



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile – LM-4(DM270)
A.A. 2021/2022

Sessione di Laurea Dicembre 2022

Integrazione di fotogrammetria e scansione tridimensionale per il rilievo architettonico

Relatore:
Prof. Marco Roggero

Candidato:
Marco Santoro

INDICE

| | |
|--|-----------|
| PREMESSA..... | 1 |
| 1. RILEVAMENTO ARCHITETTONICO..... | 3 |
| 1.1 RILEVAMENTO DEL VERO..... | 3 |
| 1.2 IL RILEVAMENTO NELLA STORIA..... | 5 |
| 1.2.1 DAL SECONDO MILLENNIO a.C. AI ROMANI..... | 5 |
| 1.2.2 DALL'ANNO MILLE AL XX SECOLO..... | 7 |
| 1.3 L'IDEA DI MISURA..... | 11 |
| 1.4 STRUMENTI E METODI DI MISURA..... | 15 |
| 1.4.1 IL RILIEVO DIRETTO..... | 16 |
| 1.4.2 IL RILIEVO INDIRETTO..... | 19 |
| 1.4.3 IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO..... | 23 |
| 2. LA FOTOGRAMMETRIA NEL RILIEVO..... | 24 |
| 2.1 LA PROSPETTIVA COME STRUMENTO..... | 24 |
| 2.1.1 LA FOTOGRAFIA..... | 28 |
| 2.2 LA FOTOGRAFIA NEL RILIEVO..... | 30 |
| 2.2.1 LA PRIMA FOTOGRAMMETRIA..... | 31 |
| 2.2.2 L'EVOLUZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA..... | 33 |
| <i>L'image matching</i> | 35 |
| <i>I droni</i> | 37 |
| 3. IL LASER NEL RILIEVO..... | 40 |
| 3.1 DEFINIZIONE E PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO..... | 40 |
| 3.2 TIPOLOGIE DI STRUMENTAZIONI..... | 44 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.1 | SISTEMI A CONTATTO..... | 44 |
| 3.2.2 | SISTEMI A DISTANZA..... | 46 |
| | <i>Laser scanner a tempo di volo.....</i> | <i>46</i> |
| | <i>Laser scanner a triangolazione.....</i> | <i>48</i> |
| | <i>Laser scanner a variazione di fase.....</i> | <i>51</i> |
| 4. | IL RILEVAMENTO INTEGRATO..... | 54 |
| 4.1 | LA POLIGONALE TOPOGRAFICA NEL RILIEVO..... | 54 |
| 4.2 | IL SISTEMA DI RIFERIMENTO..... | 58 |
| 4.2.1 | IL SISTEMA SATELLITARE..... | 59 |
| 4.3 | L'INTEGRAZIONE DEI DATI..... | 62 |
| 4.3.1 | LA FASE DI ACQUISIZIONE..... | 62 |
| 4.3.2 | LA COMBINAZIONE DELLE SCANSIONI LASER..... | 63 |
| | <i>Il caso delle scansioni aeree.....</i> | <i>65</i> |
| | <i>Le nuvole di punti.....</i> | <i>67</i> |
| 4.4 | I MODELLI TRIDIMENSIONALI..... | 68 |
| 4.5 | IL RILIEVO IERI E OGGI..... | 71 |
| | CONCLUSIONI..... | 74 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 75 |

PREMESSA

L'evoluzione tecnologica avvenuta a cavallo degli anni '2000 e il rapido espandersi delle sue conseguenze hanno fatto in modo che l'uomo cambiasse completamente i suoi riferimenti scientifici e culturali.

Nello specifico ambito del rilevamento architettonico una delle questioni maggiormente affrontate riguarda l'elaborazione dei dati che emerge dall'approccio scientifico con la sfera dell'architettura e più in generale della città; si tratta di una tematica cresciuta di pari passo con lo sviluppo tecnologico e le tematiche ad esso legate. Infatti, se da una parte si hanno strumenti in grado di elaborare un numero decisamente grande di informazioni, dall'altra vi è il problema legato alla gestione di questi di dati. Definire uno schema per strutturare questa grande quantità di dati significa prima di tutto evitare che proprio questo eccesso diventi un ostacolo per la conoscenza. Occorre perciò procedere necessariamente tramite una selezione dei dati tale da poter conseguire una corretta organizzazione.

Il punto di partenza nel metodo di rappresentazione delle cose è senz'altro il disegno, strumento essenziale per la conoscenza del mondo reale, per mutarla e accostarla ai propri intenti. Le misurazioni che avvengono per mezzo del disegno vengono elaborate graficamente in modo digitale o cartaceo, tramutando in documentazioni oggettive attendibili e accurate, utili alla corretta interpretazione della realtà.

L'iter che ci conduce al "sapere" prevede che l'uomo operi secondo scelte e metodologie ben ragionate al fine di arrivare alla massima comprensione dei dati rilevati e ad una corretta interpretazione degli stessi. La lettura critica di questa grande mole di informazioni è ad oggi privilegiata e semplificata dall'integrazione delle diverse tecniche attualmente in uso, soprattutto da quelle di tipo indiretto che, effettuate con consapevolezza e un'opportuna conoscenza, consentono una rapida interpretazione dei dati, caratterizzati da una precisione tale da ricondurre la restituzione finale ad un risultato pressoché analogo alla realtà.

Questa tesi si propone di approfondire le tematiche del rilevamento architettonico, procedendo attraverso un percorso storico-culturale che tocca i momenti più significativi della sua evoluzione, analizzando il salto che vi è tra il rilievo tradizionale e quello innovativo e all'avanguardia e indagando sugli aspetti caratterizzanti della fotogrammetria, delle scansioni laser e dell'integrazione tra le diverse tecniche.

Verranno quindi descritte, analizzate e comparate le più moderne tecniche di rilievo, sottolineandone gli aspetti positivi e le rispettive criticità di strumenti che, nonostante l'elevata precisione e accuratezza nei risultati, presentano in ogni caso dei limiti ben definiti.

Questo tipo di indagine è stata condotta su tutte le metodologie descritte, facendo sempre riferimento alle esperienze condotte nel tempo dall'uomo, e scavando nel profondo tutte quelle situazioni che hanno portato allo sviluppo della disciplina fino all'attualità.

1. RILEVAMENTO ARCHITETTONICO

1.1 RILEVAMENTO DEL VERO

Il “rilevamento architettonico” ha acquisito nel corso del tempo un significato ed un valore ben precisi, condiviso e affermato, nel quale sono racchiusi procedimenti e valori, tali da spingere in avanti lo sviluppo scientifico di una materia che da un lato abbraccia discipline tra esse legate e interconnesse (ricerca bibliografica, analisi diretta degli edifici, rilievo topografico, rilievo delle parti, dell’insieme e del contesto, restituzione grafica, ecc.), ma che al tempo stesso gode di una notevole indipendenza e autonomia.

Il fatto che ogni opera architettonica goda di proprie peculiarità, legate alla società, alle maestranze e quindi al contesto in cui esse sono calate, fa sì che per comprendere completamente un edificio, più o meno vicino a noi temporalmente, vi sia la necessità di rilevarlo, quindi analizzarlo e “farlo nostro”, attraverso modelli grafici di varia natura e tipologia¹.

Il rilevamento, infatti, consente a colui che lo esegue di analizzare a fondo le caratteristiche principali di un’architettura, di comprenderne le vicende che ne hanno segnato i tratti e ricostruire quindi tutte le fasi succedutesi fino alla sua configurazione all’istante del rilievo.

Eseguire un rilievo vuol dire scendere nel profondo dell’opera architettonica, effettuare una discretizzazione di essa, così da carpirne le specificità che la delineano e la differenziano da ogni altro esempio di edificio, è questo il fine ultimo del rilevamento.

Si tratta di uno strumento oggi utilizzato in campi anche molto diversi tra loro (urbanistica, restauro, censimento, risanamento di parti urbane o fabbricati, ecc.), fattore che quindi stimola la specializzazione della disciplina in ambiti differenti, con la conseguente maggiore precisione nei risultati, a prescindere dall’ambito considerato.

Ogni elemento o oggetto che ci circonda e si presenta come risultato dell’intervento dell’uomo (quindi diverso da come lo troveremmo in natura), è il frutto di due processi: il rilievo ed il progetto. Come afferma Norberg Shulz *“l’uomo viaggia come un nomade, per raccoglierne elementi e tradurli in architettura”*². Colui che effettua il rilievo procede mediante operazioni

¹ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, p. 3

² BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 1

strutturate ed organizzate e che seguono un preciso modello di indagine, dal quale si otterranno dei dati “gerarchizzati” secondo le finalità prefissate.

È stato sottolineato in precedenza come il fine del rilevamento sia quello di far comprendere le peculiarità dell’architettura, di analizzarla e afferrare quali sono i suoi dettagli; tuttavia alcuni aspetti legati direttamente al rilevatore, ad esempio la sua soggettività, possono influenzare ed alterare la comprensione della realtà nel suo insieme e i dati inerenti ad essa. Occorre quindi effettuare una sintesi accurata (un’intermediazione culturale) tale da giungere ad un risultato chiaro e inequivocabile: il rilevatore diventa un vero e proprio mediatore tra il “vero” e la sua restituzione³.

L’insieme delle tecniche e delle strategie che il rilevamento prevede, ne fanno uno strumento fondamentale per la conoscenza dell’architettura, in tutta la sua complessità spaziale, temporale e culturale.

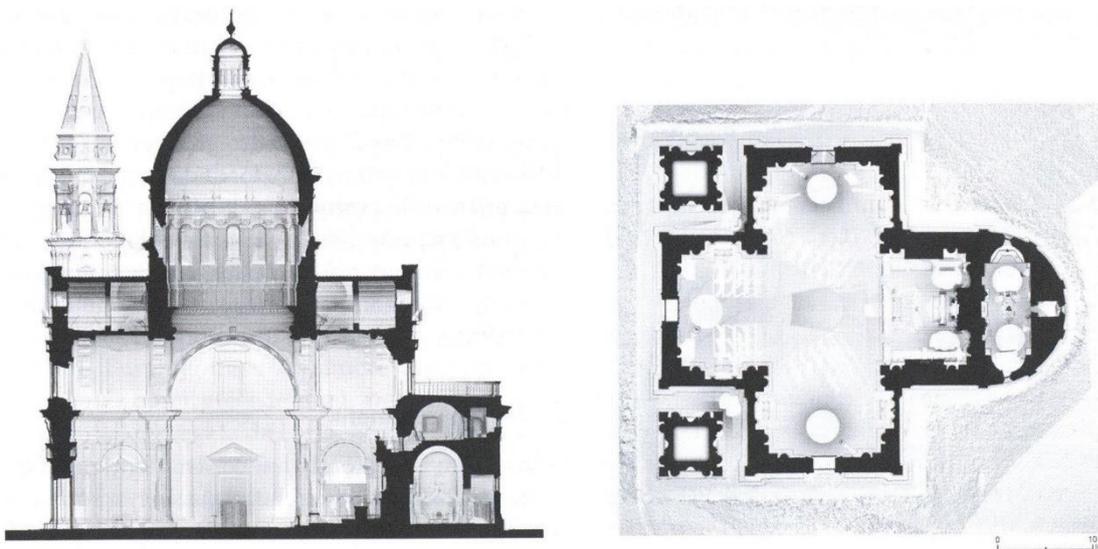


Fig. 1 – Bertocci S., Bini M. (2012). Chiesa della Madonna di San Biagio a Montepulciano, pianta e sezione. Rilevamento con strumentazioni laser scanner 3D.

³ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 2

1.2 IL RILEVAMENTO NELLA STORIA

La volontà da parte dell'uomo di stabilire un rapporto con ciò che lo circonda, trova le sue fondamenta non nell'età moderna bensì nell'antichità. Questo desiderio di instaurare un dialogo con la realtà, supera la mera modifica della stessa e si traduce con la necessità di rappresentare ciò che si stava modificando, come se fosse un bisogno interiore.

1.2.1 DAL SECONDO MILLENNIO a.C. AI ROMANI

Le prime testimonianze risalgono addirittura al secondo millennio a. C., riconducibili al popolo della Mesopotamia e al popolo d'Egitto. In questi casi si passa dalle primordiali raffigurazioni di capanne e territori a quelle che a tutti gli effetti possono essere ricondotte a vere e proprie forme di insediamento. La nota senz'altro significativa, per l'epoca, consiste nella capacità di tradurre bidimensionalmente la realtà tridimensionale in maniera relativamente accurata, sinonimo questo, della pregressa conoscenza di regole, tecniche e convenzioni grafiche necessarie per passare al disegno nel piano⁴.

Ovviamente si è ben lontani dalla concezione di rilievo architettonico odierna, ma è evidente come i lasciti di questi primi approcci alla sfera del rilevamento, e delle scienze in generale, abbiano posto le basi per lo sviluppo della materia stessa, che nei secoli sarà oggetto di studio e notevoli approfondimenti.

È la civiltà egizia colei che segna un vero e proprio solco nella disciplina, una linea che separa la precedente volontà di dedicarsi a questo tipo di attività da un vero e proprio sviluppo di essa, questo grazie all'introduzione delle regole della geometria. L'interesse originario del popolo egizio era quello di dedicarsi alla misura, interesse scaturito dall'ipotesi di semplificare le operazioni di suddivisione dei campi da coltivare; non a caso sono numerosi gli esempi di strumenti che gli egizi sperimentano e affinano a tal proposito (corda graduata, squadra, archipendolo, groma, ecc.). Questa idea di divisione, di delimitare e definire era un tratto comune a molte civiltà antiche, essa infatti era vista come l'unica possibilità per dare un assetto ben preciso al caos del cosmo, l'unico strumento per conoscere e governare il territorio. Come

⁴ DOCCI M., MAESTRI D., *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Bari 1993, p. 3

ribadito da Norberg Shulz, “ciò che rende un luogo costruito carico di significato è la sua *chiusura*”⁵.

Le civiltà classiche di greci prima e romani poi, ripartiranno da queste basi, perfezionandole e giungendo così a nuovi criteri per le misurazioni. In Grecia verrà ideato un nuovo modello, detto “a terra”, con cui riuscire a ricavare la distanza tra una nave e la costa⁶. Anche gli strumenti divengono oggetto di un costante miglioramento, tanto che in questo periodo storico si arriva a calcolare gli angoli di tipo azimutale e zenitale. In epoca romana vengono poi pubblicati i primi trattati di architettura, uno su tutti il *De Architectura* di Vitruvio, massimo esempio della trattatistica in questo campo durante l’età classica. Vengono qui presentati i principi fondamentali dell’architettura, quei canoni che dovrebbero caratterizzarla: *utilitas, firmitas e venustas*. Per la prima volta nella storia siamo d’avanti ad un perfetto esempio di divulgazione tramite pubblicazione: vengono così rimarcate e diffuse le linee guida di questa disciplina.

In questo modo almeno coloro che avevano la possibilità di studiare potevano avvicinarsi a questo tipo di documento (era redatto in latino). Non è un caso se in questo stesso frangente temporale nascono anche le prime scuole di agrimensura, i cui massimi risultati si palesano tramite la *Pianta marmorea di Roma* (o *Forma Urbis Romae*), prima raffigurazione della città, e la *Tabula Peutingeriana*, che raffigura l’intero Impero Romano, entrambi manifesti della considerevole maestria dei *mensores*. Questi due esempi appaiono molto vicini all’odierno modo di intendere il rilievo urbano, più di quanto lo siano altre piante redatte in tempi recenti. I Romani avevano intuito che la rappresentazione dello spazio urbano passava necessariamente attraverso un rilievo su vasta scala sia degli spazi pubblici sia di quelli privati. Non si tratta di elementi sciolti tra loro, ma di un unico insieme legato da profonde relazioni. Questa concezione diviene quindi manifesto dell’ideologia del rilievo urbano tra il IV e I secolo a.C.

Ricordiamo però che, non essendo questa una tesi concentrata sullo sviluppo storico della disciplina, verranno quindi tralasciati i singoli passaggi inerenti la sua evoluzione ed il graduale progredire delle sue tecniche, tuttavia ci si soffermerà, come fatto finora, su alcuni momenti storici di particolare valore.

⁵ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 9

⁶ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, p. 325

1.2.2 DALL'ANNO MILLE AL XX SECOLO

Il periodo che anticipa il medioevo, in particolare tutto l'arco temporale che inquadra l'Impero Romano, non rappresenta una fase storica di notevole importanza a livello di dedizione e produzione nel campo del rilievo architettonico, eccezion fatta per la stesura di alcuni trattati inerenti temi sulla raffigurazione. Un primo cambiamento sembra invece manifestarsi intorno all'anno mille, quando, a cavallo tra l'alto e il basso medioevo, studiosi e teorici danno una grossa spinta alla disciplina del rilevamento interessandosi ad essa e proponendo nuove idee in merito, seppur con scarsi risultati⁷.

Ciò che senz'altro risulta evidente analizzando il percorso storico dell'evoluzione del rilievo e dell'architettura in generale è che certamente fino alla fine del '300 il disegno non ha ancora assunto quella sorta di immagine prescrittiva del modello architettonico e non rappresenta il punto cardine del progetto da cui concepire la sua costruzione. A questo punto risulta però immediato e scontato chiedersi come sia possibile il raggiungimento di una tale precisione geometrica e di dettaglio per edifici così articolati che non prevedono soluzioni di tipo grafico e tecnico in ausilio ai costruttori. Gli studiosi che hanno cercato di rispondere a questo quesito sono giunti principalmente all'ipotesi secondo cui probabilmente tali architetture venivano realizzate in due fasi consecutive: la prima prevedeva la definizione della traccia al suolo della pianta; dopodiché si procedeva con l'alzato⁸.

Il vero vento del cambiamento e dell'innovazione si ha però soltanto a partire dal periodo rinascimentale, in occasione del quale è la concezione stessa del rilevamento che subisce notevoli mutamenti. Se da un lato l'uomo cambia la sua percezione del mondo che lo circonda e la sua prospettiva al suo interno, allo stesso tempo la rappresentazione del vero assume tratti differenti. Ci si rende conto che il concetto di *homo mensura*⁹ trattato da Protagora nell'antica Grecia trovava dei riscontri oggettivi nella società: la realtà assume sfumature e caratteri diversi a seconda di colui che la osserva. Il disegno rispecchia quindi questa riscoperta della soggettività, divenendo vera e propria *arte figurativa*. Si perde in questa fase la volontà di divulgazione, aspetto che fino a quel momento il disegno aveva assunto e rimarcato nel corso dei secoli, così da fare spazio all'interpretazione soggettiva della realtà. Viene meno inoltre il

⁷ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, pp. 323-325

⁸ COULAIS J.F., *Images virtuelles et horizons du regard*, MétisPress, Parigi 2014, pp. 101-103

⁹ REALE G., *Il pensiero antico*, Vita e pensiero, Milano 2001, pp. 66-67

fine ultimo della misura mediante specifiche strumentazioni in favore di una più semplice e immediata rappresentazione del mondo architettonico¹⁰.

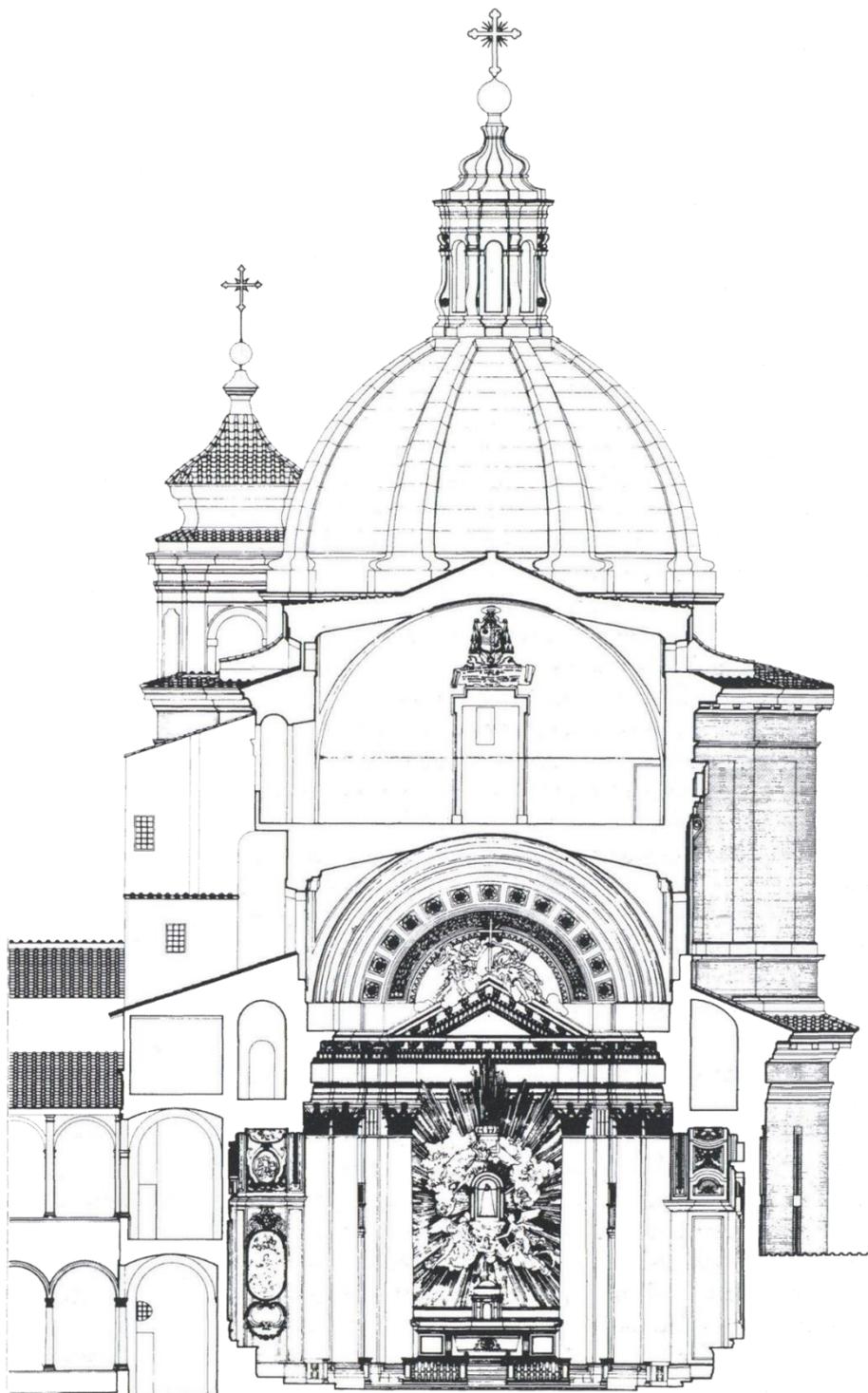


Fig. 2 - Docci M., Maestri D. (2009). Roma, Chiesa di San Salvatore in Lauro. Sezione trasversale. Rilevamento G. Nespeca.

¹⁰ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, pp. 333-336

Diversi secoli prima Vitruvio aveva definito quei concetti chiave che avrebbero esaltato l'età rinascimentale: proporzione e simmetria¹¹. Proprio alla luce di questi principi, i disegni realizzati in questo periodo storico spesso perdono la corrispondenza con l'edificio effettivamente costruito a causa dell'aggiunta di dettagli o artifici che, se da un lato erano aggiunti così da poter perseguire gli ideali di geometria e armonia, dall'altro si proponevano di esaltare l'espressività del disegno¹² a scapito però della fedeltà costruttiva con il manufatto reale. Nel secolo XVII il modello rinascimentale diviene a tutti gli effetti l'insieme di tutti i canoni da rispettare e a cui rifarsi per la realizzazione di un'architettura di un certo tipo. Tuttavia, nonostante questa rottura con il passato, gli studi e gli approfondimenti sull'antico proseguono ininterrottamente e portano alla luce documenti raffiguranti anche ampie zone di città (come quartieri o piazze); questo spinge di conseguenza il rilievo architettonico ad evolvere anche in ottica urbana e a scala territoriale. È in questo scenario che si rafforza sempre più il livello grafico e di racconto delle città tramite la figura del *topografo*, all'insegna di tecnicismi e accuratezza¹³.

Un forte incremento di materiale da un punto di vista produttivo nel mondo del rilievo e più in generale dell'architettura si ha grazie all'invenzione della stampa. La diffusione di opere architettoniche del mondo antico e soprattutto dell'età rinascimentale apre un nuovo mondo; un mondo nel quale gli stessi architetti si rendono protagonisti dal momento che iniziano anch'essi a percepire lo spessore di tale innovazione: iniziano a stampare i propri progetti così da rendere di dominio pubblico il loro sapere sul costruire¹⁴.

I secoli successivi sono però caratterizzati da una certa situazione di stasi in cui la disciplina del rilevamento architettonico non subisce particolari sviluppi, anzi, proprio perché non vengono introdotti nuovi criteri di rappresentazione tali da definirli meglio, alla fine del secolo scorso, si è acceso un vero e proprio dibattito dove ne viene criticato il ruolo effettivo. Il rilievo non fa altro che riportare l'architettura così com'è, una semplice immagine che non aggiunge e comunica altro di essa. All'interno di questo dibattito ci si rende quindi conto che non è sufficiente rappresentare, il rilievo deve essere uno strumento che aiuta e semplifica la comprensione di un manufatto del suo complesso.

La ricerca di un approccio nuovo porta così alla definizione di alcuni principi di carattere generale come l'analisi della singola architettura nel contesto urbano, ma anche lo studio della città nel suo insieme. Man mano si definiscono quindi i caratteri del linguaggio del rilievo, quei

¹¹ VITRUVIUS POLLIO, *De Architectura, Libri X*, a cura di BOSSALINO F., Kappa, Roma 2002, p. 42

¹² DOCCI M., MAESTRI D., *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Bari 1993, pp. 60-68

¹³ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, pp. 356

¹⁴ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, pp. 15-20

tratti che ancora oggi si riflettono nella disciplina stessa, questo grazie ad un vero e proprio ribaltamento nel *disegno*. Si giunge infatti ad una rappresentazione più “scientifica”, caratterizzata da quote, dettagli costruttivi e materiali impiegati, tutti elementi che insieme offrono uno sguardo complessivo dell’organismo architettonico e ne facilitano la comprensione.

Di certo c’è che questo cambiamento senz’altro non vuole sminuire il valore del disegno artistico, né tantomeno questa tesi ha come obiettivo quello di suffragare un’idea anziché un’altra, ma certamente è giusto sottolineare il fatto che ci si allontana da una rappresentazione molto spesso lontana da una corretta valutazione dell’architettura. È quindi opportuno affidarsi con una giusta consapevolezza ad un disegno preciso, chiaro, “vero”.

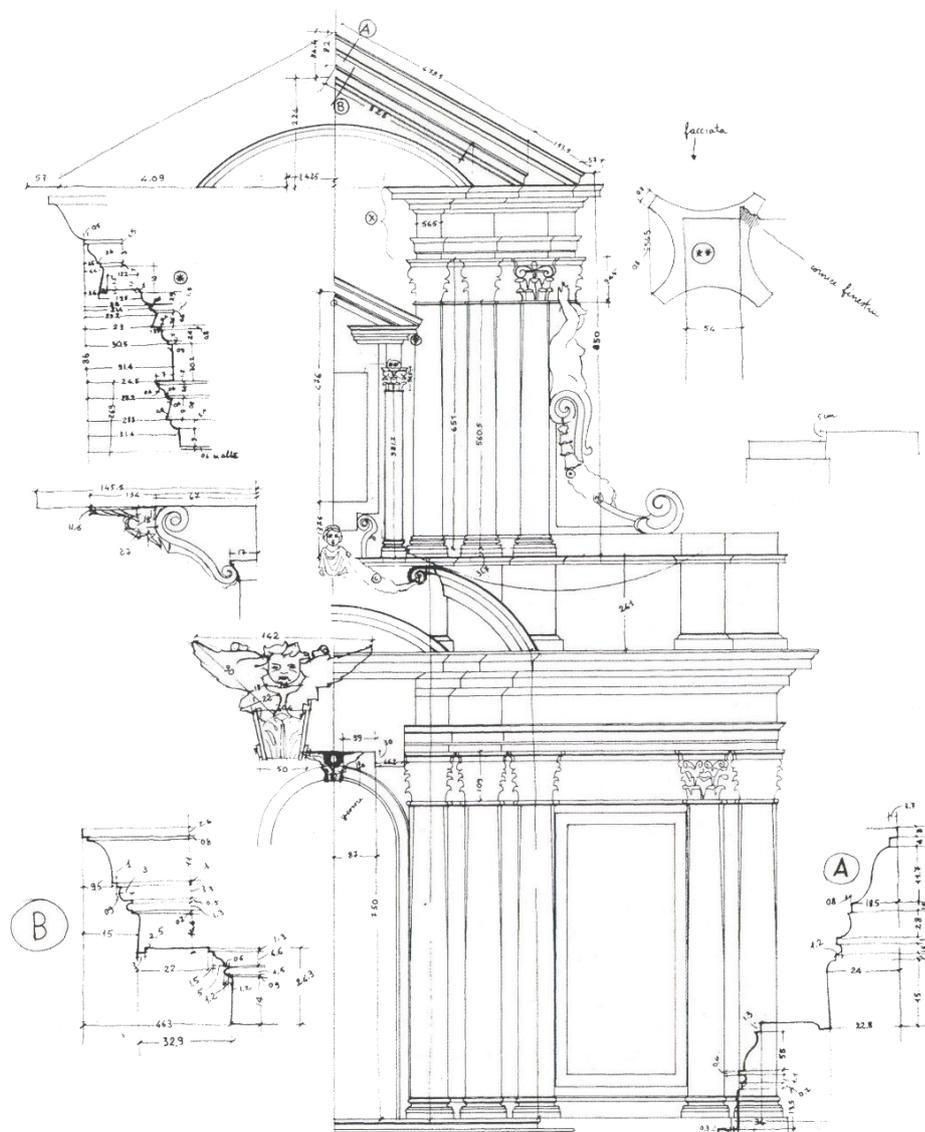


Fig. 3 - Dozzi M., Maestri D. (2009). Roma, Chiesa dei Santi Vincenzo e Anastasio. Rilevamento V. Rizzi.

1.3 L'IDEA DI MISURA

La veridicità e l'attendibilità di un documento sono strettamente collegate al grado di affidabilità dei suoi dati, alla loro accuratezza e alla loro precisione e nel campo del rilievo questi principi sono altresì fondamentali. Le rappresentazioni grafiche realizzate mediante schizzi o appunti, nonostante facciano anch'esse parte della disciplina del rilievo, tuttavia offrono una conoscenza limitata e imperfetta, un'idea poco nitida dell'organismo architettonico che si sta rilevando. È proprio in virtù di questo pensiero che l'uomo realizza di avvertire la necessità di attribuire dei "numeri" ai disegni, di oltrepassare la visione del disegno come pura rappresentazione grafica¹⁵: nasce così il concetto di misura.

Essa possibile definirla come uno strumento utile a definire i tratti più profondi della realtà tramite dati specifici, qualcosa che consente di tradurre informazioni in quantità. Quando si stabilisce una corrispondenza tra il fenomeno esaminato e la relativa unità di misura è possibile giungere ad una descrizione oggettiva del fenomeno, studiarlo, analizzarlo e apprezzarne ogni singolo dettaglio. Tuttavia quando si parla di misura non è possibile non considerare l'aspetto dell'approssimazione; infatti nonostante ad oggi si disponga di strumenti dall'elevatissima precisione, per quanto essa possa essere accurata questo non basta ad ottenere l'effettiva grandezza di ciò che si sta misurando. Non è possibile quindi considerare una misura senza un margine di errore ad essa legato. Si tratta di errori che possono scaturire da diversi fattori: errori riconducibili all'uomo in fase di misurazione, errori legati allo strumento o ad altre condizioni esterne di diversa natura; qualsiasi sia l'origine dell'errore sarà comunque impossibile giungere ad una misura totalmente fedele alla realtà¹⁶.

Naturalmente non è possibile definire dei "confini netti" entro i quali un rilevamento possa considerarsi accurato o inesatto in quanto ogni tipo di rappresentazione dell'architettura è definibile come rilievo; si tratterebbe perciò di confini molto labili. Ciò che invece può affermarsi con certezza è il fatto che il grado di attendibilità di un rilevamento è una diretta conseguenza dell'accuratezza della misurazione e della sua restituzione nel disegno¹⁷.

Se è vero che non è possibile definire confini certi entro i quali includere un'attività di rilievo, tuttavia è possibile focalizzarsi proprio sul concetto di margine di errore trattato nelle righe

¹⁵ THOMSON W., *The practical application of electricity*, 1884, pp. 149-150

¹⁶ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 52

¹⁷ VAGNETTI L., *Disegno e architettura*, Vitali e Ghianda, Genova 1958, p. 91

precedenti. È così infatti che si giunge alla cosiddetta *incertezza della misura*: tanto più è basso il suo valore, tanto più è trascurabile, poiché più bassa è la sua influenza sulla qualità del rilievo.

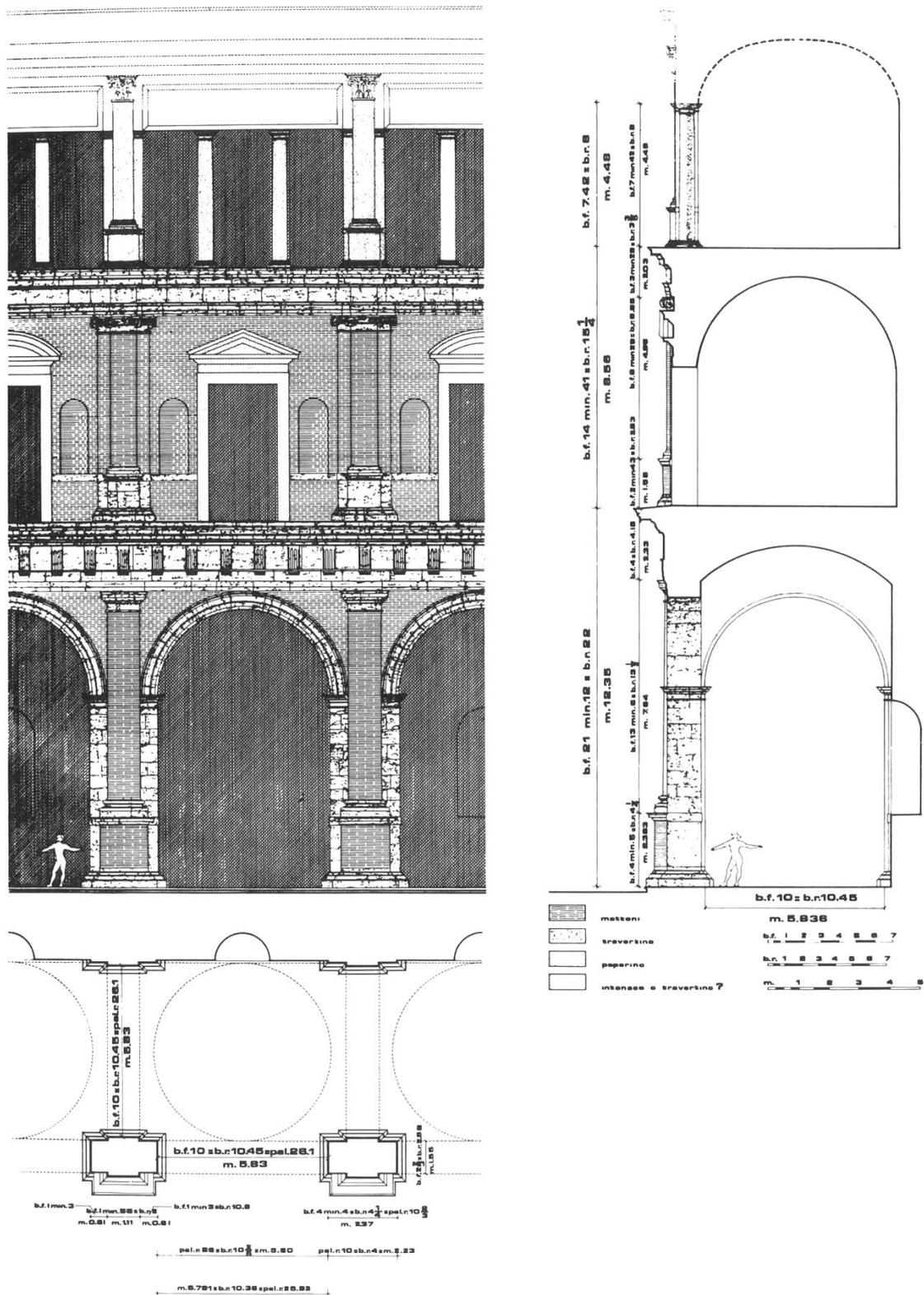


Fig. 4 - Docci M., Maestri D. (1984). Porzione del cortile del Belvedere in Città del Vaticano con distinzione dei materiali. Rilievo di A. Bruschi.

Fin dal momento in cui si è preso coscienza circa l'importanza del rilievo, la sua complessità nell'esecuzione ha senza ombra di dubbio segnato e caratterizzato la disciplina a causa del grande dispendio di energia e di tempo necessari. Nel corso dei secoli, però, sono state introdotte man mano nuove tecniche e soprattutto nuove strumentazioni tali da facilitare notevolmente il lavoro del rilevatore. Queste condizioni al contorno hanno portato quindi ad una situazione odierna nella quale è possibile raggiungere ottimi risultati in un tempi molto brevi¹⁸. Infatti in un mondo in cui tutto muta così velocemente anche il rilievo ha saputo evolvere e rispecchiare questa situazione: software di calcolo di ultima generazione in grado di elaborare un numero elevatissimo di dati hanno cambiato radicalmente l'approccio alla misurazione consentendo di ottenere ottimi risultati in pochissimo tempo.

Questo continuo progredire nel campo della misurazione ha spinto la comunità scientifica ad identificare un sottoinsieme della disciplina: *la metrologia*. Essa si definisce come la scienza che ha il compito di studiare principi, metodi e strumenti alla base della misura di una grandezza¹⁹. L'obiettivo principe della misurazione è perciò quello di rendere maggiormente comprensibili all'uomo gli oggetti che lo circondano, aiutandolo così nella scoperta della realtà. Infatti è proprio quest'ultimo punto quello su cui ci si deve focalizzare; sarebbe inesatto ritenere che le operazioni di misurazioni siano una mera traduzione in numeri e dati del mondo reale. Colui che rileva ha un ruolo fondamentale in questo processo dal momento che occorre effettuare una vera e propria discretizzazione. Il rilevatore, mediante una prima fase di analisi, dovrà definire cosa effettivamente è necessario e cosa è superfluo misurare al fine del rilievo, definendo così un insieme finito di punti. Ne risulta quindi che il concetto di misurazione va ben oltre dei semplici numeri, si tratta di un'attività che prevede analisi, valutazione e giudizio²⁰.

Come accennato in precedenza, la storia ha visto evolvere man mano la disciplina del rilievo e analogamente anche l'approccio alla misurazione è cambiato nel corso dei secoli. La documentazione del vero è stata effettuata mediante unità di misura differenti che hanno però portato a interpretazioni di vario genere e di difficile lettura nel tentativo di accostare documenti differenti. Queste problematiche sono state poi superate quando alla fine del XVIII secolo è stato introdotto il sistema metrico decimale, compromesso con il quale è stato possibile definire un linguaggio universale tra tutti i popoli del mondo.

¹⁸ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, pp. 21-25

¹⁹ SARTORI S., *Le misure nella scienza, nella tecnica, nella società*, Paravia, Torino 1979, p. 15

²⁰ DOCCI M., MAESTRI D., *Il rilevamento architettonico. Storia metodi e disegno*, Laterza, Roma 1992, p. 174

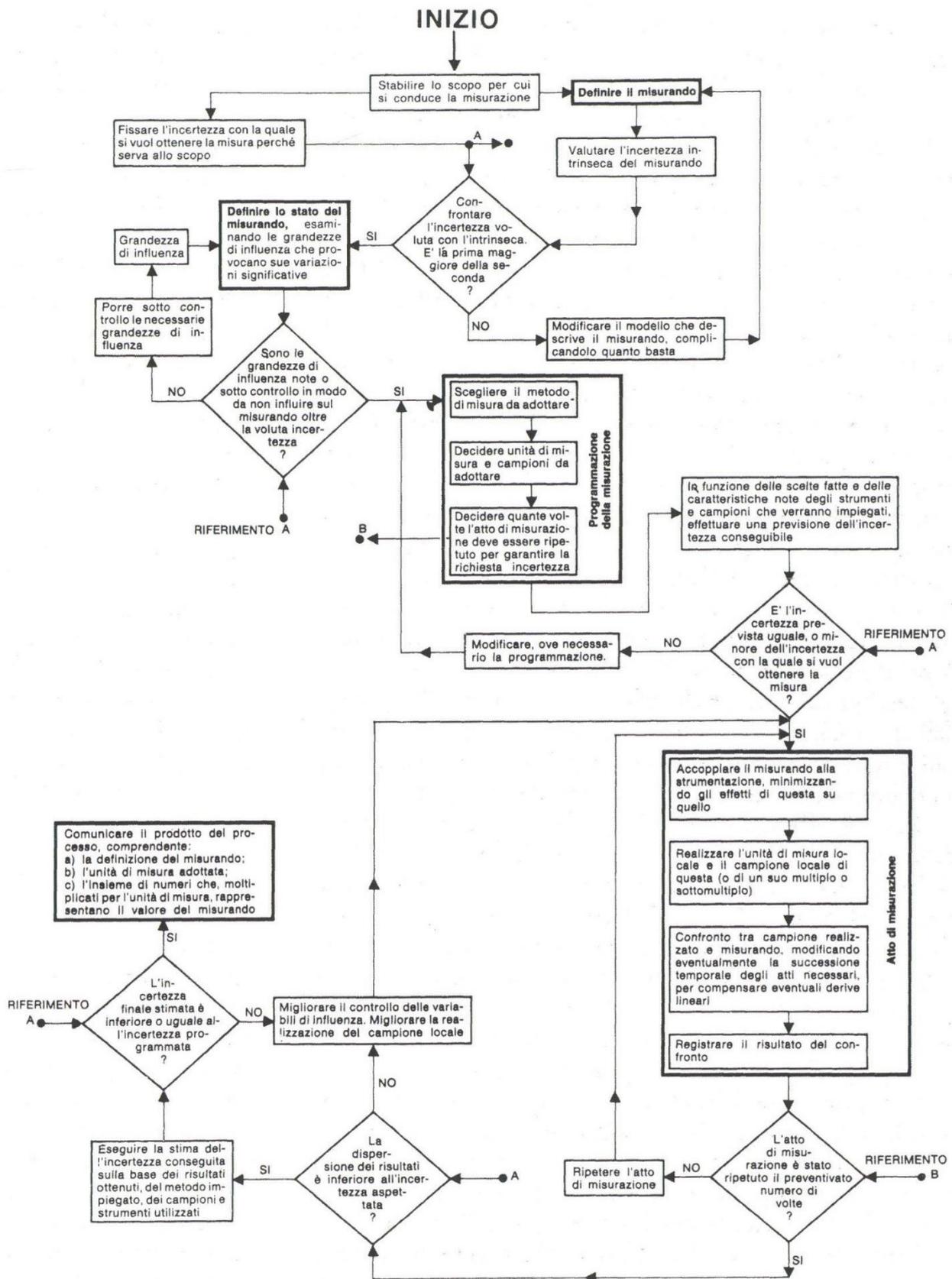


Fig. 5 - Sartoris S. (1979). Diagramma raffigurante il processo di misurazione.

1.4 STRUMENTI E METODI DI MISURA

L'attività del rilevamento deve essere condotta mediante operazioni e criteri precisi, determinati dal fine per cui esso viene eseguito. Definire questi criteri stabilisce quel processo di discretizzazione dell'architettura già accennato nei paragrafi precedenti: vengono individuate quelle parti dell'edificio su cui il rilievo si concentra maggiormente, tralasciando dettagli di minor interesse ai fini del rilievo stesso.

Il mondo dell'architettura abbraccia però un insieme di aspetti tali poter distinguere differenti classi di rilievo; nelle righe che seguono viene fatta quindi una distinzione in relazione alle diverse finalità che ognuna di esse ha e ne vengono descritte le principali peculiarità.

Il *rilievo architettonico* consente di analizzare e rappresentare un edificio in tutte le sue caratteristiche, ne permette il confronto con altre architetture e lo studio delle differenze; il *rilievo estimativo* suggerisce tutti quegli elementi e procedure utili a definire il valore economico di un immobile, ha quindi come finalità l'aspetto commerciale; il *rilievo costruttivo* ha come obiettivo quello di analizzare il sistema di costruzione e l'aspetto materico dell'architettura, approfondisce lo studio strutturale così da stabilire le linee di intervento in ottica di un consolidamento o un restauro; il *rilievo catastale* stabilisce l'esatto spazio su cui insiste un immobile in relazione ai confini della proprietà e ai confini delle proprietà attigue²¹. Ovviamente descrivere tutte le differenti classi di rilievo non è il fine di questa tesi e per questo ci si soffermerà esclusivamente sul rilievo di tipo architettonico, con la premessa che, sia in questa categoria che nelle altre, non vi è una successione di fasi corrette da eseguire per raggiungere il risultato di un buon rilevamento, bensì verrà sottolineato che spetterà al rilevatore plasmare un procedimento corretto, in quanto, nonostante sia possibile tracciare delle linee guida generali per giungere al risultato finito, saranno il suo approccio e la sua esperienza a incidere fortemente su di esso.

Per quanto riguarda appunto le fasi del rilevamento, la prima senz'altro riguarda la ricognizione dell'organismo architettonico tramite una valutazione sul posto dei suoi aspetti esteriori in termini di dimensioni e forme; in questa fase reperire fonti bibliografiche inerenti il caso in esame può rivelarsi di estrema importanza. Siamo nel frangente in cui il rilevatore instaura il suo primo approccio con l'oggetto architettonico e quindi una corretta documentazione, associata alla sua osservazione, può incidere notevolmente sulle procedure da eseguire nelle fasi successive. Si arriva così ad una prima conoscenza dell'architettura, conoscenza che se

²¹ CENTO G., *Rilievo edilizio architettonico*, Vitali E Ghianda, Genova 1959, pp. 12-15

raggiunta con il giusto procedimento consente di semplificare tutte le fasi successive garantendo un certo risparmio di tempo ed un'ottima restituzione grafica. Una volta concluso questo passaggio di conoscenza iniziale è quindi possibile scegliere quale strada percorrere per un corretto rilevamento²².

1.4.1 IL RILIEVO DIRETTO

Terminata la fase descritta nel paragrafo precedente si procede quindi con la scelta inerente il tipo di rilievo da effettuare, una di queste è quello di tipo *diretto*. Si tratta di un tipo di rilevamento effettuato mediante le tradizionali strumentazioni di misura, per questo molto economico e semplice; la misurazione avviene a diretto contatto con l'oggetto e la sua immediatezza ne consente l'integrazione con altri metodi di rilievo²³.

C'è da sottolineare fin da subito che anche il rilievo di tipo diretto può essere distinto in ulteriori due fasi, una successiva all'altra. Si inizia con quella che si definisce fase di "campagna", in occasione della quale il rilevatore si occupa dell'osservazione generale e di raccogliere le misure, segue poi la fase in cui tutti questi dati raccolti vengono restituiti graficamente. Ci sono numerosi manuali che descrivono opportuni iter da seguire per un buon risultato nel campo del rilievo, in questa tesi verranno quindi descritti solo per sommi capi tali procedimenti, con la premessa che essi devono poter variare e adattarsi alle diverse condizioni in cui si può trovare²⁴.

La prima delle due fasi è strutturata in modo tale da procedere secondo un ordine logico che prevede, prima ancora della presa delle misure, una base grafica o degli schizzi preparatori sui quali verranno poi riportate le misure rilevate; occorre perciò una vera e propria preparazione in termini di disegni utili in ottica di questa fase, che saranno poi accompagnati da schizzi realizzati sul posto, i cosiddetti eidotipi. Generalmente si parte dalla pianta e, se si tratta di architetture multipiano, ci si concentra almeno inizialmente sulla quella del piano terra. Ultimato questo primo disegno e completata questa prima rappresentazione si procede poi mediante "l'ingrandimento" di essa, aggiungendo segni utili alla presa delle misure che si intende rilevare; viene delineato un sistema di riferimento tramite una linea trasversale ed una

²² DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, pp. 66-69

²³ Ivi pp. 66-69

²⁴ Ivi pp. 66-69

longitudinale, il cui punto di incontro si definisce *caposaldo* e indica il punto da cui si parte a rilevare le misure.

Quando ci si ritrova ad affrontare un rilievo di edifici che si sviluppano su più piani, ultima la pianta del piano terreno, si passa poi al disegno e alla misurazione di quelle dei piani soprastanti o sottostanti se sono previsti interrati o seminterrati. In questo caso vengono innanzitutto ripresi gli elementi comuni già precedentemente analizzati per velocizzare il procedimento. Concluse poi le piante e tracciate le linee di sezione su di esse, si procede quindi allo sviluppo in alzato del disegno. A questo punto si hanno tutte le informazioni cartacee complete tali da poter iniziare con la misurazione vera e propria; essa avviene tramite strumento di natura diversa. Verranno infine inglobate nell'attività del rilievo anche documentazioni fotografiche o altre soluzioni in grado di condurre al miglior risultato possibile.



Fig. 6 - Docci M., Maestri D. (2009). Narni, Chiesa di Santa Maria Impensole. Rilevamento della Facciata.

Nonostante si conosca bene il peso del progresso scientifico anche all'interno della disciplina del rilievo, tuttavia anch'essa non può fare a meno di alcuni strumenti che mantengono il loro valore intatto e continuano ad essere impiegati ricoprendo un ruolo fondamentale. Un rilevatore che sa operare bene nel suo campo non è solo colui che conosce esclusivamente gli ultimi sistemi all'avanguardia, bensì si tratta di un profilo che ha una conoscenza a trecentosessanta gradi di tutte le strumentazioni disponibili, anche quello meno tecnologiche. Nelle righe seguenti vengono per questo descritti ed analizzati i principali strumenti impiegati nel rilievo di tipo diretto.

Sono indicati con il nome di longimetri tutti quegli strumenti utilizzati per misurare le distanze ed essi si differenziano in due macro classi: i longimetri per la misurazione diretta e quelli per la misurazione indiretta; segue quindi un focus sulla categoria di longimetri relativi alla misurazione diretta²⁵.

- *Metro a nastro*: si tratta di uno strumento che raggiunge una portata di 50 metri e con una sensibilità del millimetro, è realizzato con un supporto pieghevole su cui è segnata una scala graduata;

- *rotella metrica*: caratterizzato dall'arrotolatore attorno al quale si avvolge che ne semplifica l'impiego, si tratta di un metro a nastro la cui accuratezza aumenta nel momento in cui è teso;

- *flessometro*: molto simile alla rotella metrica si differenzia tuttavia da quest'ultima per la maggiore rigidità, ha una portata che varia tra i due e i cinque metri;

- *doppiometro*: strumento caratterizzato da stecche generalmente in legno ripiegabili la cui massima estensione raggiunge i due metri;

- *triplometro*: per molti versi molto simile al doppiometro, ciò che lo caratterizza è il fatto di essere suddiviso in due o a volte anche tre parti, di prevedere una misura massima pari a tre metri e di possedere una livella integrata al suo interno;

- *misuratore telescopico*: apparecchio solitamente realizzato in alluminio impiegato per la misurazione di distanze in altezza fino a un massimo di dieci metri, è provvisto di due livelle per la sua messa in bolla;

- *distanziometro laser*: strumento che senz'altro ha rivoluzionato il campo della misurazione per accuratezza e velocità, prevede anche altre funzioni come il calcolo dei volumi. Come vedremo nei capitoli successivi, i principi che ne regolano il funzionamento si basano sulla misurazione del tempo impiegato dal raggio laser a battere sull'oggetto e tornare indietro. L'accuratezza può essere influenzata dal tipo di superficie rilevata.

²⁵ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, pp. 32-34

Per quanto concerne invece le misurazioni degli angoli, rientra nella sfera del rilevamento diretto la *squadra mobile*, strumento elettronico che riesce a misurare angoli se compresi tra 0° e 180°; per una miglior messa in stazione è provvista di due livelle.

Segue infine un breve elenco di strumenti utilizzati sempre in ottica di un rilevamento diretto, ma impiegati in altre operazioni “parallele” come gli orientamenti o le livellazioni²⁶:

- *filo a piombo*;
- *livella a bolla*;
- *livella ad acqua*;
- *livella laser*;
- *bussola*;
- *squadro a prismi*;
- *squadro agrimensorio*.

1.4.2 IL RILIEVO INDIRETTO

Sviluppatosi di pari passo con l’evoluzione tecnologica, il rilievo indiretto rappresenta probabilmente la parte più “nuova” del misurare. Nonostante i profondi tratti comuni, in termini di impostazione metodologica, con il rilevamento diretto si differenzia da esso ovviamente per le notevoli differenze in termini strumenti; strumenti digitali che consentono di rilevare a distanza le misure, senza interfacciarsi direttamente con l’oggetto.

Si tratta di apparecchiature di estrema precisione nella misurazione di angoli e distanze, talmente articolati che il rilevatore deve avere una certa esperienza per saperlo impiegare nel migliore dei modi dal momento che presentano tecnologie piuttosto sofisticate. Il vantaggio principale di questi sistemi consiste nel fatto che rende possibile e quasi immediato il rilevamento di edifici anche molto grandi o geometricamente complessi. Tuttavia c’è da fare i conti con l’aspetto economico poiché rispetto al caso del rilievo diretto i costi sono molto più elevati e inoltre occorre particolare cura e attenzione in fase di utilizzo²⁷.

Trattandosi di misure rilevate a distanza la prima operazione da fare è la scelta di alcuni punti esatti che consentono la raccolta dei dati. Viene perciò costruita una *rete di inquadramento* che consiste nella definizione di una poligonale planimetrica i cui vertici corrispondono proprio ai

²⁶ CENTO G., *Rilievo edilizio architettonico*, Vitali E Ghianda, Genova 1959, pp. 32-38

²⁷ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, p. 40

punti da dove vengono effettuate le misurazioni; l'oggetto viene quindi "racchiuso" da questo poligono. Risulta quindi evidente che la scelta di questi vertici è fondamentale ai fini del rilievo. Indicati generalmente nel libretto di campagna con le lettere dell'alfabeto, questi punti prendono il nome di *stazioni* e oltre a "materializzare" la rete di inquadramento possono essere anche individuati nel terreno tramite chiodi topografici. Si tratta di una fase tutt'altro che banale dal momento che da essi sarà possibile, in un secondo momento, ricostruire tridimensionalmente il rilievo riprendendo le stazioni definite in precedenza. Le caratteristiche di questa restituzione verranno poi trattate nei capitoli seguenti, seguono ora brevi descrizioni degli strumenti impiegati nel rilevamento a distanza.

- *Teodolite*: costituito da due principali elementi, quali la base e l'alidada, la sua principale peculiarità consiste nell'essere in grado di misurare angoli (per questo anche detto *goniometro*). La base è costituita da elementi necessari alla messa in stazione: tre viti equidistanti che definiscono un triangolo equilatero, un laser e la livella che può essere sia torica che sferica.

Vi è inoltre un tricuspide che funge da vero e proprio basamento tramite i tre fori previsti sulla sua superficie, all'interno di essi si avviteranno infatti i chiodi che terranno insieme la parte basamentale con l'alidada (che contiene il cerchio azimutale o orizzontale). Proprio l'alidada ovviamente è il nucleo centrale dello strumento, esso ha possibilità di ruotare sul piano orizzontale e prevede due bracci che ne delineano la struttura. Tra questi ultimi si interseca un perno che sorregge un cannocchiale (collegato con il cerchio zenitale o verticale). Sono proprio gli indici dei due cerchi a suggerire la misura anche se le possibilità dello strumento non finiscono qui dal momento che, a patto di condizioni particolari, è possibile rilevare dislivelli (tra punto collimato e di stazione) e distanze orizzontali. Esistono due tipologie di teodoliti in commercio: quelli elettronici e quelli ottico meccanici. La differenza sostanziale consiste nella presenza o meno di cerchi fisici che nel primo caso sono sostituiti non a caso da cerchi digitali, conferendo così maggiore precisione allo strumento.

- *Tacheometro*: facilmente confondibile con il teodolite, questo strumento tuttavia non dispone delle potenzialità che presenta il suo "simile". Nel caso del tacheometro, infatti, la precisione a livello angolare è nettamente inferiore ed è per questo che generalmente viene impiegato per rilievi di piccola scala. Nel caso in cui ci trovasse di fronte a misurazioni di brevi distanze potrebbe anche venire utilizzato con questo fine.

- *Livello a cannocchiale*: situazione quasi opposta al caso precedente, si tratta di un'apparecchiatura impiegata per lo più in rilievi topografici a larga scala anche se spesso viene utilizzato anche in campo architettonico. La sua messa in stazione avviene tramite i tre perni previsti sulla base che fanno in modo che l'asse ottico risulti perfettamente orizzontale. Infine

è possibile rilevare dislivelli rispetto al punto di stazione tramite l'aiuto di una stadia posta in corrispondenza del secondo punto.

- *Distanziometro elettronico*: questa tecnologia è quella che forse più di tutte ha rivoluzionato il mondo del rilievo dal momento che, come vedremo più avanti, è colei che è alla base del funzionamento dei laser scanner. Lo strumento prevede tre elementi principali: la stazione che emette il segnale, il riflettore, la stazione che lo riceve. Rifacendosi alle leggi delle onde elettromagnetiche esso è in grado di rilevare distanze tra punti calcolando il tempo necessario all'onda per raggiungere il riflettore e tornare alla stazione ricevente dopo essere stata emessa. Esistono due tipologie di distanziometro elettronico: quello a impulsi e quello a misura di fase.²⁸

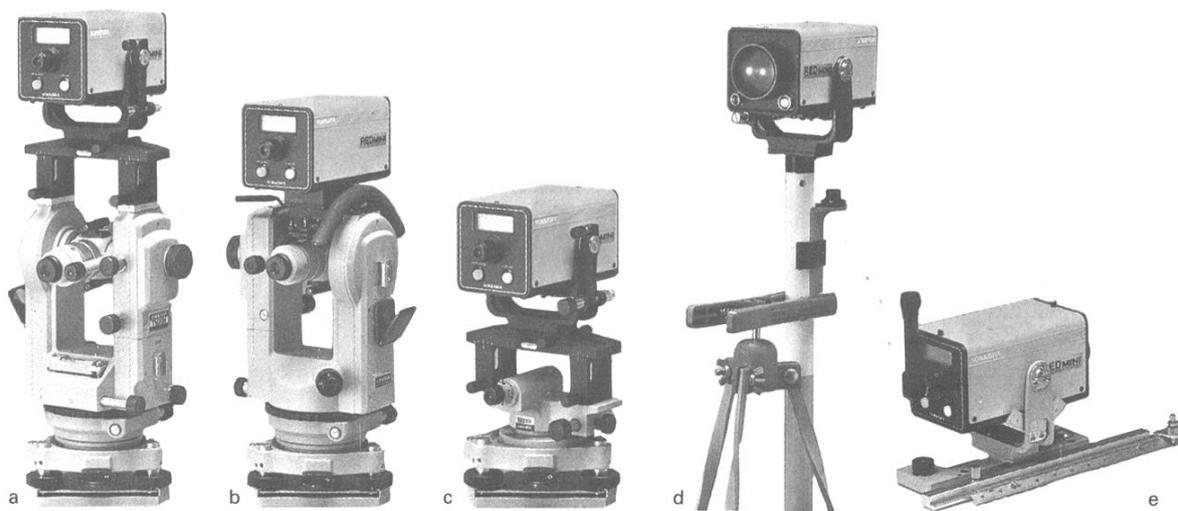


Fig. 7 - Del Gaudio A. (1988). Distanziometro elettronico, diverse possibilità di fissaggio.

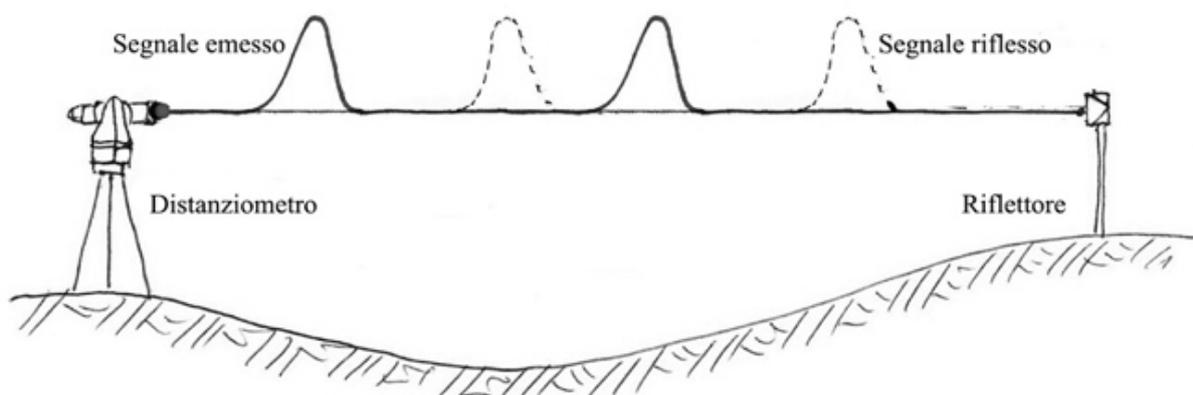


Fig. 8 - Schema raffigurante un distanziometro a impulsi.

²⁸ DEL GAUDIO A., *Nuovo corso di topografia. Misura di angoli, distanze e dislivelli. Rilevamenti planimetrici e altimetrici*, Calderini, Bologna 1988, p. 112

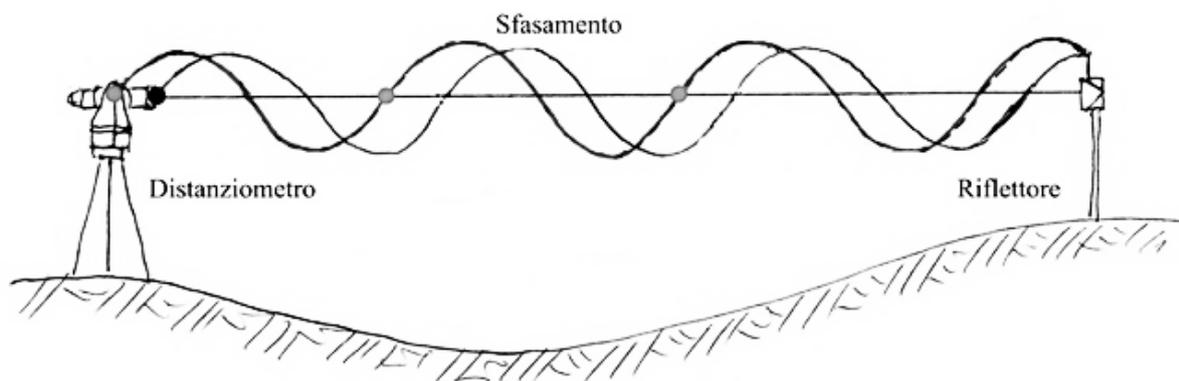


Fig. 9 - Schema raffigurante un distanziometro a misura di fase.

- *Stazione totale*: trattandosi dello strumento forse maggiormente utilizzato nel rilevamento esso presenta potenzialità e caratteristiche che inglobano aspetti di più strumenti in commercio presi singolarmente. È infatti possibile intenderlo come una perfetta crasi tra un distanziometro

elettronico appena citato e un teodolite. L'aspetto più significativo di questa fusione consiste nel fatto che l'asse ottico della stazione coincide con i punti da cui viene rilevata la distanza e da cui vengono misurati gli angoli. Le stazioni totali oggi in commercio non prevedono più l'utilizzo di riflettori almeno in campo architettonico; quando si tratta invece di rilievi topografici in cui si misurano distanze alla scala di chilometri è tuttavia ancora necessario servirsi di essi. Secondo aspetto altrettanto significativo è il fatto che questo apparecchio è in

grado di memorizzare ogni dato rilevato, permettendo così di essere scaricato in un secondo momento ed essere quindi rielaborato ai fini del rilievo. Si distinguono due tipi di stazione totale: quella di tipo automatico e quella di tipo meccanico²⁹.



²⁹ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, pp. 45-50

1.4.3 IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

Come vedremo nel dettaglio nel capitolo successivo, la fotogrammetria è una tecnica di rilievo molto particolare, dal momento che consente di avere una restituzione tridimensionale dell'oggetto a partire dalle fotografie, o meglio una coppia di esse. Partendo da due fotogrammi consecutivi ottenuti da posizioni differenti sarà possibile avere una visione globale dell'oggetto e ottenerne le misure nello spazio³⁰.

Il principio che regola il funzionamento di questo sistema consiste nel rapporto che connette l'immagine fotografica con quella prospettica. Partendo da questo presupposto ci si rifà quindi alle regole della geometria descrittiva secondo cui si può giungere alle dimensioni effettive di un oggetto partendo da una prospettiva centrale (proprio quella che si ottiene con una fotografia), tramite un percorso a ritroso, a patto che si conoscano gli elementi cardine del sistema prospettico (punto e distanza), oltre che l'orizzonte. Questo tipo di restituzione viene detta fotogrammetrica o prospettica³¹.

Come buona parte delle tecniche di rilievo, anche nel caso della fotogrammetria l'iter generale del processo di rilievo prevede fasi diverse, in questo caso due: la fase di ripresa e la fase di restituzione. In questo tipo di rilevamenti gli strumenti utilizzati sono le camere, che a loro volta si suddividono in monocamera e bicamera. Nel primo caso parliamo di un apparecchio per struttura simile ad un teodolite e per il sistema di messa in stazione basato anche qui su un treppiede; le peculiarità della monocamera consistono nelle potenzialità del suo obiettivo privo di distorsioni, ma anche nella perpendicolarità dell'asse ottico rispetto al piano su cui insiste la pellicola. Nel secondo caso, invece, come suggerito dal nome stesso, vi sono ben due camere distinte che hanno la funzione di rilevare contemporaneamente due fotogrammi distinti.

Seguirà nel capitolo successivo un approfondimento sul tema della fotogrammetria oggetto di numerose evoluzioni e miglioramenti.

³⁰ Ivi pp. 105-107

³¹ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, pp. 60-64

2. LA FOTOGRAMMETRIA NEL RILIEVO

2.1 LA PROSPETTIVA COME STRUMENTO

Fin dall'antichità l'uomo ha fatto della prospettiva il suo strumento migliore per la rappresentazione spaziale degli oggetti; un espediente tale da poter far fede a cosa stava guardando e soprattutto come lo stava guardando. Nel corso della storia sono stati infatti davvero molti i tentativi di riprodurre figurativamente ciò che i nostri occhi vedono.

La prospettiva veniva intesa come una vera e propria "arte" che chi solo era in grado di possederla riusciva a riprodurre delle "viste" molto vicine alla realtà: "questo è l'effetto della prospettiva che insegna ad ingannare gli occhi col mezzo di certe curve volteggianti, che si allontanano, e fanno che gli oggetti sembrino lontani"³².

Scrittori, filosofi e pittori nel corso degli anni hanno affrontato il tema, scardinandone i vari elementi e cercando di comprendere le caratteristiche salienti per meglio sfruttarle nel loro lavoro.

Possediamo molti esempi, nella nostra cultura artistica, che ci dimostrano la padronanza prospettica riversata sia nella pittura che nell'architettura.

È durante il Rinascimento, con l'accentuarsi degli studi umanistici e matematici, che gli artisti iniziano ad avere una propensione alla riproduzione fedele della realtà, tra i nomi più celebri del tempo troviamo Piero della Francesca che nel suo dipinto *La flagellazione di Cristo* (1460) mostra la sua idea di prospettiva.

³² DUTENS L., *Origine delle scoperte attribuite a' moderni*, 1789, vol. 1

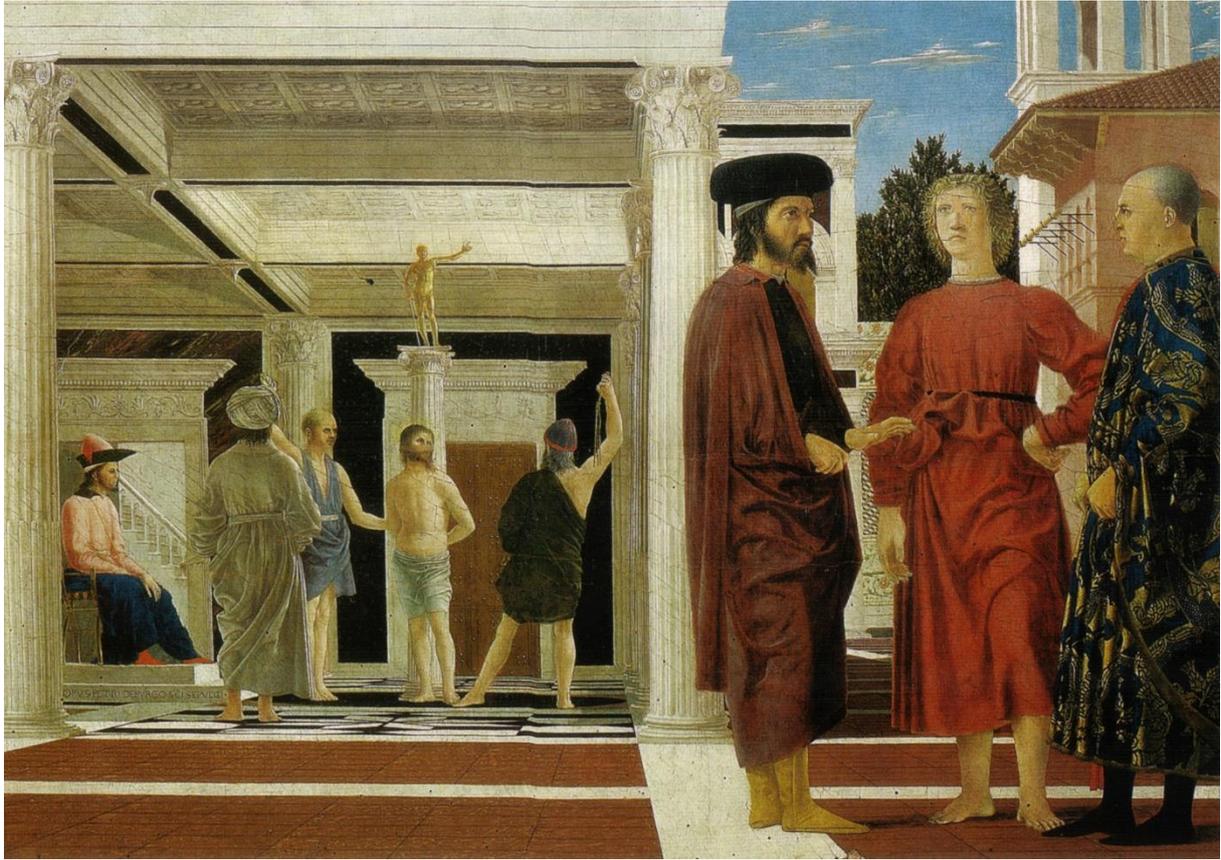


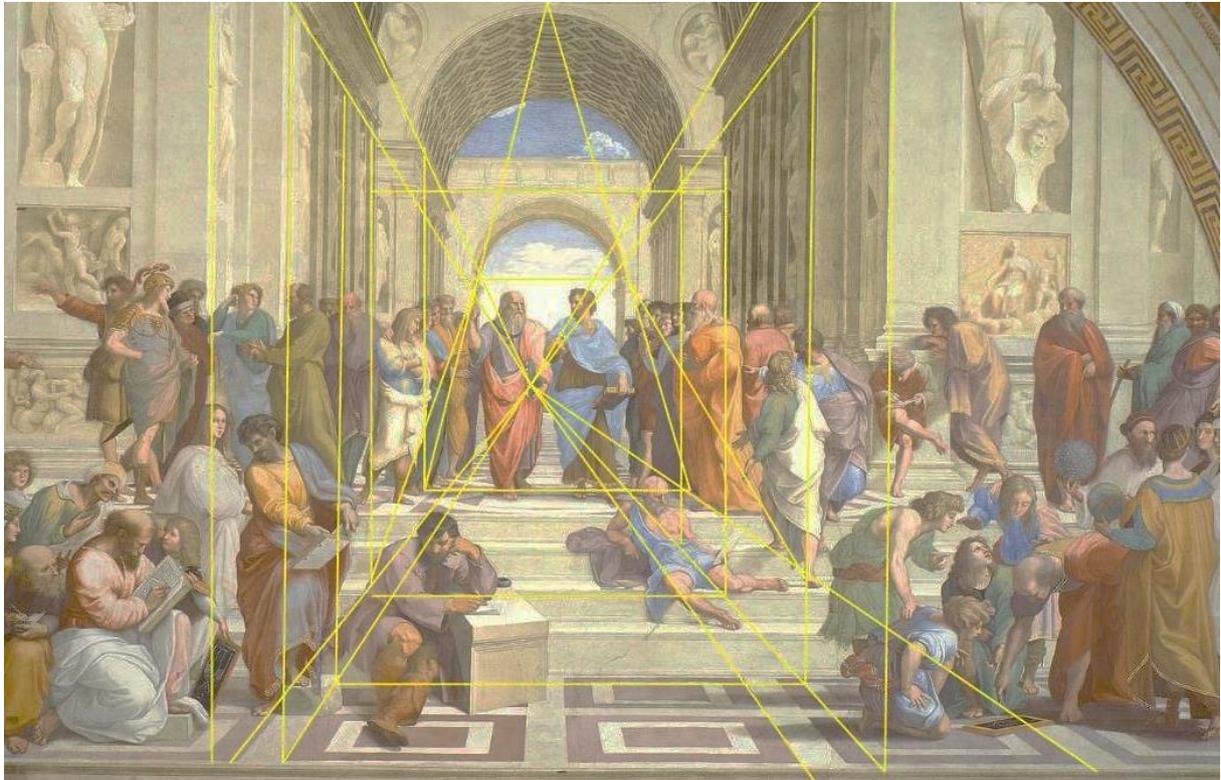
Fig. 10 – *La flagellazione di Cristo* (1460), Piero della Francesca.

Qui la pavimentazione, così come la posizione delle colonne, ma anche la diversa altezza delle figure, proporzionata alla loro posizione nello spazio, creano un doppio racconto nel medesimo quadro, definendo due momenti di lettura ma anche due momenti di racconto quasi come in una pellicola cinematografica odierna;



Altro esempio pittorico con un altro tipo di prospettiva è quella del dipinto *La città ideale* (intorno al 1473), Urbino, Galleria Nazionale delle Marche. Qui viene rappresentata, grazie all'espedito della prospettiva centrale, una città ideale del Quattrocento.

In questo quadro le linee tendono a convergere verso un unico punto di fuga tanto da concentrare tutta l'attenzione di chi ammira questo dipinto verso il centro dell'immagine, lo scopo è ben chiaro, ovvero quello di conferire maggior risalto a quell'unica architettura, quasi come se dominasse lo spazio rispetto a ciò che la circonda;



Al celebre dipinto “La scuola di Atene” di Raffaello Sanzio, sono state riportate delle linee per rendere più chiaro lo studio prospettico del pittore.

Anche in questo esempio pittorico le linee della pavimentazione ci indirizzano su quale è il fulcro della rappresentazione. In questo caso appaiono due elementi nuovi rispetto ai dipinti sopra analizzati: il primo è la disposizione piramidale nella quale vengono collocati i personaggi, la quale genera l'allegoria del quadro e la storia che esso vuole tramandare, conferisce anche maggior importanza ai personaggi che esso racchiude; il secondo invece è il forte impatto dell'architettura che inquadra la scena.

La padronanza con cui l'architettura è stata studiata si nota dalla disposizione degli elementi nello spazio: la superficie cassettonata in prospettiva delle volte a botte e la disposizione delle statue e paraste nella navata centrale.

Questo è uno dei più eclatanti esempi di prospettiva in pittura completo su più fronti dove lo spazio non funge da sfondo alla scena ma vissuto dalle figure che lo fruiscono tanto da renderlo proprio.

Spesso anche nella realtà, pittura e architettura, si fondono insieme sfruttando la prospettiva per conferire una visione più “dolce” agli occhi del fruitore.

L'importanza della prospettiva nella cultura europea incrementò con il tempo non solo perché la costruzione proiettiva delle immagini fu usata solo come espediente pittorico, ma divenne importanti anche in altre sfere: “quelle scientifiche iniziarono con l'impulso da dallo sviluppo della matematica con la nascita della geometria proiettiva; quelle pratiche condussero al perfezionamento degli strumenti di rilevamento; infine quelle costruttive applicando la possibilità di misurare rappresentare la profondità dello spazio, sono alla base della fioritura delle architetture dipinte sulla scatola muraria, in cui la decorazione pittorico plastica degli interni integra lo spazio costruito come risultato di una concezione progettuale unitaria che fonda architettura, pittura e scultura”³³.

Questo continuo tentare ha fatto in modo che anche le tecniche di rappresentazione prospettica divenissero sempre più accurate, tanto che, attraverso criteri geometrici e matematici, si è giunti alla possibilità di una rappresentazione della realtà effettiva, seppur simulata³⁴.

Non solo il mondo della prospettiva, ma tutta la collettività, subisce una profonda rivoluzione nel momento in cui viene scoperta la fotografia, innovazione che segnerà radicalmente le modalità di rappresentazione. Le sue origini e i suoi primi sviluppi risalgono all'inizio del

³³ VALENTI M., *Prospettive architettoniche II conservazione digitale, divulgazione e studio*, Graziano 2016, p. 304

³⁴ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, pp. 85-90

secolo quando, grazie all'enorme lavoro di alcuni uomini di scienza, la fotografia compie i suoi primi passi (soprattutto in merito al tempo di esposizione per la restituzione finale). L'apporto di questi luminari è stato determinante per la nascita della fotografia per come la intendiamo noi oggi, uno strumento che, arricchito dal concetto della prospettiva, si mostra probabilmente come la migliore sintesi della realtà.

2.1.1 LA FOTOGRAFIA

Oggi così come due secoli il principio alla base di uno scatto fotografico è rimasto totalmente invariato: un sistema di registrazione dell'immagine viene colpito dalla luce facendo sì che venga fissata un'immagine del mondo reale su di esso. Ovviamente siamo tutti consapevoli dell'enorme passo in avanti della tecnologia rispetto ai primi anni dell'ottocento, ma questi sviluppi non hanno mai intaccato la struttura principale degli strumenti; sono cambiati invece materiali e tutti gli altri elementi che ne perfezionano le potenzialità³⁵. Seguirà ora nelle righe successive una illustrazione di ciò che il reale funzionamento di una macchina fotografica, quali sono le sue componenti principali e che ruolo hanno nella procedura di cattura dei fotogrammi.

- *Camera oscura*: se si volesse fare un confronto con un edificio la si potrebbe paragonare alla sua struttura, quella che accoglie la luce al suo interno come le parti portanti di un'architettura accolgono i carichi a cui è sottoposta;

- *foro stenopeico*: si tratta un micro foro posto sulla camera ed è proprio grazie ad esso che la luce può penetrare al suo interno. Per incrementare la qualità del fotogramma oggigiorno è consuetudine inserire degli obbiettivi all'interno di questo foro così da massimizzare l'effetto della luce sul piano focale;

- *diaframma*: forse uno degli elementi principali dell'apparecchio, regola la quantità di luce in ingresso ed è collocato nell'obbiettivo;

- *otturatore*: strettamente legato con il diaframma dal momento che anch'esso ha a che fare con la luce, interviene gestendo i tempi di esposizione interrompendo l'ingresso della luce dopo un certo periodo di tempo;

- *supporto di registrazione*: la luce ingresso termina il suo tragitto su di esso, riproponendo l'immagine catturata. Si tratta dell'elemento che più ha subito sviluppi nel corso degli anni,

³⁵ FORTI G., *Teoria e pratica della reflex*, Reflex, Roma 2008, pp. 20-25

sviluppi che hanno decretato ufficialmente la digitalizzazione delle macchine fotografiche. È infatti proprio in questo passaggio che si individua il totale superamento della classica pellicola. Mentre prima si arrivava alla fotografia tramite una radiazione che veniva impressa su un elemento fotosensibile e trattata poi chimicamente per essere fissata, le tecniche odierne prevedono la conversione di impulsi luminosi in segnali di tipo elettrico, digitalizzando così il processo.

Ovviamente le operazioni compiute con la macchina fotografica sono sostanzialmente le stesse sia che si parli di quelle a sistema analogico sia nel caso di quelle digitali; resta quindi un'unica macro differenza: quella inerente la registrazione dell'immagine che avviene mediante due metodi diametralmente opposti.

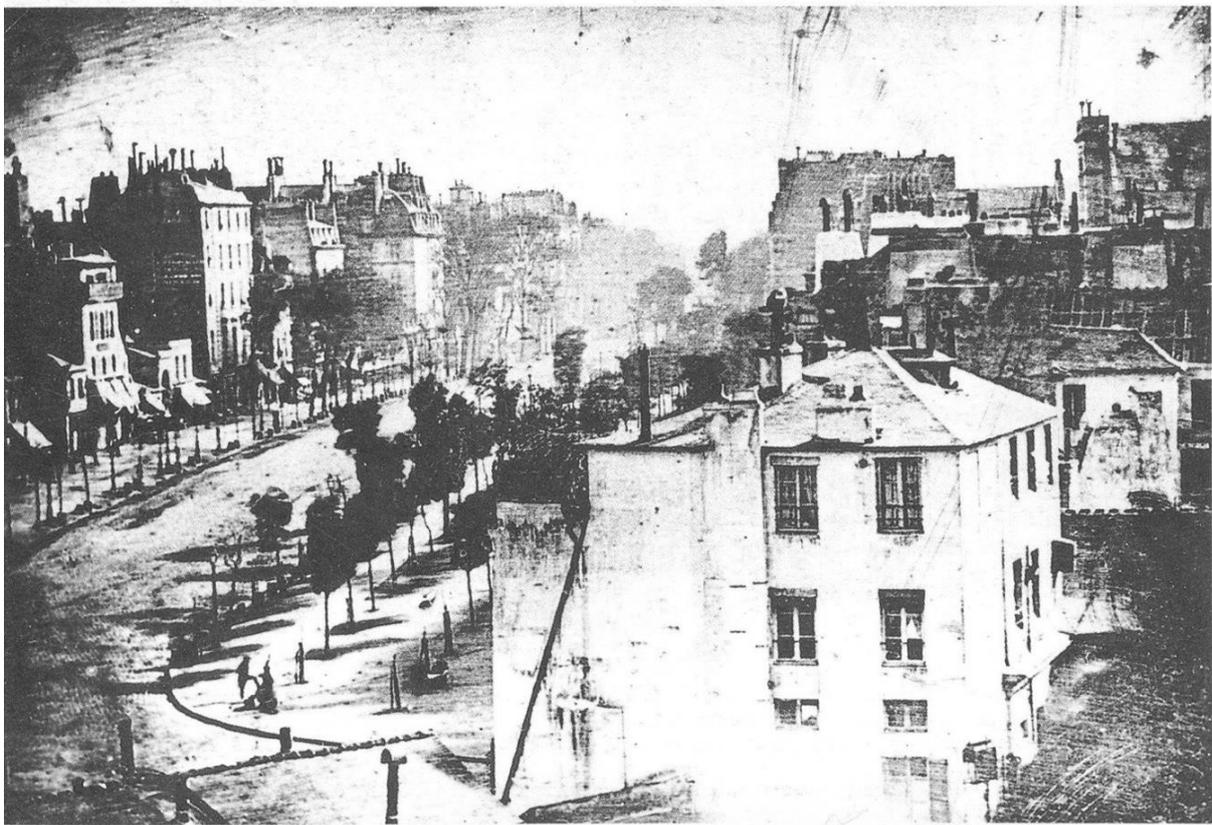


Fig. 11 - Zannier I., (1891). Parigi, Boulevard du Temple di cm 16,4 x 22,8.

2.2 LA FOTOGRAFIA NEL RILIEVO

Dopo questa introduzione al mondo della fotografia e al suo funzionamento si può quindi affermare che essa replica (o tenta di farlo) quelle che sono le attitudini dell'occhio umano. I nostri occhi, infatti, ci consentono di avere una visione *stereoscopica* di ciò che stiamo osservando, permettendoci così di poterne rilevare ed analizzare le misure e le caratteristiche degli oggetti che ci circondano. È proprio questo concetto che la fotografia (o nello specifico una prospettiva centrale) si propone di emulare: riprodurre le funzioni dell'occhio di uomo così da giungere al rilevamento delle misure della realtà. Questa visione stereoscopica nell'uomo è dettata dal fatto che egli ha la possibilità di poter osservare un elemento da due punti di vista, infatti, per quanto possa essere contenuta, la distanza tra i due occhi consente di allargare il campo visivo e ottenere una visione più globale dell'oggetto in questione.

Trasferendo questo discorso sulla fotografia ovviamente risulta necessario ottenere due fotogrammi dell'oggetto, catturati da due posizioni distinte, per restituire una visione stereoscopica tale da poterci suggerire spazialità e tridimensionalità di esso.

Tutte queste considerazioni culminano all'inizio del '900 quando, dopo anni di analisi e sperimentazioni, nasce la fotogrammetria, una disciplina che, servendosi del principio della prospettiva centrale, definisce un nuovo metodo di rilievo e misurazione³⁶. Nei paragrafi successivi verrà fatta distinzione tra la fotogrammetria tradizionale e quella digitale, quest'ultima figlia di un progresso scientifico che ne ha esaltato le potenzialità.

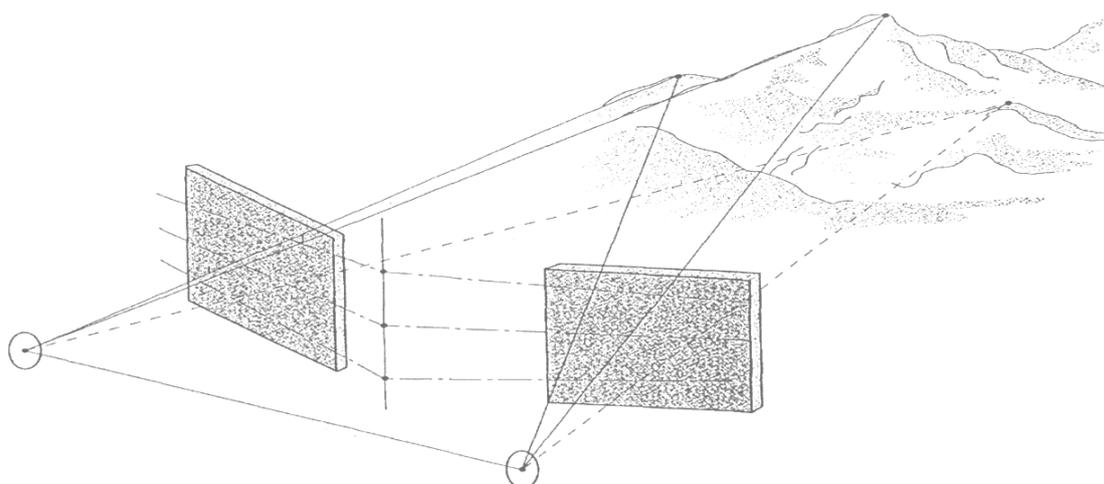


Fig. 12 - Selvini A., Guzzetti F. (2000). *Misurazione tridimensionale degli oggetti tramite doppia immagine prodotta dalla visione binoculare.*

³⁶ FONDELLI M., *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Laterza, Bari 1992, p. 11

2.2.1 LA PRIMA FOTOGRAMMETRIA

Quando si parla di fotogrammetria tradizionale si intende quella più convenzionale, detta anche stereoscopica, cioè quella che prevede una visuale virtuale nello spazio di un oggetto, partendo da un'osservazione di tipo binoculare di due fotogrammi. Ciò che viene restituito graficamente è un'immagine che rappresenta il modello stereoscopico, navigabile nella sua spazialità³⁷.

Il rilievo effettuato tramite la tecnica della fotogrammetria prevede due fasi principali: la prima che è detta fase di *ripresa* e la seconda che invece prevede la *restituzione*. Analizzando la fase di ripresa è necessario innanzitutto fare distinzione tra le varie tecniche di presa; esse infatti si suddividono in presa normale, presa inclinata e presa convergente. La differenza tra esse consiste sostanzialmente nell'inclinazione assunto dall'asse ottico rispetto alla superficie in esame. Nel caso della presa normale, l'asse viene considerato pressoché perpendicolare alla superficie. Si tratta del metodo generalmente più indicato in circostanze in cui la presenza di oggetti potrebbe ostacolare la presa delle superfici retrostanti (ad esempio se si considera la facciata di un edificio); nel secondo caso, invece, come suggerito dal nome stesso, l'asse presenta una certa inclinazione rispetto alla superficie; mentre nel terzo e ultimo caso ci troviamo in una condizione molto particolare poiché i due assi generati per la presa della superficie perdono il loro reciproco parallelismo (cosa che non succede per gli altri due metodi di presa) e convergono tra loro.

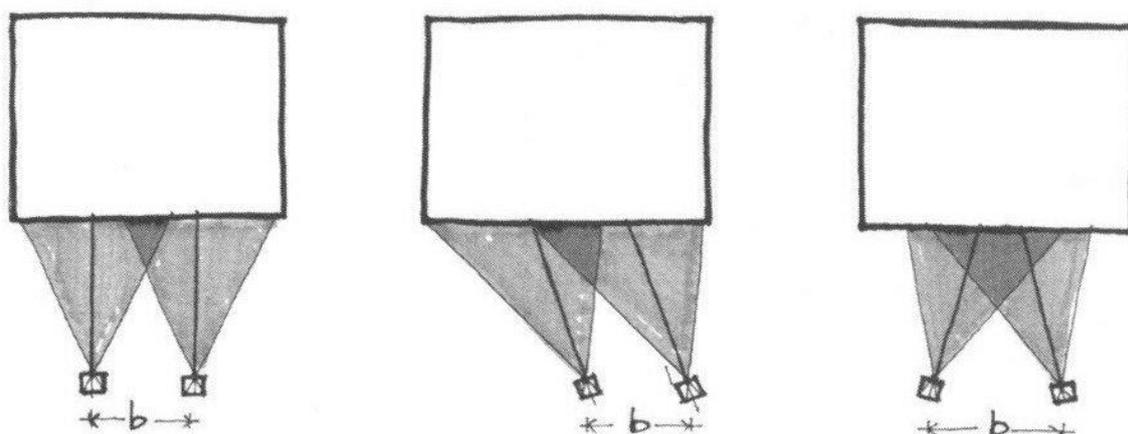


Fig. 13 - Bertocci S., Bini M. (2012). Schema raffigurante la presa fotogrammetrica normale, inclinata e convergente.

³⁷ FONDELLI M., *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Laterza, Bari 1992, pp. 15-17

Trattando il tema del rilievo fotogrammetrico non si può di certo tralasciare il concetto della scala del fotogramma, ossia il rapporto tra le dimensioni dell'immagine catturata e quelle effettive della realtà. Questo rapporto è individuato numericamente tramite il quoziente tra la *distanza focale* (distanza tra l'obiettivo e l'immagine virtuale) e la *distanza reale* (distanza tra l'obiettivo e l'oggetto). La formula matematica che lega questi ingredienti è la seguente: $1/s = d/D$, in cui la frazione a sinistra dell'uguale indica proprio il rapporto di scala effettivo.

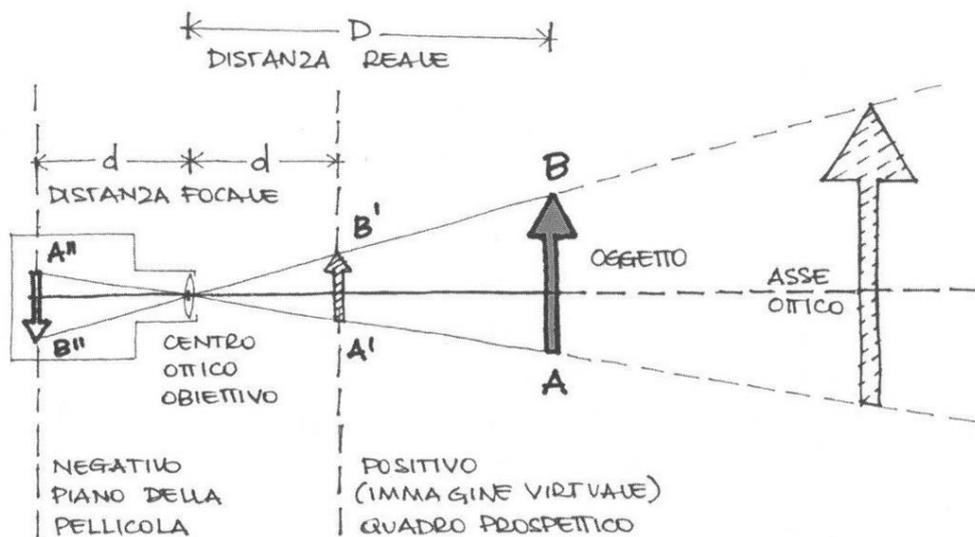


Fig. 14 - Bertocci S., Bini M. (2012). Schema raffigurante la correlazione tra distanza focale e distanza reale.

È a questo punto che interviene il terzo aspetto fondamentale per un rilievo fotogrammetrico: la *base di presa*. Si tratta della distanza che separa la posizione di presa in due scatti consecutivi e definisce quindi la sovrapposizione tra essi a partire dal campo visivo di ognuno di essi; minore sarà questa distanza, maggiore sarà la sovrapposibilità per la restituzione finale. Questo concetto appena esposto ci suggerisce quindi che una corretta distanza tra le varie prese consecutive determina la possibilità di rilevare in maniera semplice e immediata un oggetto nella sua interezza, senza dover ricorrere a innumerevoli modelli stereoscopici. Gli studi e gli esperimenti effettuati sul campo hanno fatto emergere alcuni range entro i quali collocarsi al fine di ottenere un'esatta restituzione; in particolare i dati raccolti indicano che la restituzione di un buon rilievo prevede che la base di presa sia compresa tra una percentuale che oscilla tra il 15% e il 33% calcolata sulla distanza reale D sopra descritta³⁸.

Una volta delineate queste indicazioni di tipo tecnico-numerico utili per una corretta restituzione, è ora però necessario definire un quadro di riferimento in merito alle differenti tipologie restituzioni fotogrammetriche. È possibile distinguere tre differenti metodi: quella di

³⁸ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, pp. 105

tipo *speditiva*, quella *analogica* e quella *analitica*. Fatta eccezione per la prima casistica che è determinata a partire da semplici soluzioni grafiche, per quanto riguarda le altre due c'è da tener conto dell'intervento di ulteriori strumenti che possono essere di tipo sia ottico che meccanico, ossia gli stereorestitutori³⁹. Detti anche stereocomparatori, essi consentono di ottenere le esatte coordinate spaziali a partire da due fotogrammi. In particolare il principio che ne regola il funzionamento prevede una ricostruzione virtuale delle posizioni delle camere nel momento in cui sono stati catturati i fotogrammi (questo grazie a un sistema di orientamento di cui dispongono), così da ricostruire il tragitto effettuato dai raggi proprio a partire dai fotogrammi stessi. Nell'ipotesi di stereorestitutori di tipo analogico, l'apparecchio è in grado di riproporre i raggi proiettanti sia per via meccanica sia per via ottica. In alternativa, quando parliamo di stereorestitutori di tipo analitico, siamo nel caso di un apparecchio senza dubbio simbolo del passaggio alla digitalizzazione (che come vedremo culminerà con la fotogrammetria digitale) poiché esso è basato su un sistema di calcolo numerico che, una volta definite le coordinate dei punti sulle prese fotogrammetriche, trasmette le misurazioni ad un computer che le recepisce e le elabora⁴⁰.

Abbiamo quindi presentato qui le caratteristiche della fotogrammetria tradizionale, segnata senz'altro da aspetti ancora lontani dall'evoluzione tecnologica che ora verranno però presentati qui di seguito a proposito della fotogrammetria digitale.

2.2.2 L'EVOLUZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA

Un solco profondo che segna il vero e proprio passaggio all'era della digitalizzazione nel campo della fotogrammetria si ha a partire dai primi anni del 2000, momento in cui cambia totalmente il sistema di elaborazione e acquisizione dei dati; nasce una nuova tipologia di rilievo fotogrammetrico che prevede soluzioni e strumenti in grado di offrire interi modelli tridimensionali degli oggetti rilevati. Si intuisce quindi immediatamente la portata di una rivoluzione così marcata, novità che aprono ad un mondo nuovo, non solo nell'ottica del recupero del patrimonio, ma del rilievo in generale.

³⁹ FONDELLI M., *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Laterza, Bari 1992, pp. 75-80

⁴⁰ Ivi p. 82

I primi risultati significativi all'interno del processo evolutivo di cui la fotogrammetria è stata protagonista si sono avuti quando alcune innovazioni hanno reso possibile ridurre notevolmente i tempi di elaborazione, senza però intaccare la precisione dei risultati. Tutto ciò è avvenuto grazie all'introduzione della *visione artificiale*, ossia tutto l'insieme di meccanismi e processi tali a ricostruire un modello approssimativo della realtà a partire da immagini bidimensionali o digitalizzate. Simultaneamente, la nascita di nuove apparecchiature ha portato anche la definizione di nuove tecniche di rilievo. È questo il caso della *UAV⁴¹ Photogrammetry* che, servendosi delle prese fotografiche aeree, ha ridotto ulteriormente i tempi necessari per un rilievo (all'incirca bastano meno di dieci minuti per oltre un ettaro di terreno), inoltre tagliando drasticamente i costi (in passato era necessario impiegare elicotteri o addirittura aerei equipaggiati con l'attrezzatura opportuna). L'aspetto fondamentale da non trascurare è che tutto l'insieme di queste nuove tecniche non trascuri mai la cura del risultato finale; come nel caso dello UAV, l'accuratezza nella restituzione finale è un particolare di primo piano, non subordinato o sacrificato in nome di tempistiche contenute. Anzi, in questo caso si tratta di apparecchiature che rendono possibile l'indagine di aree altrimenti inaccessibili, evidenziando anche i minimi dettagli con estrema qualità.

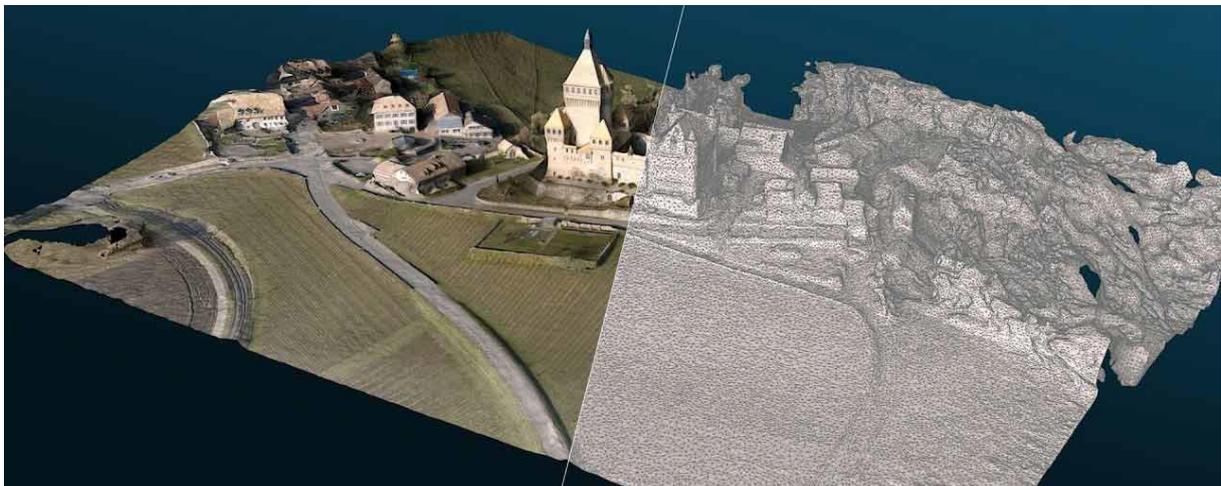


Fig. 15 - Rappresentazione di una restituzione di rilievo fotogrammetrico.

Insieme all'apparato della strumentistica, negli anni si è sviluppato anche un nuovo modo di approcciarsi a queste apparecchiature da parte dell'utente. Si è cercato sempre più di trovare soluzioni via via sempre più efficaci ma anche semplici, che potessero orientare il suo lavoro nella giusta direzione. Alcune di queste soluzioni sono le seguenti: la *Structure From Motion* e

⁴¹ *Unmanned Aerial Vehicle*: si tratta di velivoli in grado di alzarsi in volo e controllati da remoto.

il *dense matching*. In merito alla prima delle due c'è da sottolineare che si tratta di una tecnica utile alla ricostruzione di un ambiente tridimensionale, partendo dal presupposto che non si hanno dei parametri per orientarsi all'interno della camera. Essa si basa quindi sull'associazione di differenti immagini consecutive che presentano punti di vista differenti, il tutto per arrivare ad un'esatta ricostruzione della scena in esame. Invece per quanto riguarda la seconda tecnica, essa prevede la ricostruzione del modello a partire dalla generazione di una nuvola di punti⁴². Nelle righe precedenti sono state descritte le principali novità che hanno segnato il mondo della fotogrammetria e che ne hanno decretato il suo effettivo passaggio alla digitalizzazione. A tal proposito seguono ora nei paragrafi successivi due innovazioni dal peso specifico senza dubbio importante che si sono affermate nell'ultimo ventennio: il cosiddetto *image matching* e l'impiego degli ormai famosissimi *droni*.

L'IMAGE MATCHING

Abbiamo già accennato anche in precedenza che la ricostruzione tridimensionale di un oggetto o un ambiente è possibile tramite la capacità di individuare gli stessi punti in molteplici prese fotogrammetriche catturate consecutivamente. In origine queste operazioni erano effettuate manualmente nel caso della fotogrammetria di tipo analogica e analitica, mentre in un secondo momento si è passati a modalità semi-automatiche o interamente automatiche nel caso della fotogrammetria digitale. Un primo vero approccio alla correlazione delle immagini si hanno già a partire dalla seconda metà del '900 quando, grazie all'introduzione di nuove apparecchiature di interpolazione ottica associati al processo di restituzione, è stato possibile raggiungere il target prefissato: la ricerca automatica di punti analoghi in coppie di fotogrammi⁴³. Il principio alla base del loro funzionamento era "semplice", ossia mettere in relazione strisce contigue ortoproiettate con il fine di non spezzare la continuità degli elementi in fase di restituzione.

Non sono passati chissà quanti anni da quando l'*image matching* muoveva i suoi primi passi, eppure i risultati ottenuti in così poco tempo mostrano numerose novità in termini di sviluppo e soprattutto lasciano presagire innovazioni sempre più performanti. Il procedimento della correlazione ha fatto sì che l'elaborazione digitale delle immagini si sia evoluto in qualcosa che oggi sia facilmente applicabile e replicabile; si tratta di una tecnica su cui numerose tipologie di restituzioni fotogrammetriche poggiano le proprie fondamenta.

⁴² ALICANDRO M., *Geomatics research*, 2017, p. 42

⁴³ CHIABRANDO F., COSTAMAGNA E., SPANÒ A., *Territorio Italia*, 2013, pp. 55-65

Questa correlazione delle immagini procede mediante tre differenti metodi di calcolo che prevedono un relativo grado di accuratezza a seconda di quale viene impiegato. Le tre tecniche sono: l'*area based matching*, il *feature based matching* e il *relational matching*. Nel primo caso si tratta sostanzialmente di una comparazione tra le tonalità di grigio presenti in aree analoghe di immagini differenti; nel secondo caso parliamo invece di un metodo che procede tramite l'indagine di linee, punti, angoli, o qualsiasi altra traccia di tipo grafico presenti in immagini simili; nel terzo e ultimo caso vengono invece riscontrate analogie più generali di tipo geometrico per poter rispondere alla correlazioni delle immagini.

Tra tutti è il primo dei tre metodi quello ad essere maggiormente diffuso nella fotogrammetria. I calcoli che vengono effettuati basano il loro procedimento tramite una sorta di scala della somiglianza tra immagini; esse vengono comparate a partire dall'analisi dell'*areola*, ossia un certo intorno del pixel che permette quindi il confronto. Possiamo sintetizzare il concetto dicendo che l'algoritmo individua un pixel di coordinate note e definisce una sezione dell'immagine intorno ad esso per effettuare le successive analisi.

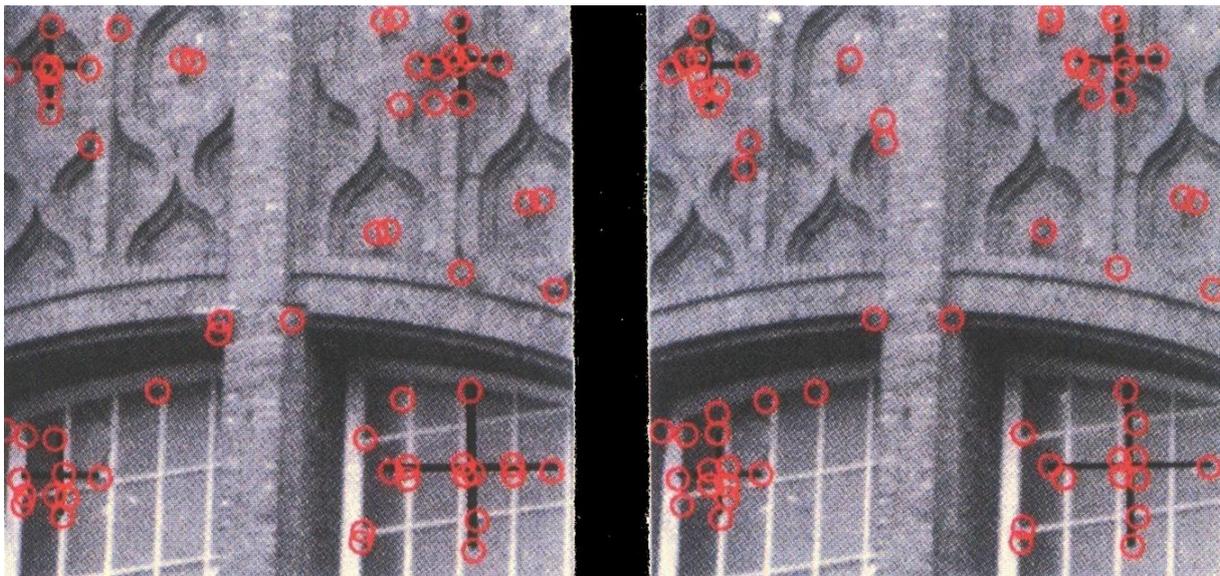


Fig. 16 - Monti C., Selvini A (2015). Omparazione delle areole.

Il secondo step prevede invece che questa sezione (che possiamo definire *frame*) venga confrontata con ulteriori sezioni della seconda immagine, questo fino a quando l'algoritmo avrà individuato due frame compatibili e si potrà quindi determinare il pixel corrispondente delle due immagini esaminate⁴⁴. Una volta spiegato il procedimento resta tuttavia da porre

⁴⁴ MONTI C., SELVINI A., *Topografia, fotogrammetria e rappresentazione all'inizio del ventunesimo secolo. Strumenti e modalità operative*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna 2015, p. 270

l'attenzione su alcuni particolari che possono incidere fortemente sul risultato finale. È questo il caso dell'areola sopra citata, più nello specifico delle sue dimensioni. Infatti la scelta della grandezza dell'intorno del pixel ha un peso notevole sulla restituzione: un'areola di dimensioni eccessive favorisce l'approssimazione di alcuni particolari, mentre una eccessivamente piccola rischia di essere non abbastanza significativa per effettuare la correlazione dei frame.

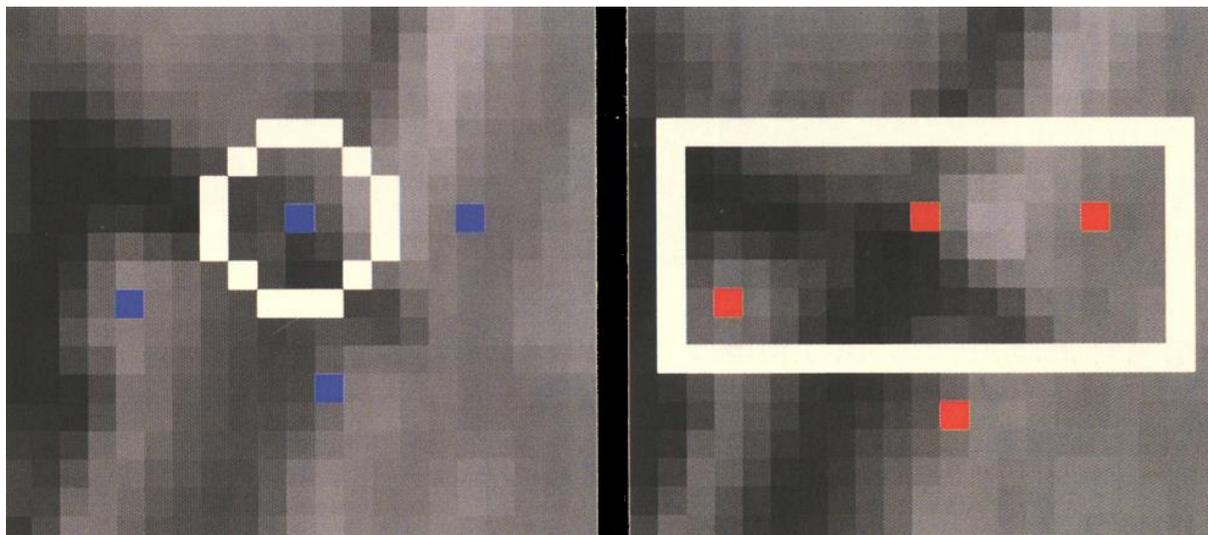


Fig. 17 - Monti C., Selvini A (2015). *Omparazione delle areole.*

Alla luce di queste accortezze si può senz'altro dedurre la portata di un'innovazione così grande all'interno del mondo del rilievo; in pochi secondi, grazie all'image matching, è possibile effettuare correlazioni di immagini in maniera totalmente automatica (e ottenere modelli tridimensionali con un grado di dettaglio elevatissimo), operazioni che fino a pochi anni fa erano eseguite direttamente dall'uomo.

I DRONI

Restando in tema di innovazioni di un certo calibro, non si può non tenere in considerazione i cosiddetti aerei a pilotaggio remoto, noti più comunemente con il termine droni. Si tratta di strumenti che hanno letteralmente rivoluzionato il campo del rilievo, in particolare quello della aerofotogrammetria. Soprattutto nell'ultimo decennio è andato scemando sempre più l'impiego dei consueti aerei per rilievi a grande scala (nonostante essi restino ancora fondamentali quando parliamo di rilevamenti che interessano aree davvero molto grandi), questo grazie

all'introduzione sul mercato di apparecchi aeromobili pilotati a distanza in grado di scattare fotografie e catturare immagini a distanza; essi vengono chiamati *Unmanned Aerial Vehicle*. In questa categoria rientrano tutti quei velivoli che non prevedono la presenza dell'uomo a bordo, pilotati quindi direttamente da terra da remoto: elicotteri, aerei e multi rotor, ciascuno di essi con le proprie specifiche tecniche. Nel settore della fotogrammetria quelli maggiormente utilizzati sono i multi rotor, apparecchi simili agli elicotteri per principi di volo e funzionamento, ma che si differenziano da essi per il numero eliche di cui sono equipaggiati in quanto i multi rotor ne prevedono generalmente quattro (quadricotteri), sei (esacotteri), o otto (ottocotteri)⁴⁵. Senza soffermarci troppo sulle componenti dei velivoli e sulle loro funzioni, ci contreremo invece nelle righe seguenti sulle possibilità di controllo in merito al volo che l'uomo ha su di essi. È possibile infatti fare una distinzione che prevede da una parte il *volo programmato*, dall'altra il *volo manuale*. Nella prima ipotesi si tratta di una sorta di percorso già programmato apriori per il drone, ossia, a partire da un punto di controllo (stazione), viene stabilita una serie di checkpoint che l'apparecchio potrà raggiungere in maniera del tutto automatica; diversamente, nel secondo caso, si tratta di un volo gestito interamente a distanza tramite un telecomando⁴⁶.

È evidente come soprattutto nella prima casistica ci si trovi nella condizione in cui, anche se non si è in grado di pilotare manualmente lo strumento, ciò non rappresenta un ostacolo ai fini del rilievo. Acquisendo dimestichezza nella *flight planning* (programmazione dei voli) si sconfinava in una realtà effettiva nella quale l'unico compito che resta all'uomo (durante la fase di volo) è quello di controllare che il drone esegua le operazioni programmate in precedenza. Ovviamente, nel caso di imprevisti o mal funzionamenti dell'apparecchio, l'utente dovrà essere pronto ad intervenire tempestivamente tramite il controllo remoto.

L'aiuto di una tecnologia come quella dei droni non può però andare a ricoprire l'intera attività del rilievo e le informazioni ad esso necessarie; ci sarà sempre la necessità di misurazioni prese sul campo, dal momento che le sole immagini che il drone avrà catturato non basteranno per giungere ad una restituzione efficace poiché mancherà in ogni caso una base topografica.

Come abbiamo già visto nei paragrafi precedenti, grazie ai diversi software presenti oggi sul mercato e grazie alle apparecchiature ad essi associati, è possibile elaborare modelli tridimensionali in brevissimo tempo e con un elevato grado di dettaglio a partire da semplici immagini; tuttavia in assenza di misure topografiche anche il miglior modello perderebbe di attendibilità. Si ribadisce quindi ancora una volta il ruolo fondamentale del rilevatore

⁴⁵ DOMINICI C., *Micro UAV for post seismic hazards surveying in old city center of L'Aquila*, 2012.

⁴⁶ DOMINICI C., *Micro UAV for post seismic hazards surveying in old city center of L'Aquila*, 2012.

nonostante gli enormi vantaggi che la tecnologia suggerisce. Sarà sempre indispensabile un'attività preliminare da parte sua, che consiste nel dislocare dei target in prossimità di alcuni punti noti, nonché il rilevamento di tutte le misure necessarie.

Gli aeromobili a pilotaggio remoto hanno aperto un nuovo capitolo nel mondo del rilievo per l'architettura, semplificandone alcune dinamiche, soprattutto nei casi in cui non vi era possibilità di accesso o in situazioni di estrema difficoltà; siamo davanti ad un perfetto esempio di evoluzione tecnologica con risultati estremamente positivi.



Fig. 18 - Docci M., Maestri D. (2009). Duomo di Modena. Rilevamento fotogrammetrico della facciata..

3. IL LASER NEL RILIEVO

3.1 DEFINIZIONE E PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

La definizione di laser è riconducibile all'acronimo inglese “**Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation**” (luce amplificata attraverso l'emissione stimolata di radiazioni). L'incipit si ha a partire dai primi anni del '900, momento nel quale la ricerca scientifica giunge alla conclusione secondo cui è possibile che un atomo, colpito da una radiazione, possa emettere una radiazione identica a quella di partenza⁴⁷.

Questo tipo di scoperta fa il suo ingresso nel mondo dell'architettura, o meglio ancora nel campo del rilevamento, alla fine del XX secolo, quando avviene una vera e propria rivoluzione dell'idea stessa di rilievo. Due scienziati americani, che si occupano appunto dello studio di raggi laser, intuiscono la possibilità di utilizzare questi dispositivi nel rilievo di una raffineria di petrolio; realizzano quindi un'apparecchiatura basata sull'emissione di impulsi luminosi che, una volta raggiunta la superficie in questione, ne avrebbe registrato le coordinate spaziali.

È in questa occasione che il laser scanner, per come lo intendiamo noi oggi, inizia a muovere i suoi primi passi. Si afferma man mano una sempre crescente consapevolezza delle opportunità che questo tipo di scoperta porta con sé. Da quell'istante, infatti, sono diverse e numerose le aziende che si dedicano alla produzione di strumentazioni per il rilevamento territoriale e architettonico⁴⁸.

Come accennato in precedenza, quindi, i principi fisici che ne caratterizzano il funzionamento si basano sull'immissione di energia all'interno di un *diodo* che, una volta sollecitato, rilascia un raggio laser. Gli aspetti fondamentali che rendono perfetto questo sistema per un impiego come quello del rilievo sono sostanzialmente tre: il fatto che i raggi emessi possono essere considerati tutti paralleli tra loro (**unidirezionalità**); che esso presenti una lunghezza d'onda costante (**monocromaticità**); che tutte le onde emesse sono sempre in fase (**coerenza**⁴⁹). Alla luce di queste sue proprietà, il raggio laser mantiene attive le sue caratteristiche in tutto il suo tragitto, fino al momento dell'impatto con la superficie opaca in esame che, riflettendolo,

⁴⁷ BORNAZ L., “Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione”, 2006, pp. 2-9

⁴⁸ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, p. 219

⁴⁹ «Si considerano due sorgenti puntiformi identiche e si suppone che emettano onde continue; in tutti i punti dello spazio le intensità delle due onde saranno nel tempo costantemente le stesse. Le due sorgenti si diranno *coerenti* tra loro.». BARTOLUCCI D., *Principi di laser scanning 3D*, Dario Flaccovio, Palermo 2009, p. 12

consentirà al raggio di tornare indietro, seppure con una possibile ridotta intensità. Il diodo quindi costituisce l'elemento imprescindibile del raggio laser, colui che, sollecitato con energia elettromagnetica, rende possibile l'emissione di successive onde elettromagnetiche, ad impulsi o non, a partire da particelle presenti al suo interno (allo stato solido, liquido o gassoso).

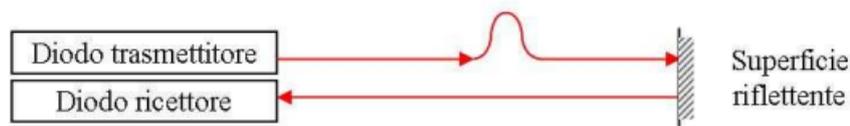


Fig. 19 - Bornaz L., (2006). Schematizzazione di misurazione di distanza a impulso.

Si intuisce, quindi, che i rilevamenti architettonici basati su tecnologie interamente digitali consentono di raccogliere un numero elevatissimo di misure in tempi molto rapidi rispetto al passato. Il campo del rilievo è stato totalmente ribaltato, dal momento che tutte le operazioni di discretizzazione dell'architettura, che un tempo costituivano la fase iniziale e imprescindibile dell'intervento, vengono ora rimandate a posteriori. I laser scanner catturano ogni tipo di dato a loro disposizione, senza tenere conto ovviamente di quelli strettamente utili ai fini del rilievo; spetterà poi, a colui che lo effettua, adoperare le opportune scelte e sintesi. È proprio da quest'ultimo punto che emerge un secondo ed altrettanto importante aspetto, vale a dire quello inerente la figura del rilevatore. Se da un lato è pur vero che attraverso queste nuove tecniche la sua attività sul campo è circoscritta al controllo e alla gestione degli strumenti, sarebbe tuttavia un errore pensare che il suo ruolo abbia meno rilevanza rispetto al passato, quando si procedeva principalmente tramite rilievo diretto o fotogrammetrico. L'approccio a questo tipo di attività richiede non solo la conoscenza delle specifiche tecniche ed operative degli strumenti, ma anche una pianificazione ben strutturata, e ovviamente delle basi opportune, per poter trattare i dati in uscita nella maniera più consona e corretta⁵⁰.

Le operazioni di discretizzazione dell'architettura, che intercorrono tra la fase di presa e la restituzione, vengono effettuate sulla *nuvola di punti* in cui l'architettura rilevata viene analizzata e scomposta. Trascurandone momentaneamente la discontinuità mediante una riduzione di scala, la sua densità consente immediatamente di avere un riscontro tridimensionale del rilievo effettuato, all'interno del quale è possibile "navigare" ed apportare le giuste operazioni.

⁵⁰ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 170

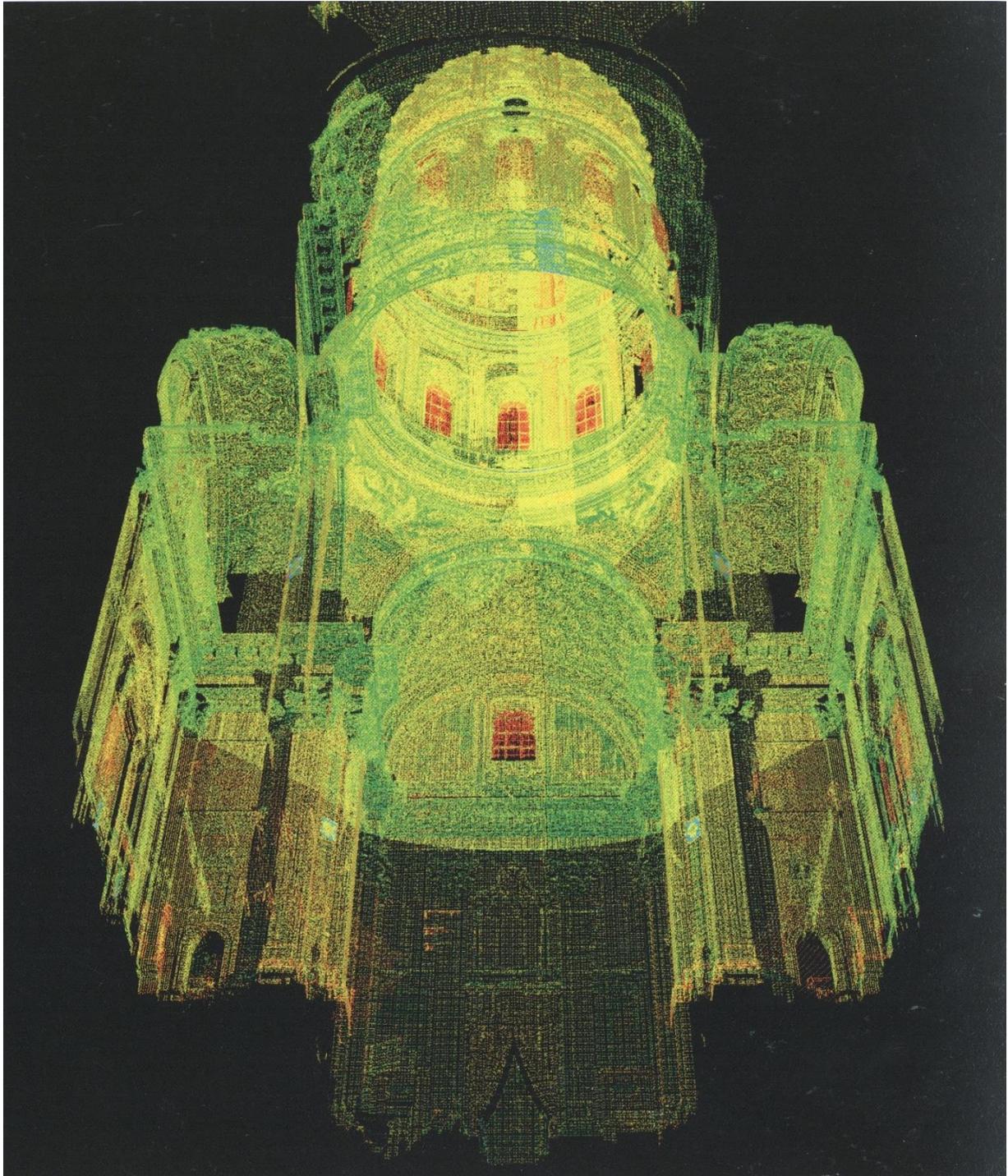


Fig. 20 - Docci M., Maestri D. (2009). Nuvola di punti orientata dell'interno della chiesa di San Carlo ai Catinari in Roma. Rilevamento C Bianchini, A. Ippolito.

La procedura che utilizza questi sistemi di rilevamento è definita *laser scanning* e, ad oggi, può considerarsi come la tecnica più efficace e precisa per la restituzione del “vero”, offrendo la possibilità di misurare ogni tipo di oggetto, a prescindere dalle sue dimensioni e dalla forma.

Vengono descritte nelle pagine successive i principi e le caratteristiche alla base delle differenti tipologie di laser scanner. Oggigiorno è possibile trovarne in commercio una significativa varietà; come vedremo, i più comuni, nonché i più efficaci, sono i cosiddetti laser scanner a *tempo di volo* (Time of flight – TOF) e quelli che procedono mediante misurazioni per *triangolazione*. Si tratta di due apparecchiature per molti versi analoghe, ma che differiscono in merito al trattamento dei dati.

L’insieme di tutte queste apparecchiature che non prevedono un contatto diretto con l’oggetto da rilevare rientrano nella più ampia categoria denominata *range camera*. Questo apparato di sistemi prevede un ampio ventaglio di impieghi, in relazione alla tecnologia offerta da ciascuno di loro. Si spazia da rilievi a distanza dell’ordine di qualche centimetro fino a punti distanti chilometri⁵¹.

⁵¹ MIGLIARI M., *Frontiere del rilievo – Dalla matita alle scansioni 3D*, Giangemi, Roma 2002, p. 65

3.2 TIPOLOGIE DI STRUMENTAZIONI

Per una esatta comprensione delle tecniche del rilevamento di tipo digitale, nello specifico quelle attinenti il laser scanner, è opportuno effettuare una breve sintesi del panorama tecnologico e delle soluzioni maggiormente utilizzate; risulta fondamentale un'opportuna conoscenza di esse affinché si possa comprendere quali siano le ragioni di un loro impiego da parte del rilevatore, quindi intuire le motivazioni che portano a determinare una scelta piuttosto che un'altra.

Vengono qui riportate le proprietà delle singole apparecchiature, soffermandoci sulle caratteristiche tecniche proprie di ciascuna tipologia, fattore che più di tutti ha un peso maggiore nella decisione del tipo di rilievo da effettuare.

3.2.1 SISTEMI A CONTATTO

Quando si parla di “sistemi a contatto”, stiamo indicando una tecnica di rilievo digitale nella quale la misurazione del singolo punto, e quindi della sua posizione spaziale, avviene per contatto diretto con lo strumento adoperato. Ciò comporta ovviamente dei vincoli, uno su tutti quello relativo alla possibilità materiale di raggiungere fisicamente l'oggetto da rilevare.

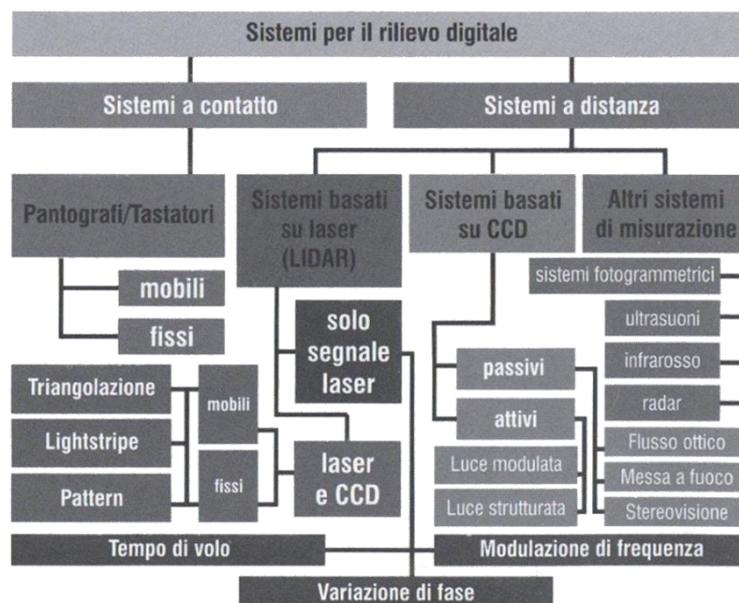


Fig. 21 - Bertocci S., Bini M. (2012). Schema generale delle strumentazioni per il rilievo terrestre digitale.

In questa categoria di strumenti rientrano i cosiddetti *tastatori*, come ad esempio il pantografo digitale; si tratta di un tipo di strumento tra i meno recenti e che, proprio alla luce delle sue caratteristiche legate al contatto diretto, rappresenta l'unico caso di rilievo digitale in cui risulta necessaria l'effettiva programmazione di ciò che si andrà a misurare, questo perché risulterebbe impossibile ed insensato che l'operatore rilevi un numero indefinito di punti.

Un corretto approccio in merito è quello che prevede un procedimento per linee guida o tramite sezioni, altrimenti, all'occorrenza, anche una combinazione di entrambe. Vengono individuate sull'oggetto dei tratti specifici, o "linee caratterizzanti", tali da definire tra loro superfici quanto più analoghe ed uniformi, così da poter effettuare delle sezioni in cui l'oggetto viene scomposto in parti ed elementi più semplici, generalmente rappresentabili tramite un programma CAD⁵².

È possibile distinguere i tastatori in due categorie in base al loro possibile utilizzo: i tastatori *automatici*, caduti ormai in disuso a causa degli eccessivi costi e delle eccessive dimensioni; i tastatori *a braccio*, oggi giorno ampiamente diffusi.

Nel caso degli automatici si parla di uno strumento caratterizzato da un notevole ingombro e quindi anche difficilmente trasportabile; esso è costituito da un vano dalle dimensioni significative con un piano basculante che funge da appoggio e inoltre prevede una sorta di braccio che si muove lungo tre assi in grado di raggiungere qualsiasi punto all'interno del vano. L'oggetto è posto quindi dentro questo macchinario che procede a toccare l'oggetto con un passo ben preciso. La precisione è tale da tralasciare il fatto che si tratti di uno strumento poco versatile, in ogni caso concepito per misurare oggetti facilmente spostabili e posizionati su un piano. L'unico vincolo "materiale" resta la sua mole imponente, fattore che ha portato ad un suo progressivo minore impiego.

Per quanto riguarda invece il caso dei tastatori a braccio, si tratta di uno strumento che prevede una base come appoggio principale e delle aste con degli snodi posti nelle estremità, ossia alla base, al centro, e in occasione della punta che andrà poi a toccare l'oggetto da rilevare. Il sistema viene poi collegato ad un computer, in modo tale che quest'ultimo possa elaborare ed archiviare i dati man mano raccolti. La precisione dei dati rilevati con questo tipo di apparecchiatura si attesta tra 1 e 5 mm, ma restano validi anche in questo caso i limiti soprattutto spaziali che un macchinario del genere richiede. Tuttavia, diversamente dal caso precedente, i costi risultano essere notevolmente contenuti.

⁵² BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 183

3.2.2 SISTEMI A DISTANZA

Come già accennato nei paragrafi precedenti, tutti i sistemi e le apparecchiature che non prevedono un contatto diretto con l'oggetto da rilevare procedono alla misurazione mediante laser o luce strutturata. Riprendendo quindi il concetto di *range camera*, è necessario aggiungere alcune informazioni e caratteristiche proprie di questa categoria che risultano di fondamentale importanza; se infatti da un lato con questa espressione indichiamo tutti quegli strumenti in grado di omettere il contatto con l'oggetto, dall'altro non si può dimenticare il fatto che si tratta di apparecchiature in grado non solo di riproporre un'immagine dell'oggetto stesso, ma elaborare un modello 3D a partire dal vero.

Nelle pagine seguenti andremo quindi ad analizzare le principali caratteristiche delle differenti apparecchiature che si servono di sistemi di misurazione a distanza, sottolineandone le peculiarità e mostrandone i casi di impiego più frequenti.

LASER SCANNER A TEMPO DI VOLO

Tecnica ampiamente diffusa al giorno d'oggi, il "tempo di volo" (o TOF) ha spinto la ricerca scientifica ad affinare e rendere sempre più preciso questo tipo di sistema, cosicché numerose aziende hanno investito, e stanno investendo, in questo settore. Si tratta di uno strumento tale da poter acquisire ingenti quantità di punti in tempi molto brevi, realizzando così una nuvola tridimensionale di ciò che si desidera rilevare, sia questa una chiesa, un monumento o qualsiasi altro oggetto che abbia necessità di essere rilevato.

Questo tipo di apparecchiatura è costituita da un diodo, dal quale parte l'impulso luminoso, ed una serie articolata di specchi che rende possibile lo spostamento del raggio laser lungo linee ideali verticali con un passo prestabilito che varia da 3 mm fino a pochi centimetri.

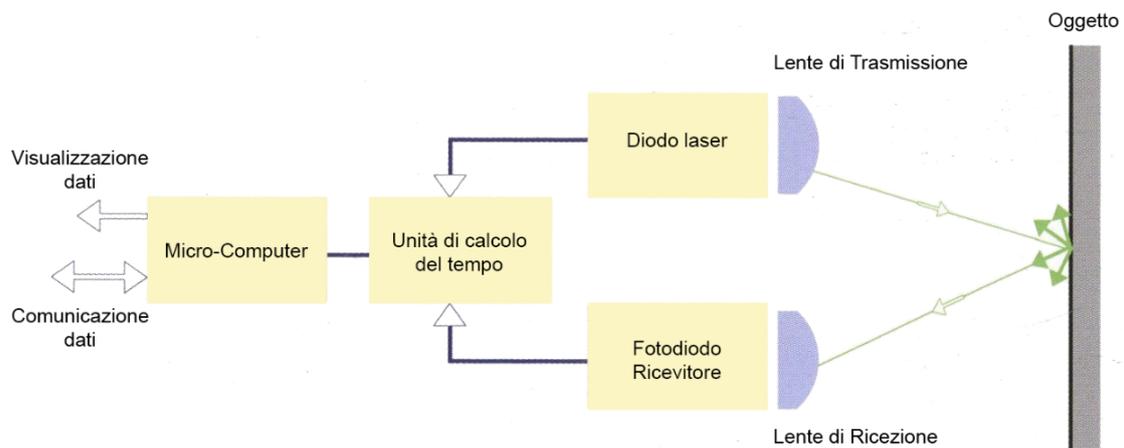


Fig. 22 - Docci M., Maestri D. (2009). Schema di funzionamento di un laser scanner 3D a tempo di volo.

Ultimata la scansione lungo una di queste linee verticali, lo strumento compirà la stessa operazione su un'altra linea parallela a quella precedente; la distanza che intercorre tra una linea e l'altra è generalmente stabilita dall'operatore ed è circa pari a quella che separa due impulsi consecutivi lungo la stessa la linea, così da generare una sorta di maglia regolare quadrata.

Il principio che ne regola il funzionamento è molto immediato e intuitivo: il laser scanner colpisce con un raggio l'elemento che si desidera rilevare e una parte di esso (in base alla **riflettanza**⁵³) torna verso l'apparecchio che ne recepisce il segnale. La distanza che intercorre tra i singoli punti rilevati e lo strumento viene poi calcolata semplicemente tramite la legge fisica che mette in correlazione velocità, tempo e spazio, dove quest'ultimo sarà quindi pari al prodotto tra il tempo necessario affinché il raggio di ritorno colpisca lo strumento e la velocità della luce, il tutto diviso due (altrimenti lo spazio sarebbe doppio, considerando sia quello relativo all'andata sia quello del ritorno). La successiva elaborazione dei dati effettuata dall'apparecchiatura avviene quindi a partire dalla distanza nota di ciascun punto e dall'angolo zenitale e azimutale del laser, così da giungere all'esatta posizione spaziale del punto rilevato; il software infatti tradurrà queste informazioni in coordinate cartesiane aventi come origine il centro dello strumento⁵⁴. Segue poi una prima rappresentazione all'interno di uno spazio digitale 3D. Si tratta di apparecchiature di estrema precisione, si pensi che la luce ad impulsi emessa dal laser trasla all'incirca di trenta centimetri ogni nanosecondo; ne consegue che il sistema di temporizzazione utilizzato per calcolare il tempo necessario al laser per completare andata e ritorno non può che essere estremamente preciso⁵⁵.

Oltre i principi che ne caratterizzano la metodologia di misurazione, i laser scanner a tempo di volo possono anche essere ulteriormente suddivisi in due macro categorie, da una parte quelli a campo di ripresa fissa, dall'altra gli scanner panoramici. Per quanto riguarda la prima tipologia, si tratta di una tecnologia che prevede l'acquisizione di tutti i punti che rientrano all'interno di un certo volume di forma piramidale con base quadrangolare e che ha come vertice proprio lo scanner; la scansione dei punti avviene quindi secondo due angoli di norma uguali, quello di campo verticale e uno orizzontale. Nel secondo caso, invece, innanzitutto parliamo di una categoria che comprende la quasi totalità dei laser scanner attualmente utilizzati. Questo perché i sistemi panoramici offrono la possibilità di effettuare una presa ad

⁵³ «Con il termine riflettanza si indica la quantità di energia che un determinato punto di una superficie, colpito da un raggio luminoso, rinvia nello spazio in tutte le direzioni. Tra i vari raggi riflessi, uno ritorna all'interno del laser scanner, consentendo allo strumento di misurarne l'intensità; tale valore può essere associato al punto rilevato, come ulteriore informazione rispetto alle sue coordinate.». DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, p. 225

⁵⁴ Ivi, p. 220

⁵⁵ BERTOCCHI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 191

angolo giro, resa possibile dallo spostamento motorizzato dell'apparato di misurazione. Tale dinamica porta quindi all'acquisizione di punti interni ad un volume dettato dalla rotazione, secondo uno o due assi, dell'angolo di presa. Da questo procedimento ne risulta una più o meno completa presa di tutto l'ambiente circostante, fatta eccezione per quei punti inevitabilmente compresi nelle zone di occlusione e di angoli inferiori, zone generalmente corrispondenti allo spazio in relazione del cavalletto che sorregge l'intera strumentazione.

In entrambi i casi il risultato finale sarà una nuvola densa di punti, con caratteristiche geometriche e cromatiche distinte, che costituirà la base su cui andare ad elaborare successivi modelli tridimensionali, sezioni e altre operazioni desiderate. Si tratta di strumenti che nonostante non offrano una particolare velocità nelle scansioni (altri casi come la tecnologia a differenza di fase, che vedremo successivamente, lavorano più celermente), tuttavia mostrano un'accuratezza nei risultati senz'altro notevole, soprattutto in relazione alle grandi distanze che riescono a contemplare. È infatti importante sottolineare che i sistemi basati su una tecnologia a tempo di volo riescono generalmente a lavorare alla distanza massima dichiarata per quello strumento, seppur implicando tempi operativi maggiormente dilatati.

LASER SCANNER A TRIANGOLAZIONE

Diversamente dai sistemi analizzati in precedenza, questa tipologia di scanner non prevede la misurazione del tempo trascorso tra l'uscita del raggio luminoso ed il suo ritorno, bensì sfrutta un sistema ben noto al campo della topografia, ossia il metodo della "triangolazione". Tuttavia occorre subito fare una distinzione delle due principali "classi" di laser scanner a triangolazione presenti sul mercato: la prima è quella che basa il suo sistema sulla triangolazione attiva (*Active Triangulation*); nel secondo caso parliamo invece di striscia di luce (*Lightstripe*).

Per quanto riguarda la triangolazione attiva, è necessario innanzitutto fissare una base con una lunghezza prestabilita (emettitore-ricevitore) e andare poi a misurare gli angoli che si generano agli estremi di questa base nel momento in cui si va a collimare il punto che si desidera rilevare, giungendo così alle sue coordinate. Gli strumenti che si servono di questo principio prevedono in un estremo della base il diodo emittore del raggio, nell'altro estremo, invece, è presente una camera CCD che ha il compito di recepire e registrare il raggio di ritorno, per poi misurarne l'angolo che esso forma con la base stessa. A partire dal principio della triangolazione ottica, il software legato allo scanner sarà quindi in grado di elaborare le coordinate del punto rilevato⁵⁶.

⁵⁶ DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009, p. 221

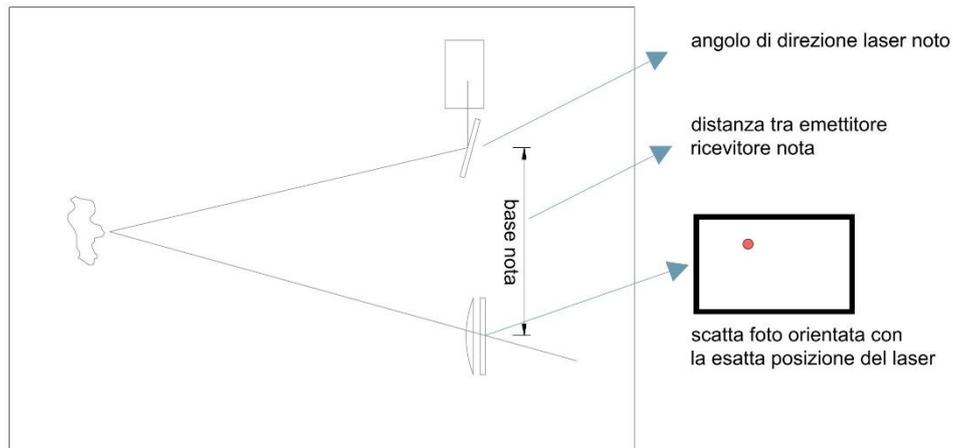


Fig. 23 - Bartolucci D. (2009). Schema di funzionamento di un laser scanner 3D a triangolazione attiva.

Affinché la precisione del rilievo sia quanto più accurata possibile è preferibile che la distanza tra l'oggetto e l'emettitore sia direttamente proporzionale a quella che separa emettitore e ricevitore. Questo poiché, nei casi in cui gli angoli alla base risultano eccessivamente acuti o ottusi, dal momento che l'oggetto è in posizione troppo ravvicinata o distante, si ha minore precisione nei risultati. I tre vertici del triangolo devono essere tendenzialmente equidistanti così da generare un triangolo equilatero⁵⁷.

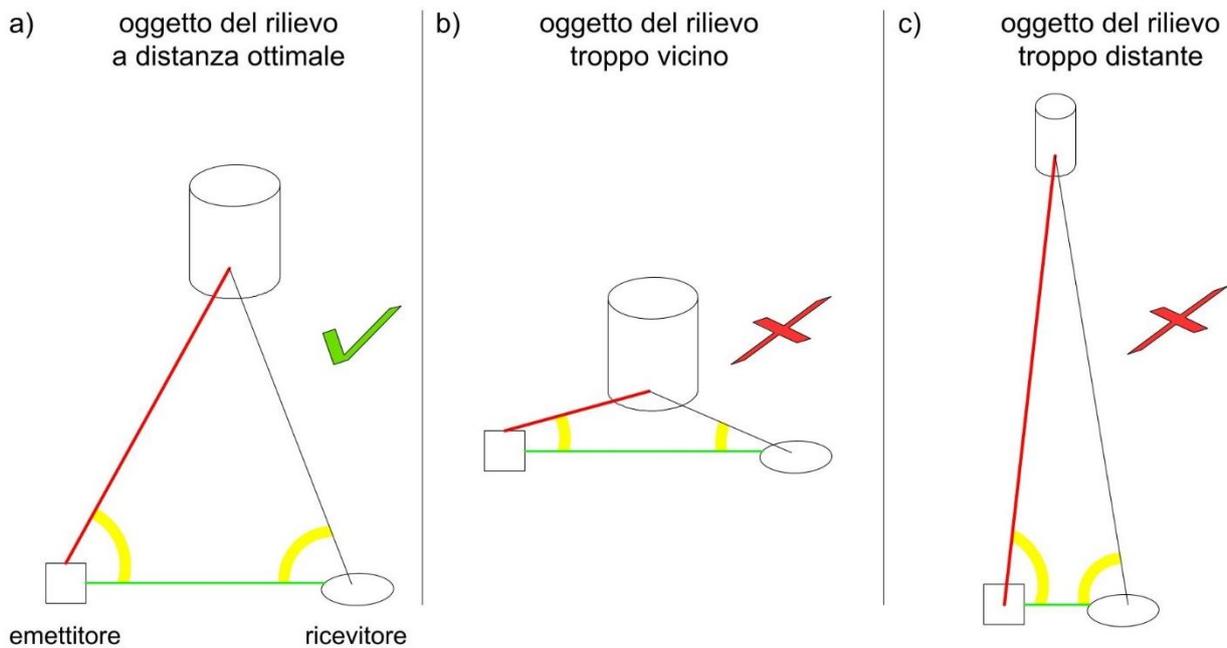


Fig. 24 - Bartolucci D. (2009). Schema triangolo emettitore-oggetto-ricevitore.

⁵⁷ BARTOLUCCI D., *Principi di laser scanning 3D*, Dario Flaccovio, Palermo 2009, p. 23

Come accennato nelle righe precedenti, il secondo sistema basato sulla triangolazione prevede invece la tecnologia Lightstripe. Si tratta di una lama di luce che, prima di raggiungere l'elemento, viene proiettata attraversando una lente cilindrica. Analogamente al sistema della triangolazione attiva, a questo punto la camera CCD riceve il raggio riflesso dall'oggetto e lo traduce in dati relativi alla distanza. Il procedimento viene poi eseguito nuovamente sulla stessa zona appena scansionata, con la differenza che questa volta la lama di luce verrà proiettata orizzontalmente, tramite uno specchio di Galvano⁵⁸, così da avere le informazioni necessarie per elaborare un modello tridimensionale.

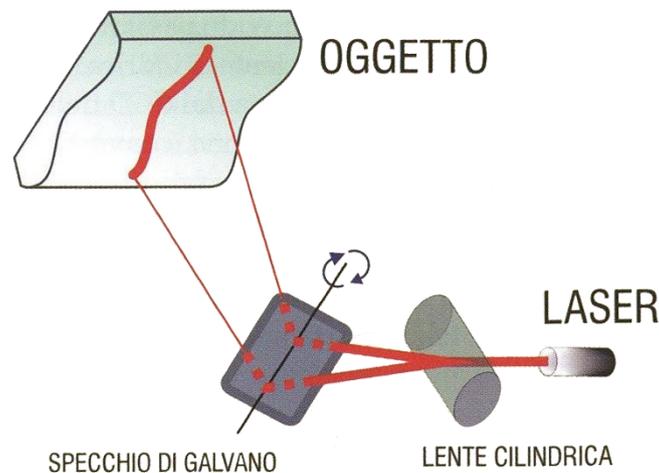


Fig. 25 - Bertocci S., Bini M. (2012). Schema di funzionamento di un laser scanner 3D Lightstripe.

Punto critico della tecnologia lightstripe è quello relativo al discorso dell'illuminazione, dal momento il sistema ad essa legato non garantisce elevate prestazioni e accuratezza nei risultati a distanze elevate, mentre, con le dovute attenzioni, la triangolazione attiva consente di operare con distanze maggiori. Si deve anche tenere in considerazione la reale capacità di misurazione legata a tali apparecchiature; trattandosi infatti di sistemi che basano la loro attitudine sul principio della triangolazione, è inevitabile che qualsiasi punto si desideri rilevare debba essere necessariamente tangibile sia dal raggio laser che lo colpisce, sia dalla camera CCD che ne rileva la posizione. Ne consegue che, oggetti che presentano cavità piuttosto accentuate o fessure estremamente piccole, potrebbero presentare zone di occlusione e quindi parti mancanti nel rilievo complessivo, questo nonostante le eventuali reiterazioni dell'operazione⁵⁹.

⁵⁸ «Lo specchio di Galvano, ruotando, permette di direzionare la luce laser sopra l'oggetto rilevato.». BERTOCCHI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 186

⁵⁹ BERTOCCHI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 186

Tuttavia, alla luce di queste “criticità”, è opportuno sottolineare l’ampia diffusione delle tecnologie appena trattate, certamente riconducibile al fatto che si tratta di soluzioni dall’elevata precisione (se usate nel modo corretto - come descritto), tanto che, in alcuni casi, i modelli elaborati prevedono un margine di errore pari solamente a un centesimo di millimetro. Ciò incentiva la scelta di impiegare i sistemi di triangolazione per rilievi di oggetti o architetture che prevedono un elevato grado di dettaglio. Inoltre, date le caratteristiche dei laser in questione, risulta semplice rilevare oggetti che presentano materiali e superfici di qualsiasi natura, in accordo con i limiti dello strumento.

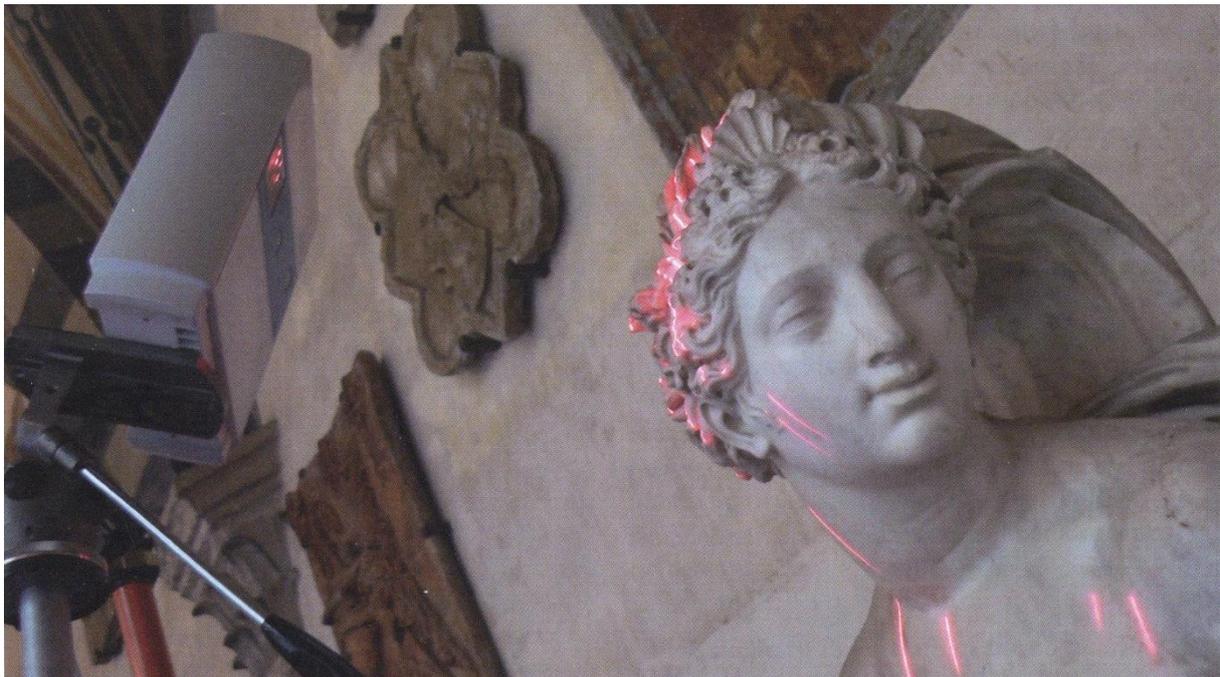


Fig. 26 - Bertocci S., Bini M. (2012). Esempio di rilievo con laser scanner 3D Lightstripe.

LASER SCANNER A VARIAZIONE DI FASE

Strettamente collegata al caso dei sistemi a tempo di volo e spesso ad essi associata, la tecnologia a *variazione di fase* (o Phase Difference) si pone come una vera e propria alternativa al metodo precedente, benché vi siano imponenti analogie. Questo innanzitutto poiché, essendo sistemi che basano i rispettivi principi di misurazione sull’emissione di segnali luminosi, essi rientrano entrambi nella macro categoria dei sistemi cosiddetti *Light Detection And Ranging* (LIDAR). Risulta quindi fondamentale descriverne al meglio le caratteristiche, così da comprenderne le peculiarità e gli aspetti che la distinguono dalle altre tecniche di rilievo.

Mentre i laser scanner a tempo di volo basano il loro funzionamento su raggi laser emessi ad **impulsi**, questo tipo di soluzione prevede invece che il raggio sia **continuo**, conoscendone a

priori la lunghezza d'onda. Il segnale, come abbiamo analizzato in precedenza, viene emesso in modo tale da intercettare l'oggetto; quest'ultimo poi, come sappiamo, sia che si tratti di Time of Flight, sia che si tratti di Phase Difference, rifletterà parte di esso verso il ricevitore. La differenza principale tra i due strumenti consiste proprio in quest'ultimo passaggio, dal momento che, nel caso del sistema a variazione di fase, il ricevitore elaborerà le informazioni in merito alla distanza dall'oggetto, che però risulterà essere **proporzionale** alla differenza di fase che il raggio avrà subito durante il tragitto per raggiungerlo e tornare indietro⁶⁰. Il procedimento si completerà anche in questo caso con il calcolo degli angoli, così da giungere alle esatte coordinate spaziali dei singoli punti.

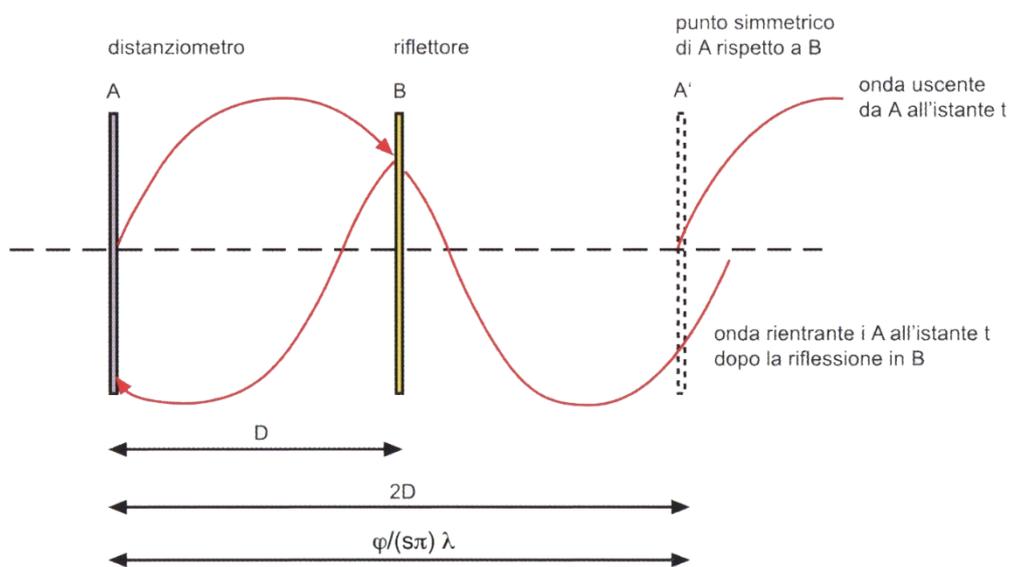


Fig. 27 - Bornaz L., (2006). Misurazione della distanza per differenza di fase.

Se da un lato è giusto sottolineare che il sistema a variazione di fase offre la possibilità di ridurre i tempi di presa rispetto ad altre soluzioni, dall'altro è opportuno ricordare però che si tratta di una tecnologia che difficilmente riesce a misurare alla massima distanza dichiarata. È infatti per questa ragione che generalmente si preferisce utilizzare tale sistema di rilevamento in occasione di interni o architetture che presentano un grande livello di ornato richiedendo la necessità di una scansione di un numero ingente di punti nel minor tempo possibile. La velocità della presa è strettamente collegata al fatto che l'apparecchio può effettuare una totale rotazione sia verticalmente che orizzontalmente. Ne risulterà una nuvola di punti che presenterà una densità inferiore al centimetro.

⁶⁰ BERTOCCHI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 192

Tuttavia, sebbene la maggiore velocità rispetto ai sistemi TOF, i risultati restituiti dalla tecnologia Phase Difference possono essere particolarmente oggetto di “rumore”. Infatti, in alcuni casi, vi è la possibilità che esso raggiunga anche il mezzo centimetro. Ciò significa che il singolo punto rilevato potrebbe risultare spostato di 5 mm all’interno di una sfera ipotetica, lungo uno degli infiniti raggi aventi come origine la reale posizione del punto stesso (centro della sfera). Ovviamente questo ragionamento è applicabile a ciascun singolo punto rilevato. E quindi è inevitabile che vi sia la possibilità che il luogo geometrico rilevato non corrisponda alla realtà, ma si mostri come una superficie irregolare.

Tale problematica viene quindi spostata, e generalmente risolta o contenuta, a livello del software che ridurrà notevolmente il fenomeno, anche per quelle nuvole di punti nelle quali è presente in maniera molto significativa⁶¹.

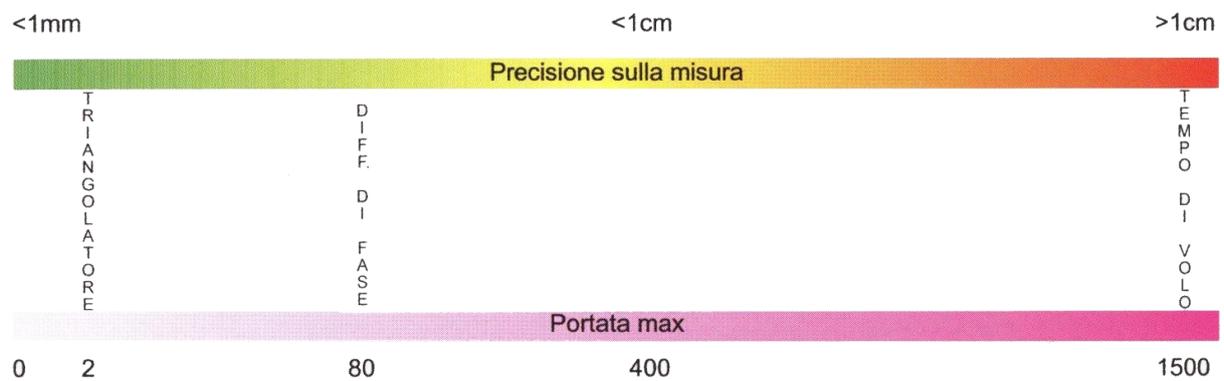


Fig. 28 - Bartolucci D. (2009). Schema precisione e portata dei principali laser scanner 3D.

⁶¹ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, pp. 194-196

4. IL RILEVAMENTO INTEGRATO

4.1 LA POLIGONALE TOPOGRAFICA NEL RILIEVO

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto differenti tecniche e diversi modus operandi per poter conseguire un buon rilevamento; nel capitolo seguente ci concentreremo non tanto su come arrivare ad una restituzione quanto più dettagliata possibile, bensì su un passaggio che possiamo collocare nelle fasi iniziali “di studio” delle operazioni di rilievo, ma non per questo meno importante, ossia la definizione della rete di inquadramento (detta anche poligonale) dalla quale verranno effettuati i rilevamenti.

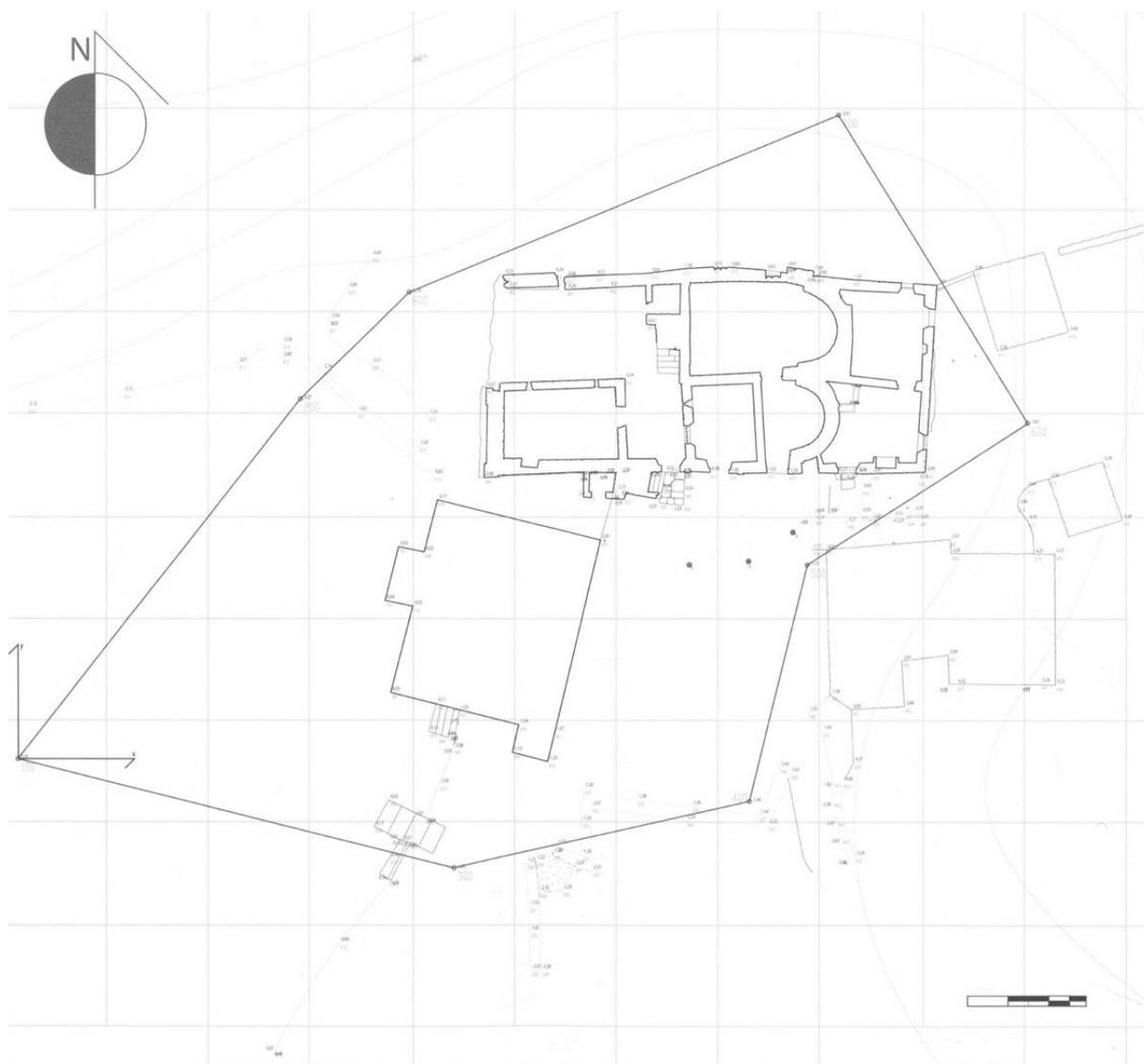


Fig. 29 - Bertocci S., Bini M. (2012). Esempio di poligonale topografica.

Per il rilievo di oggetti di varia natura, effettuati tramite rilievo indiretto, risulta individuare dei punti strategici da cui è possibile, in un secondo momento, ottenere le misure desiderate. È per questo che vengono individuati dei vertici da quali vengono effettuate le scansioni, vertici che delineano un poligono che prende appunto il nome poligonale topografica. Lo studio e la definizione una corretta rete di inquadramento costituiscono ulteriori fattori che collaborano a una restituzione di elevata precisione e con un alto grado di dettaglio⁶².

Sono proprio i dettagli dell'oggetto in questione, infatti, che hanno un peso notevole nella scelta dei vertici e di conseguenza sul tracciamento della poligonale, questo poiché tutti i punti dovranno poi rispondere all'impostazione iniziale a cui risponde la rete di inquadramento.

Affinché sia possibile raggiungere un certo grado di dettaglio prefissato è però necessario che la poligonale preveda un numero abbondante di vertici, in modo tale che le scansioni e le relative misurazioni siano quanto più complete possibile. Tuttavia il numero cospicuo di appoggi non basta a garantire una buona riuscita del risultato finale; è necessario che essi vengano distribuiti in maniera omogenea in modo tale da conferire una precisione ed una accuratezza costanti nel corso del rilievo.

Uno dei tanti aspetti positivi della costruzione della poligonale consiste nell'immediata possibilità di verificare l'esattezza delle misure, questo perché, soprattutto grazie al sovrannumero di dati, vi è una maggiore attendibilità dei risultati. Nel momento in cui non fosse possibile chiudere la rete di inquadramento, e quindi la poligonale mancasse di qualche suo vertice, in quel caso si farebbe riferimento alla verifica di distanze e angoli.

I vertici più volte citati finora vengo definiti anche con il nome di stazioni e generalmente vengono annotati dal rilevatore tramite lettere o numeri in ordine crescente nel quaderno di campagna o sugli schizzi preparatori precedentemente impostati. Dopo la loro individuazione su carta seguirà quella reale nel terreno mediante chiodi topografici.

Lo strumento a questo punto è pronto per la rilevazione, ciascuna in ogni vertice stabilito, ma con la prerogativa di effettuare letture nei vertici prossimi ad esso, così da poter garantire un successivo incrocio dei dati e riscontrare l'esattezza della misura che come ricordiamo, per quanto essa possa essere precisa, sarà in ogni caso affetta da un errore seppur piccolissimo.

Ultimo controllo da fare e a cui prestare particolare attenzione è infine quello relativo agli angoli. Nel momento in cui si ha a disposizione una poligonale completa e quindi chiusa le verifiche sono abbastanza immediate e soprattutto vengono effettuate ormai in automatico dalle apparecchiature. Fino a qualche anno fa il procedimento era effettuato direttamente dall'operatore che basava i suoi calcoli su un semplice principio della geometria secondo cui la

⁶² SAINT AUBIN J.P., *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*, Moretti & Vitali, 2014, pp. 75-76

somma degli angoli interni di un poligono qualsiasi è pari a $(n-2)*180^\circ$, dove n indica il numero di lati del poligono in questione. Tuttavia, nel caso in cui non avessimo una poligonale chiusa, sarà necessaria una reiterazione del procedimento, ripetendo quindi la misura dei vari angoli e distanze.

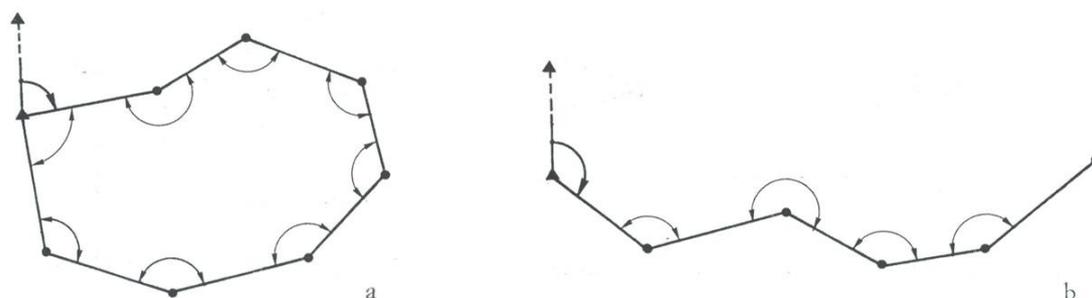


Fig. 30 - Docci M., Maestri D. (2009). Esempi di poligonale chiusa (a) e poligonale aperta (b).

Trattandosi di una tesi che tratta le diverse sfumature del rilievo soprattutto in ambito architettonico, vediamo ora che tipo di impostazione dovrebbe avere la poligonale quando si vuole rilevare un edificio. La successione delle stazioni deve definire un poligono che abbracci l'intera architettura, ma che al tempo stesso la penetri e non manchi di alcuna sua parte. Ovviamente quando si tratta di architetture isolate o che non confinano con altro questo concetto resta abbastanza semplice da attuare; caso opposto invece è quello dove l'edificio è adiacente ad altre costruzioni o semplicemente non vi è la possibilità di definire un poligono che inglobi l'oggetto del rilievo. In questo caso intervengono in favore del rilevatore alcuni espedienti che ne semplificano la riuscita: la costruzione di un poligono che comprende al suo interno anche

l'edificio confinante, oppure delle semplici linee di penetrazione per ovviare il problema.

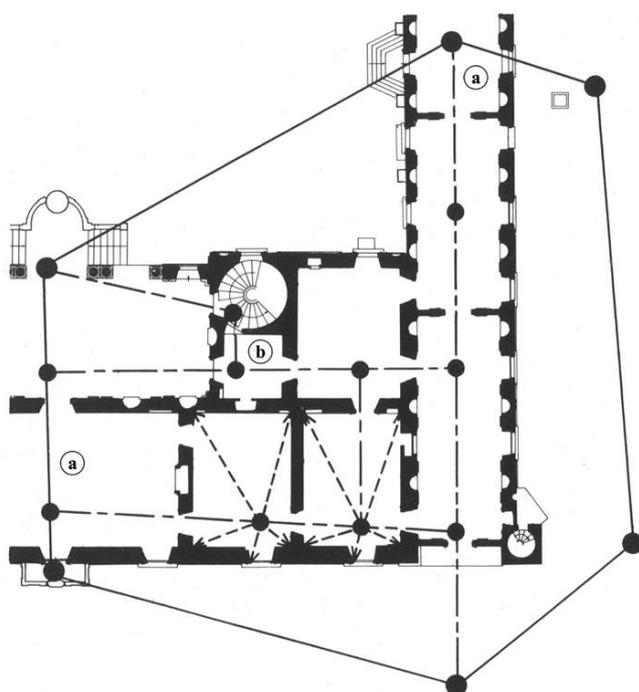


Fig. 31 - Saint Aubin J.P. (1999). Esempi di poligonale con linee di penetrazione (a) e vertici molto ravvicinati tra loro (b).

Oggigiorno i rilievi che prevedono misurazioni di punti di dettaglio avvengono principalmente attraverso scansioni laser, come già trattato nel capitolo precedente. Si può aggiungere però che il procedimento che punta alla collimazione segue in linea di massima il medesimo impiegato nel caso di *rilievi per coordinate polari o per irraggiamento*, che restano comunque una valida alternativa e attualmente ancora utilizzati (tramite stazione totale).

Nonostante si possano definire alternative restano comunque profonde le differenze che caratterizzano ciascun metodo: parliamo prima di tutto della differenza in termini di numero di misurazioni, che risulta anche difficilmente paragonabile, ma soprattutto del fatto che nel caso delle scansioni laser si ha l'aggiunta della tridimensionalità dell'oggetto rilevato. La stazione totale offre l'opportunità di rilevare punti significativi definendone angoli e distanze nel piano a partire da un punto di coordinate note. Viceversa con le scansioni ogni punto nell'intorno dell'apparecchio verrà rilevato e avrà delle coordinate spaziali ben precise.

4.2 IL SISTEMA DI RIFERIMENTO

Abbiamo visto fin qui quanto sia importante ai fini del rilievo l'impostazione di una rete di inquadramento che presenti determinate caratteristiche e che sia definita in un certo modo, delimitando un'area ben precisa all'interno della quale effettuare tutte le misure. Tuttavia, per quanto tutto il procedimento possa essere preciso e accurato, essa non basta da sola a stabilire una base solida su cui improntare dei risultati finali efficaci; vi è un secondo fattore imprescindibile che integra il tracciamento della poligonale: il sistema di riferimento globale. I dati estrapolati dalla rete iniziale non avranno alcuna valenza se non vengono associati ad un sistema di riferimento, facendo in modo che essi possano essere utilizzati dall'utente.

Questa relazione che si instaura tra i dati della rete di inquadramento e il sistema di riferimento globale avviene tramite la cosiddetta *georeferenziazione*. Si tratta di una procedura in grado di associare ad ogni punto rilevato una corrispondente posizione sulla terra, rifacendosi quindi ai concetti chiave della geomatica. È subito evidente la valenza di questo procedimento, dal momento che va a stabilire un diretto riscontro tra il punto rilevato e l'ambiente circostante. Per rendere possibile questa correlazione con il territorio è quindi necessario partire da una iniziale rete geometrica che vada a racchiudere proprio il territorio di riferimento. Questa operazione viene effettuata tramite la *rete di triangolazione*: è un metodo che, partendo dal presupposto che il triangolo è l'unico poligono elementare indeformabile, suddivide la superficie terrestre in una maglia triangolare di varia dimensione.

Per quanto riguarda il sistema italiano, esso prevede già questo tipo di suddivisione ed è stata effettuata (e attualmente gestita) dall'Istituto Geografico Militare; è strutturata in quattro ordini, vale a dire che il territorio italiano è stato inizialmente suddiviso in triangoli che definiscono una maglia abbastanza larga (i lati di questi triangoli oscillano tra i 20 e i 60 km); via via questa maglia va sempre più infittendosi dal momento che il triangolo di partenza viene ulteriormente suddiviso in altri triangoli più piccoli. Reiterando fino a tre volte questo passaggio si giunge fino ai triangoli più piccoli che prevedono dei lati compresi tra i 3 e i 10 km (con un elevato grado di dettaglio). I vertici di questi triangoli vengono generalmente individuati in particolari punti riconoscibili, come ad esempio campanili o torri.

Un altro esempio di rete triangolare a livello nazionale è quella catastale, basata su una struttura a tre ordini e di cui i lati dei triangoli di maggior dettaglio variano tra i 3 e i 5 km.

△ vertice di I ordine dell'I.G.M.
○ vertice di II ordine dell'I.G.M.

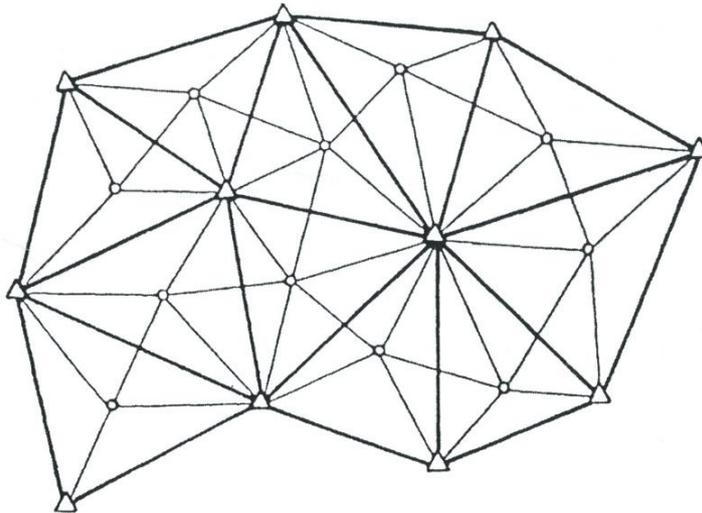


Fig. 32 - Docci M., Maestri D. (2009). Esempi di rete di primo e secondo ordine.

In conclusione, volendo calare il rilievo in un contesto più ampio, occorrerà stabilire un collegamento tra la poligonale iniziale e uno dei vertici (il più vicino) della rete nazionale o catastale. Questo passaggio, anche se in alcuni casi può risultare superfluo, si rivela in realtà fondamentale poiché vi è la necessità di giungere ad un sistema di riferimento **assoluto** per il rilievo, superando così il sistema di riferimento **relativo** di partenza. Con adeguate operazioni sarà quindi possibile “agganciare” i dati relativi al sistema di riferimento locale con quelli del sistema nazionale o catastale⁶³.

Ad oggi, per svolgere queste operazioni di georeferenziazione, ci serviamo di strumenti e software che effettuano queste operazioni in maniera semi-automatica; è nato così quello che oggi prende il nome di GIS (*Geographic Information System*), un sistema informatico in grado di elaborare e trasformare dati geospaziali⁶⁴.

4.2.1 IL SISTEMA SATELLITARE

Sono passati ormai quasi quarant'anni dal primo lancio in orbita del satellite americano che, insieme ai numerosissimi lanci successivi, pose le basi per il *Global Positioning System*, noto a tutti come GPS. Verso la fine del secolo scorso ci si rese conto che le potenzialità del sistema

⁶³ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, pp. 150-157

⁶⁴ WORBOYS M. DUCKHAM M., *GIS: a computing perspective*, CRC press, Boca Raton 2004, pp. 1-3

satellitare erano troppo grandi per poter essere limitate al solo impiego militare (motivo per cui era nato) e per questo venne esteso il suo utilizzo anche al resto della comunità. Questo sistema si rivelò di estrema praticità nell'ambito della topografia, della navigazione, del rilievo eccetera. Generalizzare il concetto di sistema satellitare a livello globale risulta essere abbastanza arduo dal momento che nel corso degli anni tutte le aree geografiche di maggiore influenza (Russia, Cina, Giappone, Europa) hanno cercato di perseguire una propria indipendenza da questo punto vista e sviluppando autonomamente dei propri sistemi a cui fare riferimento (NASS, COMPASS, QZSS, GALILEO). La ricerca di questa autonomia è giustificata da molteplici motivazioni, una su tutte la continuità del servizio che evita, come successo in tempi di guerra, una interruzione da parte del governo americano del sistema GPS; ulteriori ragioni riguardano poi il fatto che sviluppare un servizio del genere in autonomia prevede anche una maggiore cura a livello di geolocalizzazione e una migliore copertura del segnale⁶⁵.



Fig. 33 - GNSS Leica Viva GS15.

Alla luce di queste premesse è chiaro come non si possa fare un unico discorso che accolga tutti i vari sistemi generati dai diversi paesi, tuttavia la comunità scientifica ha deciso di coniare una unica espressione universale per includere tutti i sistemi satellitari presenti sul pianeta: *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Esso sfrutta la rete di satelliti lanciati in orbita dall'uomo per l'esatta localizzazione di un qualsiasi punto sulla terra. Il principio che ne garantisce il

⁶⁵ CARLUCCI R., *GEOmedia*, 2008, pp. 1-4

funzionamento è relativamente semplice: il segnale emesso dal satellite viene ricevuto dal dispositivo che lo riceve e lo elabora stabilendo così la localizzazione dello stesso.

Partendo dal presupposto che i segnali emessi dai satelliti viaggiano alla velocità della luce, il ricevitore è in grado prima di risalire al punto di partenza del segnale considerando il tempo impiegato per il tragitto, risalire quindi alla distanza tra esso e il satellite e infine, rifacendosi ai principi della trigonometria, determinare la propria posizione. Chiude il procedimento la visualizzazione di tale posizione sulla mappa con le relative coordinate geografiche.

Ricordiamo però che affinché sia possibile giungere a tale risultato vi è la necessità che il dispositivo sia “racchiuso” in un triangolo virtuale individuato da tre satelliti distinti, o eventualmente anche un numero maggiore, in modo tale che resti sempre nel raggio d’azione di almeno tre di essi così da poter garantire l’effettiva riuscita del procedimento.

Aspetto interessante del GNSS è la possibilità di integrazione con altre apparecchiature, nel campo del rilievo e non: le stazioni totali tramite il loro sistema di localizzazione offrono l’opportunità di collegare diverse reti topografiche; i laser scanner consentono di associare in automatico differenti nuvole di punti grazie alla georeferenziazione; le macchine fotografiche, al momento dello scatto, rilevano in automatico la posizione nello spazio elaborando dati sulla longitudine, latitudine e altitudine⁶⁶.

⁶⁶ BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, pp. 164-168

4.3 L'INTEGRAZIONE DEI DATI

Come già ribadito più volte nel corso dei paragrafi precedenti, lo sviluppo della tecnologia dei corso degli anni ha consentito all'uomo di alzare sempre più l'asticella e ottenere risultati prima di allora impensabili. Seguirà ora nelle righe che seguono un approfondimento specifico sull'integrazione di alcune di queste tecniche ha stravolto il mondo del rilievo: il rilievo fotogrammetrico e la scansione laser, argomenti entrambi descritti singolarmente rispettivamente nei capitoli 2 e 3.

4.3.1 LA FASE DI ACQUISIZIONE

Abbiamo capito ormai che per ottenere un ottimo risultato nel rilievo occorre una corretta progettazione di tutte le fasi preliminari, così da favorire un'esatta restituzione. Per raggiungere l'obiettivo dell'integrazione tra diverse tecniche non basta utilizzare lo strumento nel migliore dei modi, bensì vi è la necessità di prevedere già a monte del rilevamento in che modo è opportuno effettuare le scansioni (nel caso del laser scanner), tali da poter essere poi integrate in un secondo momento. Nonostante sia apparentemente semplice la scansione tramite laser, dal momento che esso riesce in ogni caso a restituire una nuvola di punti tridimensionale completa di ogni informazione dell'oggetto, spesso ciò non basta e non rispecchia il presupposto di una buona acquisizione dei dati, tanto che spesso succede di dover ripetere il rilievo⁶⁷.

Certamente in questo discorso non può essere tralasciato il fatto che una corretta progettazione della fase di acquisizione dei dati non preveda regole fisse da eseguire in ogni tipo di situazione, bensì vi è la necessità di adattamento alle specifiche condizioni del caso in esame, una su tutte la tipologia dell'oggetto che si desidera rilevare, nonché le sue dimensioni e la sua forma. La dimensione è per natura legata al concetto di scala, alla vicinanza dall'oggetto e alla sua successiva rappresentazione. Nell'ambito del rilevamento tramite laser scanner questo discorso in merito alla vicinanza si traduce con una più o meno capacità dello strumento di rilevare le eventuali discontinuità presenti sulle superfici; quando la distanza che separa lo strumento dall'oggetto sarà maggiore delle dimensioni di tali discontinuità difficilmente esse saranno presenti nel modello tridimensionale che verrà elaborato.

⁶⁷ RINAUDO F., *La tecnica del laser scanning. Teoria ed applicazioni*, 2003, pp. 1-25

Per quanto concerne invece il discorso inerente le dimensioni dell'oggetto, più esse sono grandi maggiore sarà il numero di scansioni necessario a fornire un risultato ricco di informazioni e completo in ogni sua parte. Quest'ultimo aspetto, per quanto possa essere banale, tuttavia non è assolutamente da sottovalutare; infatti il laser scanner sono pensati in modo che a ciascuna scansione corrisponda un sistema di riferimento locale. Verrà approfondito nelle pagine seguenti il modo in cui combinare scansioni differenti di uno stesso oggetto; per ora ci limiteremo a dire che esistono diverse metodologie per fare ciò.

4.3.2 LA COMBINAZIONE DELLE SCANSIONI LASER

L'ambiente in cui si effettuano scansioni devono senz'altro favorire il raggiungimento dell'oggetto da parte del laser; nel momento in cui dovessero esserci impedimenti di qualsivoglia tipologia, il rilevatore è costretto ad effettuare delle scansioni *parziali*, ossia scansioni pensate dal principio per essere allineate con ulteriori scansioni. In questo caso verranno realizzate più stazioni, situazione in cui ciascuna di esse elaborerà un rilievo parziale riferito a un proprio sistema di riferimento e che avrà quindi bisogno di una georeferenziazione per poter essere combinato con tutti gli altri e condividere lo stesso sistema di riferimento.

Il passaggio ad un sistema di coordinate assolute può avvenire principalmente seguendo due metodologie: la prima servendosi dei vertici della rete topografica, mentre nel caso della seconda parliamo di georeferenziazione diretta.

Esistono due metodologie di registrazione delle scansioni che basano le loro procedure su sistemi di riferimento differenti, uno detto *intrinseco* e uno *oggetto*. Il primo, detto anche Intrinsic reference system (IRS), è diverso per ogni scansione effettuata e rapportato all'orientamento dello strumento in quella specifica circostanza; il secondo invece, noto come Ground reference System (GRS), è quello nel quale differenti scansioni sono associate e registrate insieme, e come suggerisce il nome, accoglie l'intero oggetto che si sta rilevando.

L'obiettivo del rilevatore è perciò quello di riuscire a trasformare tutte le scansioni basate sul sistema IRS in GRS, quindi riuscire a registrare tra loro numerose scansioni. Per far sì che ciò sia possibile è necessario effettuare delle operazioni specifiche, vale a dire delle rototraslazioni nello spazio in genere basate su punti comuni alle diverse scansioni in esame; questa operazione prende il nome di *co-registrazione*⁶⁸.

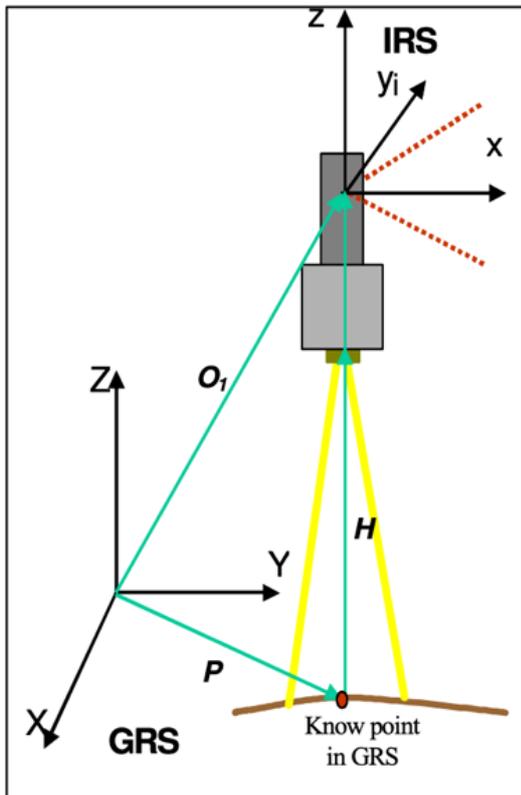


Fig. 34 - Alba M. (2007). Schema raffigurante i Reference System (IGR e GRS).

Vogliamo ora illustrare brevemente le molteplici tecniche di georeferenziazione;

- **metodo diretto**: il procedimento è abbastanza simile al processo di misurazione di un normale teodolite. Lo scanner, collocato in una posizione nota del GRS, viene gestito in modo da posizionare verticalmente l'asse delle Z del suo rispettivo IRS. Essendo a conoscenza della distanza (altezza) tra il punto da cui viene eseguita la scansione ed il vertice della stazione sarà possibile ricavare le coordinate esatte del punto da cui viene effettuata la scansione (nel sistema GRS). Segue quindi l'allineamento in genere mediante

l'individuazione di un target noto. Si tratta di un metodo senz'altro ricco di vantaggi dal momento che non vi è la necessità di dover rintracciare punti in comune tra le varie scansioni per la loro sovrapposizione, bensì sarà possibile effettuare anche scansioni lontane tra loro.

- **metodo indiretto**: si tratta del procedimento maggiormente diffuso per la georeferenziazione. Esso procede per mezzo di alcuni punti noti riconoscibili grazie a dei target, detti anche ground control points (GCPs); in particolare sarà necessaria la misurazione almeno di 3 GCPs, punti che dovranno essere misurati in tutte le scansioni così da consentire la rototraslazione; maggiore sarà il numero di GCPs maggiore sarà la precisione del risultato.

- **surface matching**: in questo caso parliamo di una tecnica molto vicina all'immagine matching già trattata nel capitolo inerente la fotogrammetria. Questo perché, come in quel caso, la tecnica procede tramite rototraslazioni; infatti, se da un lato per la correlazione di immagini la rototraslazione avviene nel piano e partendo dal fissare una immagine a cui verrà poi correlata

⁶⁸ ALBA M., *Atti 11 Conferenza Nazionale ASITA*, 2004, pp. 2-10

una seconda immagine, nel caso del surface matching questa procedura avviene nello spazio e considerando le nuvole di punti. Nella maggior parte dei casi questo algoritmo agisce direttamente sugli ICP (Iterative Closest Point), ossia ricercando punti omologhi in zone comuni delle diverse scansioni ed eseguendo le trasformazioni nello spazio per consentirne la combinazione. Analogamente all'immagine matching verrà quindi mantenuta fissa una nuvola alla quale verranno poi associate e allineate le altre tramite un'operazione detta *cloud to cloud*⁶⁹. Lo sviluppo tecnologico ha portato ad una situazione in cui questi processi di registrazione e di georeferenziazione siano quasi del tutto automatici; tuttavia l'operatore potrà comunque effettuare delle verifiche sulle scansioni tramite appositi software.

IL CASO DELLE SCANSIONI AEREE

Alla luce delle precedenti analisi relative alle diverse tecniche di rilievo e agli strumenti ad esse attinenti cercheremo ora di capire quali sono le caratteristiche che contraddistinguono le scansioni laser terrestri e aeree.

La differenza principale consiste nel fatto che nel caso dei rilievi terrestri le scansioni hanno in ogni momento un sistema di riferimento che si può definire fisso, nonostante la possibilità di variazione tra una scansione e l'altra; nel caso dei rilievi aerei, invece, vi è un costante mutare del sistema di riferimento, legato sia al perpetuo spostamento nello spazio da parte dell'apparecchio, ma altresì anche nel tempo. Le misurazioni avvengono in istanti successivi in posizioni differenti.

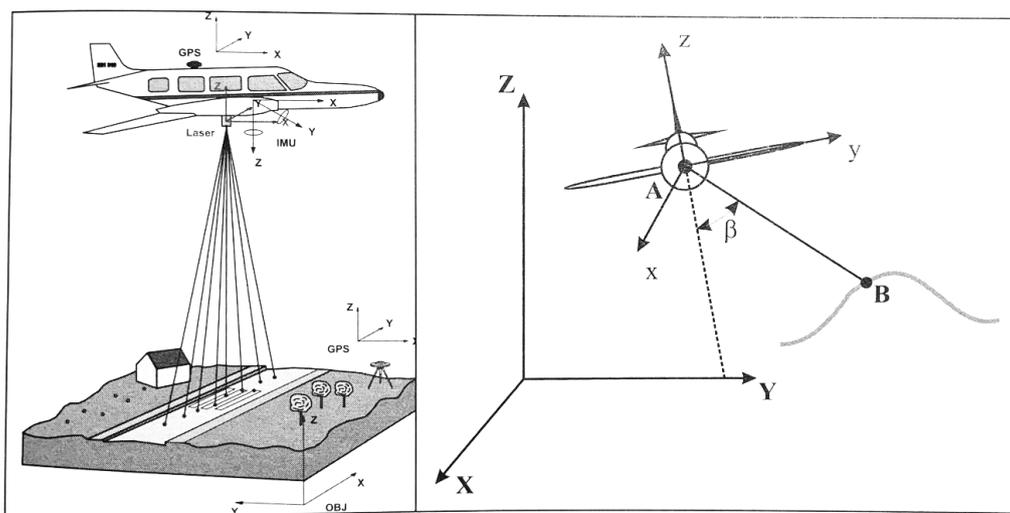


Fig. 35 - Crosilla F., Galetto R. (2003). Rappresentazione di un laser scanner aereo e dei sistemi di riferimento.

⁶⁹ ALBA M., *Atti 11 Conferenza Nazionale ASITA*, 2004, p. 18

Per quanto riguarda la procedura del rilievo, essa avviene basando la propria esattezza su tre elementi fondamentali di cui l'apparecchiatura è dotata, ossia il sistema laser, i sensori di assetto (detti IMU) e i sensori di posizione (GNSS). Il laser, come abbiamo visto nel capitolo precedente, fonda i principi del suo funzionamento sull'emissione e la ricezione di disegni ed in questo specifico caso procede mediante la scansione dell'area in oggetto perpendicolarmente alla direzione stabilita dall'operatore. Così facendo si otterranno delle vere e proprie strisce che, rifacendosi ancora una volta alla fotogrammetria, verranno poi associate tra loro.

Una forte incidenza sul risultato sarà attribuita principalmente a tre fattori: la distanza tra il mezzo in volo e il terreno, la frequenza attinente il flusso del laser e infine l'ampiezza angolare descritta dalla scansione.

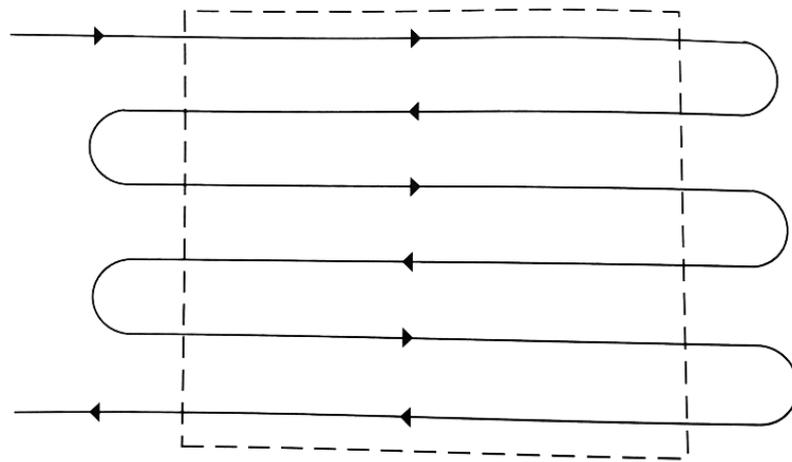


Fig. 36 - Crosilla F., Galetto R. (2003). Rappresentazione di un percorso aereo per l'acquisizione delle strisciate.

A questo punto si potrà procedere con la georeferenziazione del rilievo che, come già visto in precedenza, verrà effettuata tramite rototraslazioni tridimensionali e in particolare ogni punto nello spazio sarà legato a sei variabili distinte, di cui quattro legate al fattore tempo in quanto cambiano in ogni istante. Una volta georeferenziate queste strisce in sequenza si passerà ad avere una vera e propria nuvola di punti che tuttavia potrebbero riportare alcune inesattezze in corrispondenza delle zone di sovrapposizione di queste strisce. Questi errori potranno però essere contenuti tramite specifici algoritmi dedicati; sono impiegati per l'allineamento delle strisciate tramite particolari aspetti di analogie e congruenze.

Si giungerà così ad un risultato che mostrerà un elevato aspetto di continuità, eliminando o perlomeno minimizzando le discrepanze che vi erano tra le diverse scansioni⁷⁰.

⁷⁰ VISINTINI D., FICO B., SPANGHER A., *Atti del convegno SIFET*, 2006, p. 12

LE NUVOLE DI PUNTI

L'insieme di tutte le informazioni raccolte mediante le scansioni terrestri e aeree, una volta integrate tra loro, consente di ottenere un unico elaborato costituito da un modello carico di dettagli, ossia la nuvola di punti; essa sarà il prodotto finale inteso come somma di dati attinenti a rilievi differenti.

Come abbiamo visto già più volte in precedenza, l'integrazione dei rilievi è una procedura che passa inevitabilmente attraverso la georeferenziazione, quindi i differenti dati attinenti a scansioni differenti dovranno prima di tutto essere riferite allo stesso sistema di riferimento. Si tratta di un passaggio utile ad ottenere un risultato organico ben definito e con un alto grado di dettaglio nelle tre dimensioni, una nuvola di punti che sarà la base del modello di restituzione finale; un insieme di dati tale da poter essere analizzata e consultata in qualsiasi momento⁷¹.

Si è sottolineato più volte il fatto che le nuvole di punti costituiscano una base, una sorta di fase iniziale nella quale abbiamo un modello ancora grezzo e da lavorare; lo scopo infatti è proprio quello di andare a lavorare su di esse in modo tale da giungere a mesh, modelli integrali ecc., (che possano poi accogliere anche delle texture), tali da proporre una fedele rappresentazione del vero. Il modello tridimensionale che ne risulterà potrà costituire una fonte di studio, di analisi, di documentazione e di produzione di successivi elaborati grafici.

⁷¹ DE SANCTIS A., *ARilievo dell'architettura e dello spazio urbano. Evoluzione, nuove tecniche, nuovi modelli di conoscenza*, WriteUp Site, Roma 2019, pp. 421-428

4.4 I MODELLI TRIDIMENSIONALI

Abbiamo visto che l'immediata restituzione di un oggetto di qualsiasi natura rilevato con un laser scanner si presenta con una nuvola di punti generalmente abbastanza densa. Tuttavia un modello del genere non è sempre molto comprensibile e a volte risulta di difficile lettura e interpretazione. Per risolvere questa tematica è necessario servirsi della modellazione tridimensionale che, attraverso alcune tecniche e metodologie, ci permette di generare un insieme di superfici utili ad una maggiore comprensione dell'oggetto; nelle prossime righe analizzeremo quindi questi procedimenti utili al raggiungimento effettivo del modello finito.

Le nuvole di punti, una volta elaborate dal laser scanner, prevedono dei vuoti nell'intorno di ognuno dei punti che le costituiscono, un vuoto che rappresenta una vera e propria mancanza, un'assenza di informazioni dimensionali (nonostante siano abbastanza contenute) e cromatiche che per questo va colmata. I software presenti oggi sul mercato rendono abbastanza semplice la possibilità di colmare questi vuoti in maniera quasi del tutto automatica: il procedimento consiste nella creazione di tante facce triangolari i cui vertici sono proprio i punti della nuvola che ne permettono la creazione nel piano.

Viene generata così una maglia di questi triangoli che, approssimando i dati metrici del rilevamento tramite una interpolazione, dà luogo ad una *mesh*⁷².

Una volta concluso questo primo step, ci troveremo di fronte un modello "chiuso" che però necessita ancora di ulteriori lavorazioni per giungere un risultato accurato ed efficace.

Si procede quindi con la levigatura di queste mesh (fase di *smoothing*) e soprattutto con la *hole filling* (chiusura dei buchi), che colmerà le eventuali rimanenti lacune sulla superficie dove permane ancora l'assenza di informazioni. A conclusione di questi interventi sul modello ci saranno dei processi di "semplificazione" nei quali verranno ridotti tutti questi vertici che hanno generato la mesh e infine un infittimento della maglia precedentemente descritta in corrispondenza delle aree di maggiore dettaglio⁷³.

Terminato questa successione di operazioni si ottiene finalmente il modello tridimensionale, valida testimonianza dell'architettura in termini di documentazione e comunicazione.

A completamento di questa descrizione dei modelli 3D si ritiene opportuno accennare quali sono le categorie principali di essi, categorizzati prevalentemente in relazione al grado di dettaglio che essi presentano, in ragione del motivo per cui sono stati elaborati:

⁷² BERTOCCHI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara 2012, p. 270

⁷³ BARTOLUCCI D., *Principi di laser scanning 3D*, Flaccovio Dario, 2009, p. 69

- modello *scientifico*: si tratta di modelli dall'estrema precisione e grado di dettaglio; le sue geometrie sono ben riconoscibili e le sue dimensioni definite con accuratezza.

- modello *figurativo*: utilizzato principalmente per una rappresentazione della realtà nel suo complesso, ha un fine prettamente divulgativo; le sue geometrie risultano maggiormente semplificate e si presentano in maniera più approssimata. Queste geometrie tuttavia non bastano ad una rappresentazione del vero se non sono accompagnate da texture fotografiche. Infatti nel caso del modello figurativo si fa sempre riferimento ad esse in modo tale che integrandole con le geometrie di partenza si riesca ad elaborare un modello fedele all'oggetto rilevato, comprensivo di tutte le sue sfumature cromatiche e morfologiche.

In questo modo è come se si andasse a rivestire il modello semplificato con un "velo" generato dalla texture fotografica, un espediente per giungere ad una riproduzione digitale del mondo circostante.

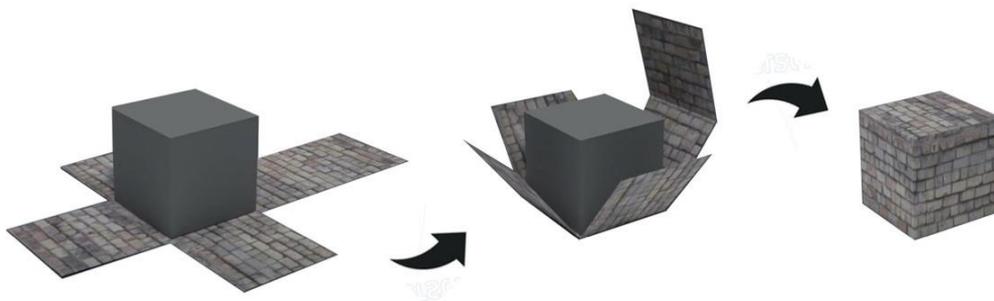


Fig. 37 - Rappresentazione del velo generato dalla texture che avvolge il modello.

Come detto già all'inizio della trattazione di questo aspetto, il risultato tuttavia non presenta una particolare precisione, anzi si tratta comunque di una restituzione che presenta diverse pecche soprattutto dal punto di vista morfologico nonostante lo "sforzo" dell'integrazione che cerca di mitigarle.

Sorge a questo punto spontanea chiedersi l'effettiva utilità di un modello che cerca di raggiungere quell'ideale di efficace rappresentazione della realtà ma che alla fine presenta limiti notevoli e importanti divergenze con esse. La risposta, se vogliamo, consiste proprio nella premessa iniziale che abbiamo fatto, ossia l'obbiettivo di presentarsi come un modello con un fine puramente divulgativo, lontano dalla precisione dei modelli scientifici. Anche un'ottima integrazione con l'apparato fotografico non basterà a colmare queste differenze.

Le applicazioni che se ne fanno al giorno d'oggi riguardano per lo più il campo dei videogiochi (scenografia) e realtà aumentata.

Situazione del tutto differente riguarda invece i modelli di tipo scientifico, molto spesso considerati esclusivamente per il loro carattere estetico, per la cura dei dettagli e l'estrema

precisione che essi presentano, tralasciando il potenziale campo di applicazione che essi potrebbero avere. Diversamente dai modelli “ibridi”, che sintetizzano insieme informazioni del modello 3D e delle texture in un unico risultato, nei modelli scientifici viene tutto descritto analiticamente in un unico elaborato, escludendo la possibilità che alcuni dati siano alterati o irriconoscibili proprio a causa di questa combinazione di elementi distinti.

Ne risulta quindi che i modelli scientifici tridimensionali hanno tutte le caratteristiche per acquisire l’oggetto in ogni sua forma, caratteristica e peculiarità, consentendo di giungere ad una ricostruzione attendibile in ogni suo aspetto.

4.5 IL RILIEVO IERI E OGGI

Nel corso dell'ultimo ventennio l'evoluzione e il progresso delle apparecchiature utili al rilievo della realtà sono state oggetto di un costante e graduale sviluppo in tutti i loro aspetti, comprese tutte le fasi di impostazione, raccolta ed elaborazione dei dati, fino a giungere alla restituzione finale. Questo sviluppo, diversamente da altri ambiti, non ha precluso però la possibilità di applicare queste scoperte solo in determinati settori del rilievo; il campo di applicazione non ha subito limitazioni in questi anni, anzi ha ampliato il suo raggio d'azione.

Per quanto riguarda il rilievo di tipo diretto, esso ha visto concentrare i suoi progressi nel campo dell'architettura, dove grazie al rapporto diretto con il manufatto è stato possibile manifestare il proprio campo di applicazione. Si tratta di operazioni che oggi, così come alla fine del secolo scorso, restano sotto la costante e puntuale supervisione dell'operatore che può intervenire in maniera diretta in qualsiasi fase del processo.

Viceversa, come abbiamo ampiamente trattato nei capitoli precedenti di questa tesi, nel caso del rilievo indiretto, è previsto che le misurazioni avvengano per mezzo di strumenti laser o informatici dall'elevato grado di precisione. Una volta ottenuti tutti questi dati essi vengono successivamente elaborati tanto da restituire una rappresentazione grafica dell'oggetto rilevato, il tutto riferito ad un sistema di riferimento ben preciso. Buona parte delle fasi del lavoro vengono eseguite in modo automatico mediante tecnologie e software che non necessitano affatto dell'intervento dell'uomo.

Nonostante si pongano come due approcci diametralmente opposti, le due metodologie, legate la prima alla tradizione mentre la seconda senz'altro all'innovazione, viaggiano di pari passo e posseggono la stessa importanza; soprattutto si tratta di sistemi integrabili tra loro, che puntano nella stessa direzione: la migliore riuscita del rilievo. Infatti sarebbe del tutto fuori luogo affermare che i risultati ottenuti negli anni tramite il rilievo diretto sia lontani da una fedele corrispondenza con la realtà; semplicemente si tratta di un approccio diverso che fino a qualche anno fa non contemplava di essere affiancato da una realtà tecnologica come quella del rilievo indiretto.

Alla luce del fine comune che hanno le due metodologie, è quindi possibile concludere il ragionamento sostenendo che un rilievo condotto con strumenti che non prevedono un diretto contatto con l'oggetto o un diretto intervento dell'operatore non è così distante da un rilievo di tipo più tradizionale. Le differenze riscontrabili, in termini di fasi di esecuzione della misurazione, consistono in un momento fondamentale del rilievo, il momento, già trattato, della discretizzazione dei punti. La scelta dei punti più significativi del manufatto costituisce un

momento fondamentale nell'iter di entrambe le tipologie di rilievo; tuttavia, mentre nel caso della misurazione diretta costituisce una fase a monte del processo, con l'avvento delle nuove apparecchiature è stato possibile posticipare in un secondo momento questo tipo di operazione, la fase in cui dalla nuvola di punti si passa al modello effettivo dell'oggetto. La discretizzazione che prima prevedeva la scelta di ogni singolo punto nel rilievo tradizionale, trova adesso una valida alternativa nella tecnologia che traduce ogni dato in elaborazioni informatiche.

Nel caso specifico del laser scanner, lo strumento acquisisce tutte le informazioni in modo quasi del tutto automatico, dal momento che l'operatore ha la possibilità di intervenire solo su alcuni parametri della scansione, come ad esempio la sua velocità (può cambiare manualmente la sua durata) e la densità dei punti che comporranno la nuvola. Quest'ultima però, sarà certamente carica di informazioni superflue che non risulteranno utili ai fini del rilievo e per questo andranno eliminate.

Certamente la possibilità di accedere in qualsiasi momento anche ad informazioni secondarie non è un aspetto da sottovalutare, tuttavia si deve fare bene attenzione ad evitare che questo insieme informazioni extra non vadano ad intaccare il carattere rappresentativo del rilevamento. Le metodologie tradizionali prevede che alcuni aspetti dell'architettura vengano risaltati, ciò non accade in una points cloud dove ogni singolo punto rappresenta un dato che ha lo stesso identico valore di tutti gli altri.

Nonostante questa evoluzione tecnologica così profonda si è sempre cercato di mantenere costante la sensibilità del rilevatore, nonostante il suo ruolo abbia subito delle limitazioni. Infatti sebbene la transizione dalla tradizione all'innovazione ha fatto in modo che egli assumesse per buona parte del rilievo un ruolo più di controllo che una partecipazione attiva vera e propria, è in ogni caso grazie alla sua sensibilità ed esperienza che la restituzione del rilievo si impregni di un carattere più soggettivo, sollevandosi da quel velo asetticità che i numeri portano con sé. L'evoluzione ha permesso di ridurre i tempi e migliorare i risultati, aspetti certamente positivi e che nel tempo sono destinati ad evolvere ulteriormente ed essere sempre più legati alle nostre necessità. Tanto più l'uomo sarà in grado di adattare l'evoluzione ai suoi bisogni, tanto maggiori saranno i benefici che ne conseguiranno⁷⁴.

⁷⁴ DOCCI M., GAIANI M., MIGLIARI R., *Una nuova cultura per il rilevamento*, 2001, pp. 40-50

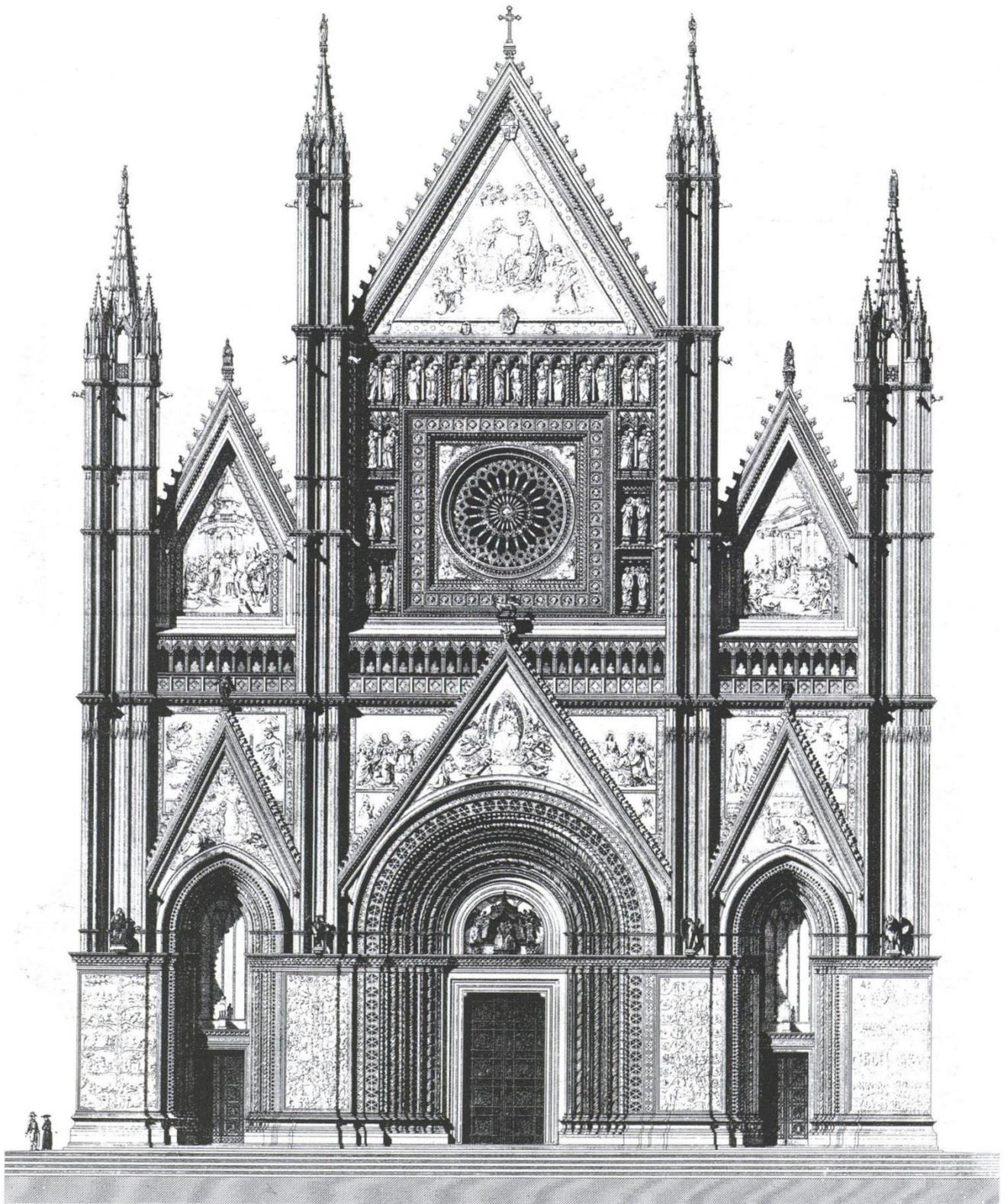


Fig. 38 - Dozzi M., Maestri D. (2009). Prospetto del duomo di Orvieto.

CONCLUSIONI

Nel percorso affrontato all'interno di questa tesi si è cercato di ricostruire il quadro delle caratteristiche del rilievo, dalle sue origini fino agli sviluppi più recenti, cercando di evidenziare proprio gli aspetti che ad oggi lo contraddistinguono: l'integrazione di tecniche e metodologie differenti; l'impiego dei laser scanner (che hanno stravolto l'intera disciplina) ed infine la modellazione tridimensionale ad esso connessa. Ovviamente la crescita di tutto il sistema tecnologico globale ha fatto da traino per l'evoluzione di questi tre elementi, incidendo fortemente sull'approccio al rilievo, alle sue tecniche e alle sue strumentazioni e culminando in nuovi modelli di rappresentazione.

Come abbiamo visto, l'ultimo ventennio è stato protagonista di cambiamenti radicali che hanno interessato più ambiti della disciplina, in particolare la fotogrammetria con il passaggio dall'era analogica a quella digitale e il rilievo indiretto di cui proprio il laser scanner ne è la massima espressione. Gli studi e tutte le ricerche effettuate sulle nuvole di punti e sulla loro elaborazione hanno certificato una migliore e sempre maggiormente accurata conoscenza dell'architettura. Le informazioni restituite da queste apparecchiature hanno permesso di scoprire un mondo del tutto nuovo nel quale il rilievo si è calato e che consiste nella possibilità di realizzare modelli immediati facilmente leggibili a tutti; modelli che offrono la possibilità non solo di leggere l'architettura, ma di analizzarla, studiarla e scendere nel profondo delle sue peculiarità.

L'integrazione tra le tecniche, tra l'innovazione e la tradizione, ha portato a definire un ventaglio di soluzioni che rendono ad oggi il rilevamento architettonico una sfera nella quale ormai quasi tutto è leggibile con estrema qualità e accuratezza, favorendo la conoscenza e lo studio dell'architettura ad ogni tipo di scala, dal minimo particolare fino all'ambito territoriale.

BIBLIOGRAFIA

- ALBA M., et al., "Confronto tra differenti tecniche per la georeferenziazione di scansioni TLS", in *Atti 11° Conferenza Nazionale ASITA*, 2007
- ARRI E., SARTORI S., *Le misure di grandezze fisiche. Manuale di metrologia*. Paravia, Torino 1984
- ALICANDRO M., "Optimization and automation of the post-processing high resolution UAV photogrammetric data", in *Geomatics research*, 2017
- BARTOLUCCI D., *Principi di laser scanning 3D. Hardware, metodologie applicative, esempi*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2009
- BEINAT A., CROSILLA F., "Tecniche avanzate di allineamento di scansioni laser", in *La tecnica del laser scanning. Teoria ed applicazioni*, 2003
- BERNARDINI F., "Il posizionamento satellitare compie trent'anni: lo stato dell'arte del GNSS", in *GEOmedia*, 2008
- BERTOCCI S., BINI M., *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Citta Studi, Novara 2012
- BIANCHINI C., "Laser scanning X", in *Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la costruzione e fruizione di modelli virtuali 3D dell'architettura e della città*, 2007
- BINI M., *La dimensione dell'architettura. Note sulla rilevazione*, Alinea, Firenze 1982
- BOARDMAN C., BRYAN P., *3D Laser Scanning for Heritage. Advice and guidance on the use of laser scanning in archaeology and architecture*, Historic England, Swindon 2018
- BONFIGLI C., BRAGGIO C.R., *Geometria descrittiva e prospettiva*, Hoepli, Milano 2009
- BORNAZ L., "Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione", in *La tecnica del laser scanning terrestre*, 2006
- CARLUCCI R., "Dal GPS al GNSS", in *GEOmedia*, 2008
- CARLUCCI R., "Immagini, Droni e Multistation", in *GEOmedia*, 2013
- CASELLA V., "Introduzione al Laser Scanning Aereo", in *La tecnica del laser scanning. Teoria ed applicazioni*, 2003
- CENTO G., *Rilievo edilizio architettonico*, Vitali E Ghianda, Genova 1959
- CHIABRANDO F., COSTAMAGNA E., SPANÒ A., "La correlazione di immagini per la generazione di modelli 3D per il patrimonio costruito", in *Territorio Italia*, 2013
- COSTAGUTI G. B., FERRABOSCO M., *Architettura della basilica di S. Pietro in Vaticano*, Stamperia della Reverenda Camera Apostolica, Roma 1684
- COULAIS, J.F., *Images virtuelles et horizons du regard*, MetisPresses, Geneve 2015
- CROSILLA F., GALETTO R., *La tecnica del laser scanning. Teoria ed applicazione*, CISM, Udine 2003

DEL GAUDIO A., *Nuovo corso di topografia. Misura di angoli, distanze e dislivelli. Rilevamenti planimetrici e altimetrici*, Calderini, Bologna 1988

DEQUAL S., LINGUA A., BORNAZ L., *Integrazione del laser scanner con la fotogrammetria digitale: applicazioni di rilievo architettonico e ambientale*, CISM, Torino 2004

DE SANCTIS A., *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano. Evoluzione, nuove tecniche, nuovi modelli di conoscenza*, WriteUp Site, Roma 2019

DOCCI M., *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*, Gangemi, Roma 2011

DOCCI M., GAIANI M., MIGLIARI R., "Una nuova cultura per il rilevamento", in *Disegnare, idee, immagini*, 2001

DOCCI M., MAESTRI D., *Il rilevamento architettonico. Storia metodi e disegno*, Laterza, Bari 1984

DOCCI M., MAESTRI D., *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Bari 1993

DOCCI M., MAESTRI D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma 2009

DOMINICI D., et al., "Micro UAV for post seismic hazards surveying in old city center of L'Aquila", in *FIG Working Week*, 2012

FONDELLI M., *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Laterza, Bari 1992

FORTI G., *Fotografia. Teoria e pratica della reflex*, Reflex, Roma 2008

GRIMM D.E., "Leica Nova MS50. La prima MultiStation al Mondo", in *GEOmedia*, 2013

GRIMM D.E., ZOGG H.M., *Leica Nova MS50. White Paper*, Leica Geosystems AG, Heerbrugg 2013

HORSTMANN N., "Light amplification by stimulated emission of radiation" in *Phys Inform Technol*, 2002

KRAUS K., WALDHÄUSL P., *Fotogrammetria. Vol. 1 - Teoria e applicazioni*, a cura di DEQUAL S., Levrotto e Bella, Torino 1994

KRISHNAMURTHY V., LEVOY M., "Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes" in *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1996

LONG B., *Fotografia digitale il manuale*, Apogeo, Milano 2002

MAAR H., ZOGG H.M., *Leica Nova MS60. White Paper*, Leica Geosystems AG, Heerbrugg 2017

MONTI C., SELVINI A., *Topografia, fotogrammetria e rappresentazione all'inizio del ventunesimo secolo. Strumenti e modalità operative*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna 2015

PEREGO G., "Catturare la realtà per la progettazione BIM", in *GEOmedia*, 2019

REALE G., *Il pensiero antico*, Vita e pensiero, Milano 2001

RINAUDO F., NEX F., "LIDAR e Fotogrammetria Digitale verso una nuova integrazione", in *GEOmedia*, 2011

SAINT AUBIN J.P., *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*, a cura di BARATIN L. e SELVINI A., Moretti e Vitali, Bergamo 1999

SARTORI S., *Le misure nella scienza, nella tecnica, nella società. Manuale di metrologia*, Paravia, Torino, 1979

SELVINI, A., GUZZETTI F., *Fotogrammetria generale*, UTET, Torino 2000

SPANÒ N., CHIABRANDO F., LINGUA A., “New rapid mapping technologies. Researches upon innovative solutions and training experience”, in *Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino, 2019*

THOMSON W., “Electrical Units of Measurement” in *The practical applications of electricity*, 1884

VAGNETTI L., *Disegno e architettura*, Vitali e Ghianda, Genova 1958

VAGNETTI L., *Il linguaggio grafico dell'architetto, oggi*. Vitali e Ghianda, Genova 1965

VISINTINI D., FICO B., SPANGHER A., "Modellazione 3D dell'ambiente urbano mediante integrazione di scansioni laser aeree e terrestri: l'esempio del Castello di Gorizia" in *Atti del convegno SIFET*, 2006

VITRUVIUS POLLIO , *De architectura, Libri X*, a cura di BOSSALINO F., Kappa, Roma 2002

WORBOYS M., DUCKHAM M., *GIS: a computing perspective.*, CRC press, Boca Raton 2004

ZANNIER I., *Architettura e fotografia*, Laterza, Bari 1991

ZEVI B., *Saper vedere l'architettura*, Einaudi, 7a ed., Torino 1948

ZEVI B., “Architettura per il cinema e cinema per l'architettura” in *Bianco e Nero*, 1950

