibile ricavare piante, prospetti e sezioni. Esistono infatti alcuni software (quale, per esempio, PointCab), che permettono di visualizzare la nuvola di punti in corrispondenza di determinati piani di sezione e di esportare il risultato come file DWG, DXF, DAE o PDF. Le fig. 2.4-28, 29, 30, 31, 32, 29 mostrano le elaborazioni realizzate con i software PointCab e AutoCad di un tipico edificio di pietra situato a Veglio (Montecrestese).



2.4-27

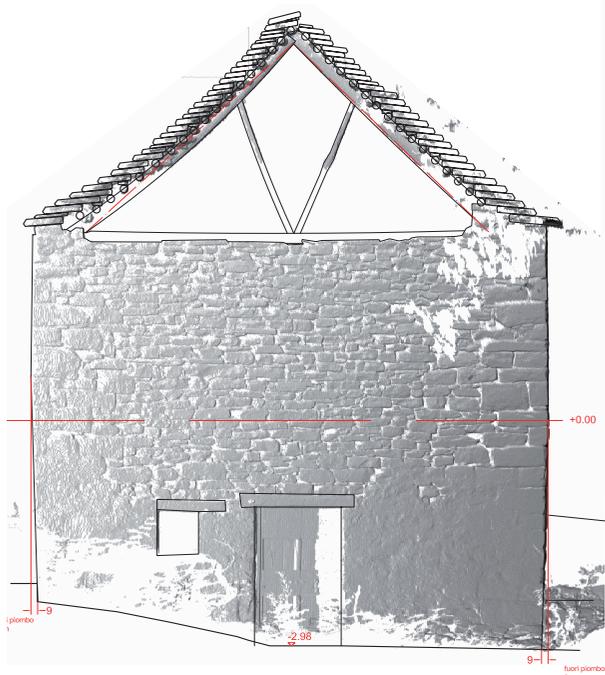


2.4-28

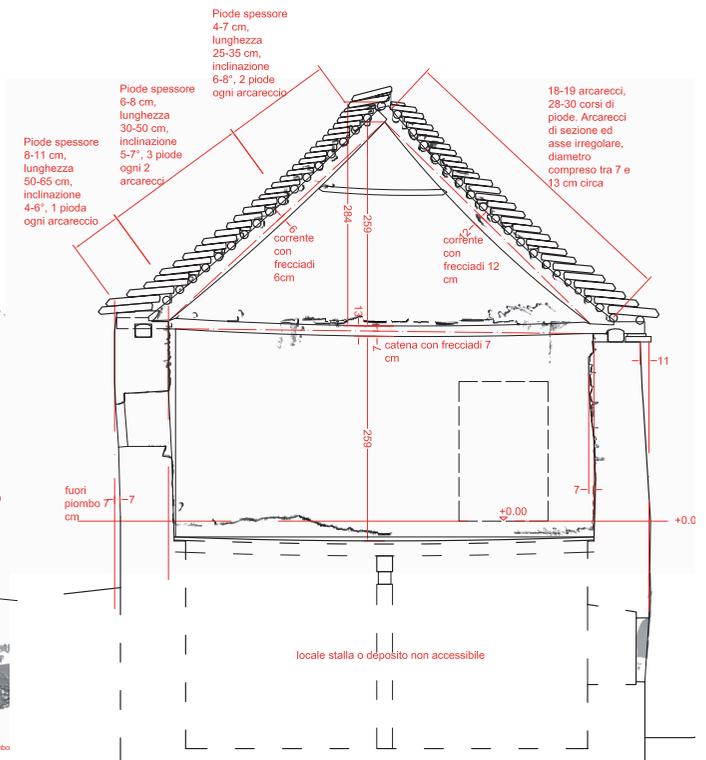
Fig. 2.4-27 e 2.4-28- Pianta della stalla seminterrata (26) e del fienile al piano superiore (27)

Fig. 2.4-29 - Prospetto ovest

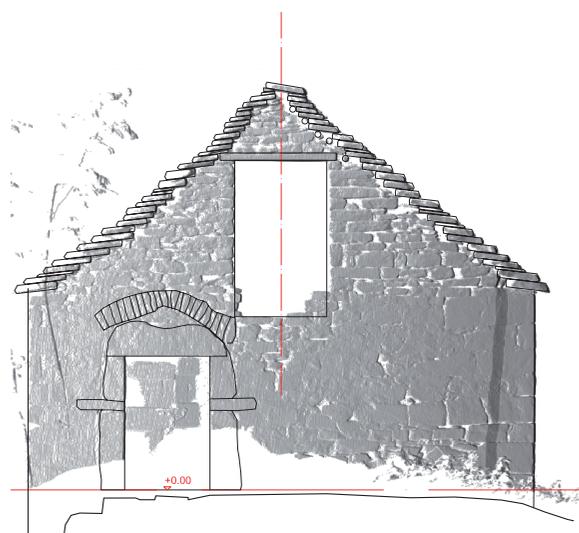
Fig. 2.4-30- Sezione trasversale.



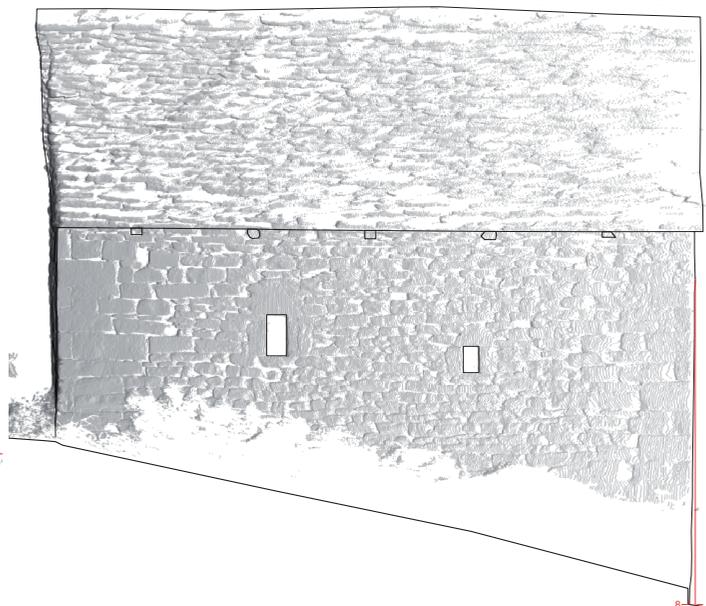
2.4-29



2.4-30



2.4-31



2.4-32

BIBLIOGRAFIA Cap. 2.4

- BERALDIN J.A., BLAIS F., BOULANGER P., COURNOYER L., DOMEY J., EL-HAKIM S., GODIN G., RIOUX M., TAYLOR J., *Real world modeling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 55, 4, 2000
- BERALDIN J.A., BLAIS F., COURNOYER L., RIOUX M., BERNIER F., HARRISON N., *Portable digital 3-D imaging system for remote sites*, in Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998
- GRUEN A., REMONDINO F., ZHANG L., *Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan*, The Photogrammetric Record, 19, 107, 2001
- BROVELLI M. A., CINA A., CRESPI M., LINGUA A., MANZINI A., GARRETTI L., *Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala, Linee guida*
- GUARNIERI A., REMONDINO F., VETTORE A., *Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 5, on CD-Rom, 2006
- GUIDI G., RUSSO M., BERALDIN J.A., *Acquisizione e modellazione poligonale*, Milano, McGraw-Hill, 2010
- LENSCH H.P.A., GOESELE M., KAUTZ M., SEIDEL H.P., *A framework for the acquisition, processing, transmission, and interactive display of high quality 3D models on the web*, in Tutorial Notes for DAGM 2001, München, 2001
- MÜLLER P., WONKA P., HÄGLER S., ULMER A., VAN GOOL L., *Procedural modeling of buildings*, ACM Transactions on Graphics – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006, 2006
- REMONDINO F., EL-HAKIM S., *Image-based 3D modelling: A review*, Photogrammetric Record, 21, 115, 2006
- REMONDINO F., FRASER C., *Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 36, 5, 2006
- RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, Archeologia e Calcolatori 22, 2011
- SOUCY M., LAURENDEAU D., *A general surface approach to the integration of a set of range views*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 4, 17, 1995
- VERGAUWEN M., VAN GOOL L., *Web-based reconstruction service*, Machine Vision and Applications, 17, 6, 2006