

**NUOVI E VECCHI STRUMENTI
PER INDAGARE I FENOMENI IN NATURA**
Il laboratorio tra tradizione e innovazione

Firenze, 22 – 23 aprile 2026

SEZIONE TESINE BIENNIO

Secondo classificato

Il rilievo architettonico: dal metro al drone

Studenti

Bigiarini Gianni- Calami Vittoria - Carbone Mattia

Hasanbelli Cleria - Solari Matteo

Classi 2C – 2H

Istituto di Istruzione Superiore

Istituto Tecnico Industriale ISIS Valdarno

San Giovanni Valdarno (AR)

Docente Coordinatore

Granchi Simona

Dopo una analisi comparata delle caratteristiche dei diversi strumenti analogici e digitali per misure di distanze, gli studenti li utilizzano per il rilievo architettonico della facciata dell'edificio scolastico.

C'è una intelligente individuazione delle distanze da misurare per meglio eseguire il confronto degli strumenti, condotto con precisione e con accurata analisi degli errori sperimentali. Ulteriori confronti sono derivati dall'impiego delle stesse misure nella realizzazione di un prospetto dell'edificio con uno software specifico per disegno tecnico.

Relazione del Docente

Il tema di questa edizione ha aperto a molte possibilità nella scelta dell'argomento e dal confronto con i ragazzi sono emerse varie idee. Dopo una riflessione, tenendo conto della fattibilità del progetto e di ciò che maggiormente ha stimolato l'interesse degli studenti, abbiamo scelto di investigare sugli strumenti per il rilievo architettonico, pensando di applicarlo ad una parte di edificio del nostro istituto. Questo argomento non solo non rientra nel percorso di studi degli studenti, ma neanche nelle mie competenze, per cui è stato necessario affidarsi alle competenze di esperti esterni. È stato un cammino di scoperta per tutti: anche io discente tra discenti e questo mi ha permesso di condividere con gli studenti la fatica e le difficoltà del percorso.

Il gruppo è costituito da 5 studenti provenienti da due classi diverse e questo ha inizialmente creato qualche difficoltà relazionale che, però alla fine del percorso è stata superata serenamente, vista anche la necessità di collaborare e confrontarsi per eseguire le misure ed elaborare i risultati.

Il lavoro ha previsto inizialmente una fase di studio e approfondimento sugli strumenti di misura per il rilievo e come questi si sono evoluti nel tempo, poi abbiamo studiato la pianta dell'edificio per scegliere la parte da rilevare. La scelta di rilevare una facciata esterna è stata fatta per avere la possibilità di utilizzare anche il drone per fotogrammetria. L'idea iniziale è stata quella di misurare la stessa facciata con 4 diversi strumenti: la rotella metrica per misure dirette su alcune distanze definite, il teodolite ottico-meccanico, il laser scanner e il drone. Purtroppo non siamo riusciti a fare misure con il teodolite, perché non siamo riusciti ad individuare un giorno che conciliasse la disponibilità dell'esperto esterno con le condizioni meteorologiche favorevoli all'uso dello strumento.

Fortunatamente ci siamo riusciti con gli altri esperti che con rigore e professionalità, accompagnate da entusiasmo e passione, hanno spiegato agli studenti le caratteristiche degli strumenti, i loro impieghi e quando è vantaggioso utilizzarli e hanno eseguito con loro le misure e le successive fasi di elaborazione. Gli studenti hanno poi eseguito in autonomia le misure con la rotella metrica. L'obiettivo è stato quello di confrontare le misure del drone e del laser scanner per valutare la loro precisione nel rilievo della facciata. Gli studenti quindi hanno calcolato l'errore relativo percentuale delle misure del drone e del laser scanner rispetto a quelle della rotella metrica in quanto misure dirette. Hanno fatto un ulteriore confronto andando a ricostruire il prospetto della facciata con ProgeCAD, il software utilizzato dagli studenti nel percorso di disegno tecnico. Partendo rispettivamente dall'ortofoto ricavata dalle misure del drone e di quelle del laser scanner hanno realizzato due prospetti e li hanno confrontati per vedere il livello di sovrapposizione.

Infine hanno redatto e strutturato il loro elaborato, nel tentativo di comunicare non solo quanto hanno imparato, ma anche ciò che ha suscitato il loro interesse e la crescita delle loro conoscenze. Questa è stata la fase più complessa per la difficoltà ad organizzarsi e a strutturare una sequenza logica di passaggi, ma ritengo che alla fine abbiano imparato, almeno, l'importanza di riportare con chiarezza, sintesi e metodo un lavoro scientifico.

Complessivamente l'esperienza ha promosso la loro capacità critica nella ricerca delle informazioni, la loro capacità di cooperazione e di investigazione e ha messo alla prova il loro spirito pratico nella risoluzione dei problemi, non dando mai niente per scontato. Ciò che più li ha coinvolti è la passione e la professionalità degli esperti esterni, che hanno svolto non solo un ruolo di supporto ma anche orientativo, stimolando la loro abilità nel problem solving.



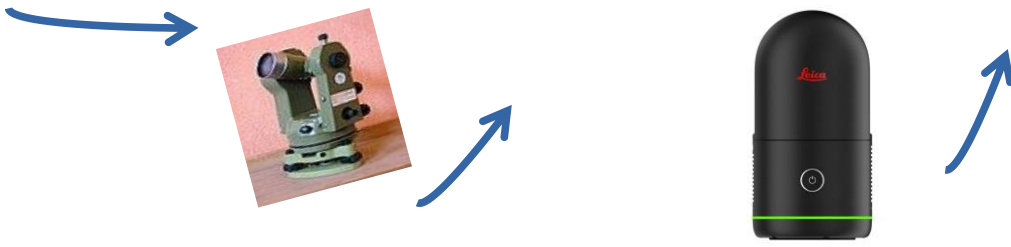
XXIII Edizione

Nuovi e vecchi strumenti per indagare i fenomeni in natura

"Il laboratorio tra tradizione e innovazione"

IL RILIEVO ARCHITETTONICO DAL METRO AL DRONE





A.S. 2025/2026

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
2. EVOLUZIONE TECNOLOGICA DEL RILIEVO	2
2.1. La storia del rilievo	2
2.2 Il rilievo puntuale.....	2
2.2.1 Il principio della triangolazione e la celerimensura: Il teodolite e il tacheometro	2
2.2.2. Stazione totale.....	4
2.3. Il rilievo massivo	4
2.3.1 Sistemi di georeferenziazione	4
2.3.2 Laser Scanner	5
2.3.3. Fotogrammetria digitale e uso del drone	6
3. IL RILIEVO DELLA FACCIATA DELLA SCUOLA.....	8
3.1 Misure con la rotella metrica	9
3.2 Misure con il Drone	9
3.3 Misure con il Laser Scanner	11
3.5 Ricostruzione della facciata in Progecad dalle ortofoto	12
3.6 Calcolo degli errori: strumenti a confronto	13
4. CONCLUSIONI.....	14
5. Bibliografia e sitografia	14
6. Ringraziamenti	15

1. INTRODUZIONE

La scelta dell'argomento che abbiamo deciso di trattare e con cui abbiamo deciso di partecipare alla XXIII Edizione di ScienzaFirenze non rientra molto nei percorsi curricolari del nostro Istituto, ma l'idea di fare qualcosa sul luogo dove trascorriamo gran parte delle nostre giornate ci ha spinti in questa direzione.

Il rilievo architettonico è l'insieme delle operazioni che permettono di misurare e rappresentare un edificio o una sua parte in modo fedele, cioè con dimensioni e forme corrette. Lo scopo non è solo "disegnare una pianta", ma ricostruire un modello misurabile che possa servire per manutenzione, ristrutturazione, restauro o semplicemente per conoscere meglio un manufatto.

In questa tesina descriviamo come sono cambiati nel tempo gli strumenti e i metodi di rilievo: dal metro e dalle misure dirette fino alle tecniche digitali, come laser scanner e fotogrammetria con drone. La nostra idea è stata quella di rilevare e riprodurre in scala una piccola parte dell'edificio della nostra scuola, mettendo a confronto strumenti di rilievo antichi e nuovi. Innanzitutto abbiamo cercato di capire come è fatta la nostra scuola andando a visionare le piantine fornite dall'Ufficio Tecnico della scuola, e su queste abbiamo individuato la porzione che desideravamo misurare. Abbiamo deciso di misurare e riprodurre una parte esterna e in particolare la facciata dell'ala più vecchia dell'edificio. Prima di intraprendere la parte operativa è stato necessario fare una ricerca per scoprire come si fa un rilievo e quali siano stati gli strumenti usati nel passato e oggi. La prima difficoltà incontrata è stata quella di reperire questi strumenti di cui non conoscevamo neanche il funzionamento. Grazie ad una rete di conoscenze, abbiamo avuto la possibilità di trovare due professionisti che subito si sono resi disponibili ad aiutarci con la loro strumentazione e la loro esperienza. Abbiamo eseguito 3 campagne di misure: una con la nostra rotella metrica, una con un drone, un'altra con il Laser scanner. Purtroppo non siamo riusciti ad eseguire le misure con il tacheometro a causa del maltempo che ci ha impedito di utilizzare lo strumento. Dalle misure ottenute con il Drone e il Laser scanner abbiamo rappresentato in scala la facciata del nostro istituto utilizzando Progecad, che è il Software che abbiamo imparato a Disegno Tecnico.

Abbiamo capito quanto l'evoluzione degli strumenti abbia influito in termini di velocità di esecuzione, di accuratezza, di quantità di dati acquisiti e di costi. Ma con la guida degli esperti abbiamo anche capito che la scelta di uno strumento rispetto ad un altro non dipende solo dalla qualità tecnologica, ma anche dall'uso che se ne vuol fare. Usare un drone per rilevare la larghezza di una porta, non avrebbe senso in termini di costi, di mole di dati e di precisione; così come oggi non avrebbe senso misurare il rilievo di un intero quartiere con la rotella metrica! Abbiamo voluto però fare anche un confronto quantitativo tra i vari strumenti andando ad individuare delle misure campione per ogni campagna e calcolandone l'errore relativo. L'argomento ci ha appassionato molto e soprattutto siamo stati colpiti dalla disponibilità e professionalità degli esperti esterni.

Abbiamo inoltre imparato come scrivere una tesina scientifica, lavorare in gruppo, passandoci i dati tra di noi, incontrandoci tutte le settimane e facendo incontri con professionisti che ci hanno spiegato il funzionamento delle varie strumentazioni che abbiamo utilizzato.

2. EVOLUZIONE TECNOLOGICA DEL RILIEVO

L'evoluzione tecnologica del rilievo è il passaggio da metodi manuali e diretti a sistemi strumentali e digitali, sempre più precisi, rapidi e capaci di descrivere la realtà in modo

completo [1], [2]. Questa evoluzione ha cambiato strumenti, tempi, accuratezza e risultati del rilievo architettonico. Ha portato dal rilievo diretto manuale a sistemi digitali avanzati basati su acquisizione puntuale e massiva dei dati, aumentando precisione, rapidità e completezza della rappresentazione, fino all'integrazione in modelli informativi tridimensionali.

2.1. La storia del rilievo

Da sempre l'architettura ha bisogno di misurare. Nell'antichità si utilizzavano strumenti semplici (corde, squadre, fili a piombo) e conoscenze geometriche di base [1]. I Romani, per esempio, usavano la groma per tracciare allineamenti ortogonali sul terreno [3]. Nel Rinascimento la nascita della prospettiva e dei metodi di rappresentazione (piante, prospetti, sezioni) rende necessario misurare con più rigore: compaiono strumenti che uniscono misura e disegno sul campo.

Tra Settecento e Ottocento la misura diventa "scienza": le tecniche geodetiche (reti di triangoli, calcoli trigonometrici) vengono applicate anche agli edifici [2], [4]. Il simbolo di questa fase è il teodolite meccanico, capace di misurare angoli con precisione elevata [6]. Nel Novecento l'elettronica elimina molte trascrizioni manuali, velocizza il lavoro e porta alla nascita della stazione totale [4],[8], che unisce misura di angoli e distanze e calcola direttamente coordinate 3D. Nel XXI secolo si diffondono le tecniche "massive": la realtà viene acquisita come nuvola di punti o modello 3D, avvicinandosi all'idea di "gemello digitale" e al workflow Scan-to-BIM [14].

2.2 Il rilievo puntuale

Con "rilievo puntuale" (o discreto) si intende un rilievo in cui si misurano pochi punti scelti, ma con precisione alta [4]. I punti rappresentano spigoli, angoli di muri, quote di davanzali, vertici di finestre: cioè quei punti che descrivono la geometria dell'edificio. Il rilievo puntuale è ottimo per tracciamenti in cantiere e per produrre disegni 2D (piante, prospetti, sezioni) quando la superficie non è troppo complessa.

Il rilievo puntuale di solito si divide in due fasi gerarchiche [5]:

- Inquadramento (o appoggio): si costruisce lo "scheletro" del rilievo fissando coordinate di alcune stazioni.
 - Dettaglio: partendo dalle stazioni note, si misurano i punti della facciata o degli ambienti.
- Nel rilievo tradizionale l'inquadramento si faceva con la triangolazione; il dettaglio con la celerimensura (misure indirette tramite angoli e letture su stadia) [4],[5]. Oggi molte operazioni sono svolte più velocemente dalle stazioni totali, ma i principi geometrici restano gli stessi.

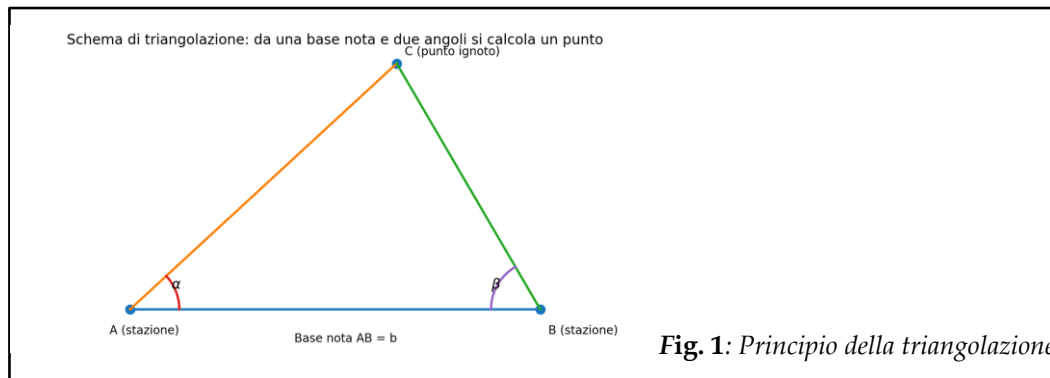
2.2.1 Il principio della triangolazione e la celerimensura: Il teodolite e il tacheometro

Il principio matematico-geometrico fondamentale su cui si basa tutta la tecnica del rilievo è la triangolazione [4,7] che è una tecnica usata per determinare la posizione di punti lontani (stazioni) misurando angoli e partendo da una base AB nota. La geometria di base è il teorema dei seni. Se conosciamo la lunghezza della base $b = AB$ e misuriamo gli angoli α e β ai vertici A e B, possiamo calcolare le distanze AC e BC e quindi la posizione del punto C (in un sistema di riferimento scelto) [4], come mostrato in Fig.1.

Per il teorema dei seni, nel triangolo ABC vale:

$$\frac{AC}{\sin(\beta)} = \frac{AB}{\sin(\gamma)} \Rightarrow AC = AB \frac{\sin(\beta)}{\sin(\gamma)}$$

con $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$.



Una volta fissate le stazioni, si passa al rilievo di dettaglio. La

celerimensura (o tachimetria) è una tecnica che permette di ricavare le coordinate di un punto P misurando:

- l'angolo orizzontale (azimut Az);
- l'angolo verticale (spesso espresso come angolo zenitale φ o Z);
- una distanza (diretta con

distanziometro oppure indiretta con stadia e fili stadimetrici).

Triangolazione e celerimensura non sono tecniche "in concorrenza": la prima crea l'inquadramento, la seconda descrive i dettagli appoggiandosi all'inquadramento.

Gli strumenti utilizzati iniziali sono stati i **teodoliti** e **tacheometri** fino ad arrivare alle stazioni totali che automatizzano quasi tutti questi calcoli, ma la logica geometrica è la stessa.

Il **teodolite** (Fig.2) è uno strumento ottico-meccanico (o elettronico) usato per misurare con precisione angoli orizzontali e verticali [6]. È basato su due cerchi graduati ortogonali: uno orizzontale (per gli azimut) e uno verticale (per gli angoli zenitali), e su un cannocchiale che può ruotare attorno a due assi [5].

Per fare misure corrette il teodolite deve essere "messo in stazione", cioè:

- 1) posizionato su treppiede;
- 2) centrato sul punto a terra (piombo ottico o laser);
- 3) livellato con le viti calanti fino a portare la bolla al centro;
- 4) orientato (ad esempio verso una stazione nota) se si vogliono azimut coerenti [6].

La misura dell'angolo orizzontale tra due punti A e B si ottiene leggendo il cerchio orizzontale sul punto A (lettura iniziale) e sul punto B (lettura finale): la differenza è l'angolo $\angle AOB$. Il teodolite classico misura solo angoli. Le distanze possono essere ricavate con metodi indiretti:



Fig. 2: teodolite ottico-meccanico

- stadimetria: usando fili stadimetrici e stadia graduata;
- triangolazione: se un lato è noto e gli angoli sono misurati, si calcolano gli altri lati con la trigonometria [6].

Il tacheometro è un'evoluzione del teodolite pensata per rendere più veloce il rilievo di dettaglio [5]. In pratica rinuncia a una parte della precisione angolare per integrare soluzioni che permettono di stimare la distanza più rapidamente, spesso con letture su

stadia o con sistemi ottici dedicati. In ambito moderno, quando il teodolite integra un distanziometro elettronico (EDM), si passa alla stazione totale.

2.2.2. Stazione totale

La stazione totale è uno strumento elettronico di alta precisione che rappresenta la fusione perfetta tra il teodolite tradizionale e il distanziometro elettronico [4,8]. Il distanziometro



Fig. 3: Schema di una stazione totale

elettronico (EDM), misura la distanza inclinata (spesso con un laser o infrarosso) verso un prisma riflettente oppure, in alcuni modelli, direttamente sulla superficie (misura "senza prisma"). Questo matrimonio

tecnologico permette di misurare simultaneamente angoli orizzontali, angoli verticali e distanze, rivoluzionando completamente l'approccio al rilievo topografico.

Il termine "totale" deriva proprio dalla capacità dello strumento di fornire tutte le informazioni necessarie per determinare la posizione tridimensionale di un punto nello spazio, eliminando la necessità di utilizzare strumenti separati per diverse tipologie di misurazioni. La stazione totale è lo strumento che, per molti anni, ha rappresentato il "massimo" nel rilievo puntuale. Per ogni punto battuto, lo strumento misura una distanza inclinata s e due angoli. Il software interno risolve il triangolo nello spazio e restituisce coordinate 3D. Il grande vantaggio è la precisione (millimetrica) e la gestione digitale dei dati. Il limite è intrinseco: si misura un punto per volta. Su una facciata ricca di dettagli o su una superficie complessa, per ottenere completezza bisognerebbe misurare moltissimi punti, rendendo il rilievo lento [1].

2.3. Il rilievo massivo

Con il termine rilievo massivo ci si riferisce a tecniche di acquisizione digitale in grado di catturare un'enorme quantità di dati spaziali in tempi estremamente ridotti rispetto ai metodi tradizionali.

Invece di misurare singoli punti specifici (metodo discreto), il rilievo massivo genera una nuvola di punti (point cloud) che descrive l'intera superficie dell'oggetto o del territorio con alta densità e precisione [12].

le tecniche principali che vengono utilizzate sono:

- sistemi di georeferenziazione, *Global Navigation Satellite System* (GNSS), per inquadramento e controllo;
 - Laser Scanner Terrestre (TLS), per nuvole di punti molto dense;
 - Fotogrammetria digitale, spesso con drone (UAV), per ricostruire 3D e produrre ortofoto.
- Spesso i metodi si integrano: per esempio GNSS o stazione totale per creare punti di controllo (GCP) e laser scanner o drone per acquisire i dettagli

2.3.1 Sistemi di georeferenziazione [9, 10, 15]

La georeferenziazione è il processo tecnico che assegna coordinate geografiche note (latitudine/longitudine o coordinate piane) a dati spaziali, come mappe raster, immagini satellitari o disegni CAD, allineandoli alla loro posizione reale sulla Terra. Utilizzata nei GIS (sistema informativo geografico) e software topografici, è fondamentale per l'analisi spaziale, la pianificazione urbana e la navigazione.

GPS *Global Positioning System* è un sistema di posizionamento e navigazione satellitare militare statunitense. Il suo grado attuale di accuratezza è dell'ordine di pochi metri, in dipendenza dalle condizioni meteorologiche, dalla disponibilità e dalla posizione dei satelliti rispetto al ricevitore, dalla qualità e dal tipo di ricevitore, dagli effetti di radiopropagazione del segnale radio in ionosfera e troposfera (es. rifrazione), e dagli effetti della relatività.

Il **GNSS** (sistema satellitare globale di navigazione) [9] è un termine più generale che include più costellazioni (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, ecc.). Un ricevitore calcola la posizione misurando la distanza da almeno quattro satelliti, attraverso il tempo di propagazione dei segnali radio (pseudorange). In pratica, il ricevitore risolve una trilaterazione nello spazio (intersezione di "sfere" di distanza)

Un tale sistema fornisce un servizio di posizionamento geo-spaziale a copertura globale che consente a piccoli ed appositi ricevitori elettronici di determinare le loro coordinate geografiche (longitudine, latitudine ed altitudine) su un qualunque punto della superficie terrestre o dell'atmosfera con un errore di pochi metri, elaborando segnali a radiofrequenza trasmessi in linea di vista da tali satelliti. Tra questi si annoverano il sistema statunitense NAVSTAR Global Positioning System (GPS), tuttora pienamente operativo. Il sistema russo GLONASS, pienamente operativo dal dicembre 2011. Il sistema europeo Galileo è entrato in servizio il 15 dicembre 2016. Tuttora in fase di implementazione, si prevede la sua piena operatività nel 2019. La Cina vuole espandere e rendere globale il sistema di posizionamento Beidou per ora regionale. L'India infine sta sviluppando IRNSS, un sistema GNSS di nuova generazione

In rilievo architettonico il GNSS è molto utile per fissare capisaldi esterni e punti di controllo. Tuttavia vicino a facciate alte o in corti interne il segnale può degradarsi per ostacoli e riflessioni (multipath).

2.3.2 Laser Scanner [12]

Il Laser Scanner Terrestre (TLS) è uno strumento che "scansiona" l'ambiente e misura milioni di punti 3D in pochi minuti. Ogni punto della nuvola è una terna di coordinate (X, Y, Z) e

spesso include informazioni aggiuntive: intensità del riflesso e colore RGB (se lo scanner integra una fotocamera) [14].

Come misura la distanza?

Il TLS invia un raggio laser verso la superficie e misura la distanza con due metodi principali [1]:

1) Tempo di volo (Time-of-Flight, ToF): si misura il tempo Δt tra emissione e ritorno del segnale.

La distanza (d) è:

$$d = c \cdot \Delta t / 2$$

dove c è la velocità della luce.

2) Differenza di fase (Phase Shift): si emette un'onda modulata e si misura lo sfasamento $\Delta\phi$ tra segnale emesso e ricevuto. Lo sfasamento è legato alla distanza (a seconda della lunghezza d'onda e della modulazione).

Oltre alla distanza, lo strumento varia sistematicamente la direzione del raggio (scansione angolare), grazie a specchi rotanti o alla rotazione della testa dello strumento. In questo modo ottiene un "reticolo" di misure su tutto il campo visivo.

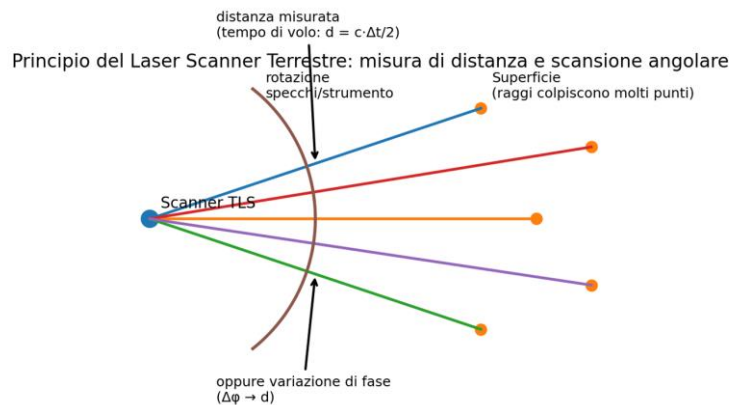


Fig. 4: Principio di

funzionamento TLS: misura distanza + scansione angolare.

Una singola scansione vede solo ciò che è "in linea di vista". Se un elemento è nascosto da un pilastro o da una sporgenza, lo scanner non lo misura. Per questo in un rilievo reale si fanno più stazioni di scansione, spostando lo strumento e garantendo sovrapposizione tra le nuvole. Le scansioni devono essere portate in un unico sistema di riferimento. Questo processo si chiama registrazione. Si può fare:

- con target (bersagli) o sfere riconosciute automaticamente;
- con algoritmi di "best fit" che sovrappongono le nuvole nelle zone comuni (ad esempio ICP: Iterative Closest Point).

Se si vogliono coordinate assolute, si collegano target o punti a coordinate note (da stazione totale o GNSS).

La precisione del rilievo dipende da vari fattori:

- distanza scanner-oggetto: più è lontano, più cresce il rumore;
- angolo di incidenza: superfici molto oblique riflettono peggio;
- materiali: vetro, superfici lucide o molto scure possono dare errori;
- ambiente: pioggia, polvere, luce solare intensa (in alcuni casi) possono disturbare.

La nuvola di punti non è il punto di arrivo: da essa si estraggono sezioni, prospetti

ortorettificati, piante, oppure si crea un modello BIM (Building Information Modeling). Questo processo è noto come Scan-to-BIM (o HBIM per beni storici) [14].

2.3.3. Fotogrammetria digitale e uso del drone [11],[13]

La fotogrammetria digitale ricostruisce forme 3D a partire da fotografie 2D, sfruttando il fatto che lo stesso punto dell'oggetto appare in più immagini scattate da posizioni diverse. Il software trova automaticamente i "punti omologhi" (tie points) e, tramite calcoli di geometria proiettiva, determina sia la posizione delle camere sia la nuvola di punti 3D (Structure-from-Motion, SfM) [8].

Quando la fotogrammetria viene fatta con drone (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), si ottiene un grande vantaggio: si possono riprendere tetti, facciate e aree inaccessibili da terra in modo rapido. I prodotti finali più comuni sono:

- ortofoto: immagine corretta geometricamente, misurabile come una mappa;
- nuvola di punti densa e mesh 3D;
- modello digitale di superficie (DSM) e, in certi casi, del terreno (DTM) [8].

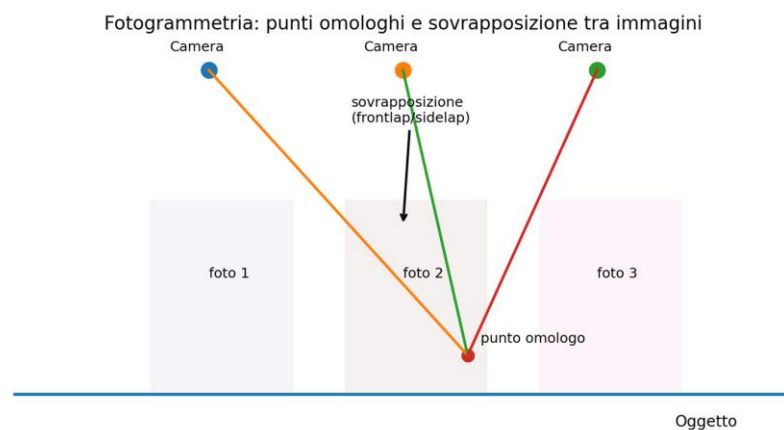


Fig. 5: Fotogrammetria: punti

omologhi e sovrapposizione tra immagini.

Per ottenere un modello preciso non basta "fare foto". Serve un **piano di volo** con parametri corretti, in particolare [8-11]:

- quota e distanza dall'oggetto (legata alla risoluzione a terra, GSD - Ground Sample Distance);
- sovrapposizione tra immagini (frontlap e sidelap): spesso 70-85% (o più) per assicurare molti punti omologhi;
- traiettorie: griglia per superfici orizzontali; missioni "a facciata" con traiettorie verticali per prospetti;
- condizioni di luce: evitare forti ombre e riflessi; preferire luce diffusa.

Una regola utile: se il GSD è piccolo (foto molto dettagliate), il modello può essere più preciso, ma aumenta il numero di immagini e quindi il tempo di elaborazione. Il GSD dipende da quota, focale e dimensione del sensore.

Per avere coordinate affidabili e ridurre deformazioni del modello, si usano Ground Control Points (GCP): punti ben visibili nelle foto con coordinate misurate a terra (con stazione totale o GNSS RTK).

Ricordiamo che RTK sta per Real-Time Kinetic, cioè il sistema fornisce la posizione in tempo reale, mentre con PPK che sta per Post-Processing Kinetic, la posizione viene elaborata successivamente con software dedicati.

Il software “ancora” il modello a questi punti. In alternativa, alcuni droni hanno GNSS RTK integrato e registrano posizioni più precise (RTK/PPK). Anche in questi casi i GCP sono spesso consigliati come verifica.

L’ortofoto è ottenuta correggendo prospettiva e distorsioni con il modello 3D e con i parametri della camera. A differenza di una foto normale, le distanze misurate sulle ortofoto sono (quasi) reali, perché l’immagine è proiettata su un piano o su un modello di superficie. Per questo l’ortofoto è molto utile per prospetti, coperture e cartografia. Quando si fa un rilievo con il drone è necessario tenere in conto di alcuni fattori come il vento e la pioggia che possono rendere instabile il volo e peggiorare le immagini; la presenza di superfici uniformi (muri bianchi) o riflettenti (vetro) che possono dare pochi punti omologhi e infine serve rispettare le regole di volo (aree vietate, quote, privacy) e operare in sicurezza.

Nel rilievo architettonico è frequente combinare TLS e drone: lo scanner descrive molto bene le parti verticali e interne, mentre il drone copre tetti e parti alte. Le due nuvole si uniscono tramite target o GCP, ottenendo un modello completo.

A valle delle descrizioni fatte riportiamo schematicamente una tabella (Tab. 1) in cui si confrontano gli strumenti analizzati, in termini di precisione, vantaggi e limiti.

Strumento	Principio operativo	precisione tipica	Vantaggi chiave	Limiti
metro a nastro/flessometro	misurazione diretta	da cm a decine di cm	semplicità, costo nullo	accumulo errori,
teodolite	misura angoli	alta angolare (1-5")	precisione angolare, base per rilievi indiretti	non misura distanze, lento
stazione totale	angoli + distanze	1-5 mm	coordinate 3D dirette, memorizzazione	lento per superfici complesse
GNSS/GPS	Triangolazione segnali satellitari	da mm a cm	velocità, georeferenziazione assoluta	necessità cielo libero
Laser scanner terrestre(TLS)	tempo di volo/fase laser	da sub-mm a pochi mm	altissima densità di dati, rilievo a distanza	costi,tempi di elaborazione
fotogrammetria digitale(UAV)	ricostruzione da immagini 2D	da pochi mm a qualche cm	rilievo aree estese/ inaccessibili	sensibilità e,texture/luce

Tab.1.: strumenti a confronto

3. IL RILIEVO DELLA FACCIATA DELLA SCUOLA

Gli strumenti descritti sopra sono stati utilizzati per rilevare la facciata evidenziata nella pianta riportata in Fig.6.

Fig. 6: *Pianta del Piano Terra della scuola con evidenziata la facciata rilevata con le frecce rosse*

Grazie alla collaborazione con professionisti esterni abbiamo rilevato le misure della facciata e abbiamo ricostruito con Progecad la facciata, estraendola dalle ortofoto acquisite sia con il drone sia con il laser scanner.

Inoltre abbiamo individuato sulla facciata 5 distanze (D1, D2, D3, D4, D5) e 4 altezze (h1, h2, h3, h4) e le abbiamo rilevate anche con la rotella metrica.

In Fig.7 riportiamo l'immagine della facciata su cui evidenziamo le misure effettuate.

Fig. 7: Facciata della scuola con indicate le distanze e le altezze misurate con tutti gli strumenti **3.1**
Misure

con la rotella metrica

La rotella metrica o cordella metrica è un metro a nastro costruito per potersi avvolgere su un apposito arrotolatore . Normalmente in commercio si trovano rotelle (sia in tessuto che metalliche) con lunghezze comprese tra i 10 e i 100 m, aventi risoluzioni da 1-0,5-10 mm.

Nel nostro caso abbiamo utilizzato abbiamo utilizzato una rotella metrica con portata di 20,00 m e sensibilità 0,01 m. Per effettuare le misure abbiamo preso il metro alle due estremità e le abbiamo posizionate tra i due punti che volevamo misurare.

Abbiamo misurato le distanze tra i punti descritti sopra per confrontarle con le misure effettuate con gli altri strumenti. Poiché le misure con la rotella sono misure dirette le abbiamo utilizzate come riferimento per le altre. Le fonti di errori che abbiamo riscontrato sono la lettura del metro, il posizionamento del metro e le discontinuità del muro che possono aver interferito con la misura.

3.2 Misure con il Drone



Fig. 8: Il Drone l'Autel EVO II Pro

Il Drone utilizzato è l'Autel EVO II Pro (Versione 6K) , Fig.8, è la variante della serie EVO II maggiormente orientata alla fotografia professionale, alle produzioni video di alta qualità e ai rilievi fotogrammetrici, grazie al suo sensore di grandi

dimensioni con apertura variabile. Le caratteristiche principali della fotocamera sono la risoluzione delle foto: 20 MP (5472x3648) e dei video: Fino a 6K @ 30fps, 4K @ 60fps e 2.7K @ 120fps. I formati video sono Mp4 e MOV.

Il drone può volare con un'autonomia massima di 40 minuti in assenza di vento e raggiunge una velocità massima di 20 m/s. Il drone può rilevare su 360° la presenza di ostacoli grazie ad un sistema di 12 sensori e può seguire soggetti in movimento prevedendone la traiettoria anche se momentaneamente occultati.

Grazie ad un radiocomando che include uno schermo OLED è possibile impostare i parametri di volo principali.

I dati acquisiti in volo sono memorizzati in una memoria interna di 8 GB interni, espandibili tramite MicroSD (fino a 256 GB). Il dispositivo è molto leggero, infatti pesa 1191 g.

Il modulo RTK (Real-Time Kinematic) è l'accessorio specializzato che trasforma il drone da uno strumento per riprese video a uno strumento di precisione per mappatura, fotogrammetria e rilievi tecnici. In sintesi, il modulo corregge l'errore intrinseco dei sistemi GPS tradizionali, portando la precisione del posizionamento da metri a centimetri. Il modulo RTK è installato fisicamente sulla parte superiore del drone. Funziona ricevendo segnali dai satelliti e incrociandoli con i dati provenienti da una stazione base a terra o da una rete di stazioni fisse.

Le acquisizioni con il drone sono state fatte contemporaneamente a quelle con il Laser scanner, in modo che i due professionisti potessero stabilire i punti di riferimento.

Il drone è stato telecomandato dall'esperto esterno che però ci ha spiegato ogni passaggio. Dopo avere impostato il piano di volo con i parametri riportati in tabella Tab.2, per acquisire la facciata della nostra scuola, il dispositivo è salito in volo e vista la sua velocità è stato possibile acquisire l'intero edificio scolastico. Sono state acquisite, dunque molte immagini da cui, nella successiva fase di elaborazione è stata estratta l'ortofoto della facciata interessata, riportata in Fig.7. L'ortofoto è stata elaborata tenendo conto dei punti di riferimento forniti dalla campagna di acquisizione con il Laser Scanner.

Parametro	valore impostato
Altezza volo	60 m
velocità	5 m/s

Overlap	70%
angolo Gimbal	-90°(nadir)
Stato RTK	fisso

Tab.2: Tabella con i parametri di volo del drone

Di seguito in Fig. 9 riportiamo l'immagine della nuvola di punti 3D acquisita e elaborata della facciata dell'edificio e l'ortofoto estratta (Fig.10).



Fig.

9: Nuvola di punti 3D della facciata misurata



Fig. 10: ortofoto estratta

3.3 Misure con il Laser Scanner

Per il nostro rilievo abbiamo utilizzato il laser scanner **Leica BLK360 G2** (Fig.11), prodotto dalla Leica Geosystems. È uno strumento molto moderno e preciso che serve per rilevare ambienti e creare modelli 3D. Funziona grazie a un sistema laser che misura 680.000 punti al secondo e crea una "nuvola di punti", cioè un insieme di punti che ricostruiscono in modo realistico tutto ciò che si trova intorno. Inoltre scatta immagini a 360°, così oltre alle misure registra anche i colori e i dettagli. Per fare il rilievo abbiamo scelto 15 diverse stazioni di misura

davanti alla facciata da rilevare, come riportato in Fig.12.

In ogni punto abbiamo posizionato lo scanner su un treppiede e avviato la scansione tramite controllo elettronico. Ogni scansione durava 20 secondi e lo strumento univa automaticamente i dati raccolti.

Alla fine della campagna di acquisizione che è durata circa un'ora, abbiamo ottenuto una grossa mole di dati che successivamente sono stati elaborati con il software dedicato



Fig. 11: immagine laser scanner Leica BLK360 G2

Fig. 12: Le 15 postazioni di acquisizione con il Laser scanner

Ciò che abbiamo ottenuto sono stati:

immagini panoramiche, nuvole di punti 3D, e un'ortofoto dettagliata della facciata. Nelle Fig. 13 a-b e Fig.14 riportiamo alcuni esempi.

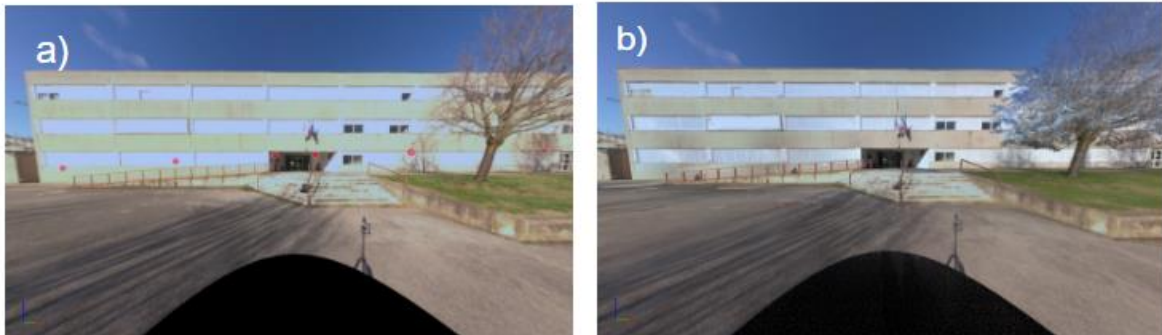


Fig. 13: a) immagine panoramica della facciata b) sezione di una nuvola di punti della stessa facciata di a)



Fig. 14: immagine di un dettaglio dell'immagine 13 b), in cui si osserva bene la presenza della nuvola di punti.

3.5 Ricostruzione della facciata in Progecad dalle ortofoto

Con il software ProgeCad abbiamo realizzato due prospetti: uno sull'ortofoto del Laser scanner e uno sull'ortofoto del drone, per rilevare eventuali differenze. ProgeCad è l'applicazione che noi usiamo a scuola per fare i disegni tecnici. Abbiamo inserito su ProgeCad le ortofoto per realizzare i prospetti della facciata utilizzando delle linee di colore diverso: blu per il drone (Fig.15) e rosso per il laserscanner (Fig.16). Per la ricostruzione del prospetto abbiamo tracciato i segmenti che univano i punti più definiti nelle immagini migliori.

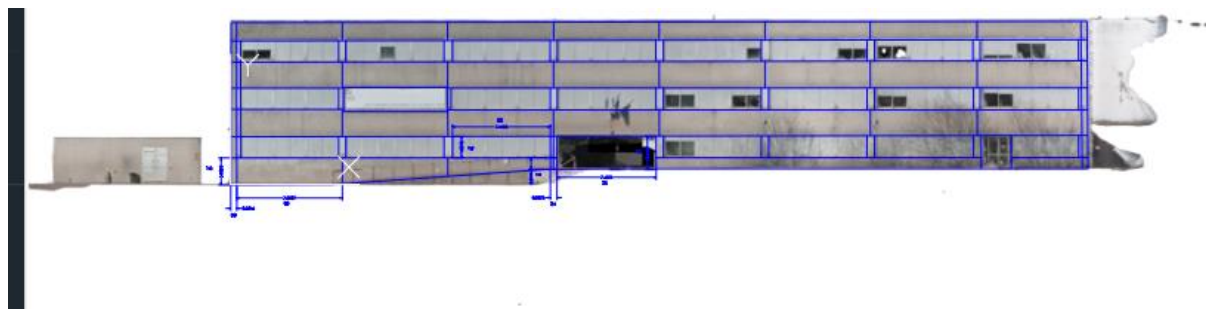


Fig. 15: Prospetto della facciata sull'ortofoto del rilievo con il drone



Fig. 16: Prospetto della facciata sull'ortofoto del rilievo con il laser scanner

I disegni sono risultati sovrapponibili a meno di qualche errore dovuto al fatto che l'ortofoto del drone in alcuni punti ha presentato una minore definizione e quindi è stato più difficile ricostruire il prospetto.

3.6 Calcolo degli errori: strumenti a confronto

Nella tabella Tab.3 sono scritte le misure delle distanze e altezze riportate in Fig.7 prese con i diversi strumenti.

	D1(m)	D2(m)	D3(m)	D4(m)	D5(m)	h1(m)	h2(m)	h3(m)	h4(m)
Rotella metrica	7,51	7,46	7,64	0,50	0,44	2,42	1,61	1,97	0,83
Laser scanner	7,50	7,45	7,60	0,49	0,47	2,43	1,61	1,98	0,83
Drone	7,47	7,45	7,96	0,51	0,50	2,44	1,67	1,99	0,81

Tab.3: misure realizzate con i differenti strumenti

Dopo aver preso tutte le misure abbiamo calcolato l'errore relativo percentuale ($E_R\%$) delle misure del drone e del laser scanner rispetto a quelle della rotella metrica utilizzando la formula:

$$E_R\% = \left| \frac{\text{Misuraconrotella} - \text{Misurastrumento}}{\text{Misuraconrotella}} \right|$$

Abbiamo scelto di utilizzare come misura di riferimento quella della rotella metrica perché nonostante la sua bassa sensibilità è comunque una misura diretta. Dai risultati ottenuti possiamo dire che gli errori relativi calcolati su ciascuna misura sono piccoli ma abbiamo rilevato che l'errore relativo delle misure eseguite con il Laser scanner è mediamente più piccolo ($0\% < E_R\% < 6,82\%$) rispetto a quello con il drone ($0,53\% < E_R\% < 13,64\%$).

Abbiamo rilevato che la differenza maggiore tra gli errori relativi è quella riferita alle misure di distanze più piccole come nel caso di D5.

Er%	D1	D2	D3	D4	D5	h1	h2	h3	h4
Laser scanner	0,13%	0,13%	0,52%	2,00%	6,82%	0,41%	0,00%	0,51%	0,00%
Drone	0,53%	0,13%	4,19%	2,00%	13,64%	0,83%	3,73%	1,02%	2,41%

Tab.4: errori relativi sulle misure dei diversi strumenti rispetto a quelle ottenute con la rotella metrica

4. CONCLUSIONI

Grazie a questo lavoro, abbiamo conosciuto gli strumenti per il rilievo architettonico e dopo averne studiato alcune loro caratteristiche, ne abbiamo utilizzati alcuni per fare un piccolo rilievo di una facciata della nostra scuola. In particolare abbiamo utilizzato la rotella metrica, il laser scanner e il drone per il rilievo fotogrammetrico.

Abbiamo confrontato le misure ottenute con i tre strumenti calcolando gli errori relativi su alcune distanze selezionate e facilmente accessibili con la rotella metrica e abbiamo riscontrato che il laser scanner è più preciso rispetto al drone anche se quest'ultimo è in grado di acquisire una grossa mole di dati più velocemente. Anche nel caso della costruzione del prospetto con Progecad, l'individuazione dei punti nell'ortofoto del drone si è rivelata più difficile, ma, come ci hanno fatto notare gli esperti esterni, la scelta dello strumento più adatto non dipende solo dalla precisione, ma anche da altri fattori e principalmente dal tipo di oggetto che si vuole misurare, dalla velocità di esecuzione e dai costi.

5. Bibliografia e sitografia

- [1] Treccani – Enciclopedia Italiana. *Topografia*.
<https://www.treccani.it>
- [2] Treccani – Enciclopedia Italiana. *Geodesia*.
<https://www.treccani.it>
- [3] Museo Galileo – Istituto e Museo di Storia della Scienza (Firenze). *Strumenti topografici storici*.
<https://www.museogalileo.it>
- [4] Cannarozzo, R., Cucchi, U., Meschieri, A. (2015). *Topografia* – Volume 1. Zanichelli.
- [5] AA.VV. (Hoepli). *Corso di Topografia per Istituti Tecnici CAT*. Hoepli.
- [6] Treccani – Enciclopedia Italiana. *Teodolite*.
<https://www.treccani.it>
- [7] Università di Bologna – Dipartimento DICAM. *Appunti introduttivi di Topografia e Rilievo*. (Materiale didattico disponibile online)
- [8] Leica Geosystems Italia – Sezione Didattica. *Come funziona una stazione totale*.
<https://leica-geosystems.com/it-it>
- [9] Agenzia Spaziale Italiana (ASI). *Il sistema GNSS e Galileo*.
<https://www.asi.it>
- [10] Esri Italia. *Cos'è un GIS?*
<https://www.esriitalia.it>
- [11] Centro Italiano di Fotogrammetria e Topografia (CIFT). *Introduzione alla fotogrammetria digitale*.
- [12] Politecnico di Milano – Laboratorio di Rilievo. *Laser Scanner e tecniche di rilievo 3D*.
(Materiali divulgativi disponibili online)
- [13] ENAC (2023). *Regolamento UAS – Droni*.
<https://www.enac.gov.it>
- [14] Docci, M., Maestri, D. (2009). *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Laterza.
- [15] Agenzia delle Entrate – Catasto. *Georeferenziazione e sistemi di coordinate*.

6. Ringraziamenti

Desideriamo ringraziare i due esperti esterni che con professionalità, passione e generosità hanno messo a disposizione la loro strumentazione per il rilievo architettonico e ci hanno fornito i dati elaborati spiegandoci come utilizzarli.

Sono stati per noi un supporto fondamentale per capire, conoscere e soprattutto per portare a termine la nostra relazione scientifica.