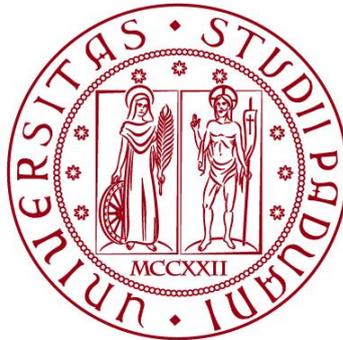


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Tecnologie Digitali per l'Edilizia e il Territorio



TESI DI LAUREA

**“PROCEDURE GEOMATICHE PER LA RETE DI
LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE NAZIONALE.
CASO DI STUDIO: PROGETTO, MISURA ED
ELABORAZIONI DI LINEE NELL’AREA DELTIZIA DEL
FIUME PO”**

“GEOMATHIC PROCEDURES FOR THE NATIONAL HIGH- PRECISION LEVELLING
NETWORK. CASE STUDY: PROJECT, MEASUREMENT AND PROCESSING OF LINES IN
THE PO RIVER DELTA AREA”

Relatore: Prof. Ing. ANDREA MENIN

Laureanda: GIADA TRENTIN
Matricola: 2043275

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

*Alla mia famiglia
con affetto*

-	INTRODUZIONE.....	7
-	1.0 RETE ALTIMETRICA FONDAMENTALE ITALIANA	9
	1.1 GENERALITA' E DEFINIZIONI.....	9
	1.2 PROGETTAZIONE E RICOGNIZIONE	12
	1.3 SEGNALIZZAZIONE.....	12
	1.4 MISURE.....	13
	1.5 TOLLERANZE	14
-	2.0 STRUMENTAZIONE.....	16
	2.1 GENERALITÀ.....	16
	2.2 LIVELLI DIGITALI.....	17
	2.3 ACCESSORI	21
-	3.0 LA RETE ALTIMETRICA NELL'AREA DEL DELTA DEL PO	22
	3.1 PROGETTO, RICOGNIZIONE E MATERIALIZZAZIONE	22
	3.2 ESECUZIONE DELLE MISURE	35
	3.3 PRE-PROCESSAMENTO DEL DATO MISURATO	36
	3.4 CONTROLLI IN CORSO D'OPERA	41
	3.5 COLLAUDI IN CAMPO.....	41
	3.6 VERIFICA DELLE CHIUSURE.....	42
	3.7 COMPENSAZIONE DELLA RETE.....	50
	3.8 RESTITUZIONE E MONOGRAFIE	52
-	4.0 LIVELLAZIONE ALTIMETRICA DI PRECISIONE	53
	4.1 GENERALITA' E DEFINIZIONI.....	53
	4.2 COMPENSAZIONE OSSERVAZIONI.....	54
	4.2.1 IL METODO DI COMPENSAZIONE ALLE OSSERVAZIONI INDIRETTE	54
	4.3 COMPENSAZIONE DELLE RETI DI LIVELLAZIONE	60
-	CONCLUSIONI	63
-	BIBLIOGRAFIA	65
-	SITOGRAFIA.....	65
-	RINGRAZIAMENTI	67

INTRODUZIONE

La tutela ambientale e la preservazione del territorio sono temi di crescente importanza, oggetto di un ampio dibattito negli ultimi anni, che evidenziano la necessità di una gestione più consapevole delle risorse naturali.

La presente tesi si propone di esaminare questioni di natura tecnico-scientifica connesse alle attività di rilevamento finalizzate alla tutela e gestione di un'area particolarmente vulnerabile del nostro Paese: la zona del Delta del Po.

Verrà illustrata la Rete Altimetrica Nazionale, ponendo particolare attenzione al ruolo e alla rilevanza dell'Istituto Geografico Militare (IGM) e alle Specifiche Tecniche da esso emanate per la realizzazione e integrazione della rete nazionale.

Si procederà con la definizione degli obiettivi delle campagne di misura e delle ragioni che hanno determinato la realizzazione dei rilevamenti per la definizione della rete altimetrica nell'area oggetto di studio. Verranno descritti gli strumenti impiegati in queste delicate operazioni di misura, nonché le procedure e le strategie di elaborazione dei dati acquisiti. Infine, verrà fornita una spiegazione dettagliata della livellazione geometrica di alta precisione, con particolare riguardo alle fasi operative e le attività eseguite per lo scopo.

L'Università degli Studi di Padova, attraverso il Laboratorio di Rilevamento e Geomatica, ha fornito un contributo significativo e risorse essenziali per questo progetto di riqualificazione di alcune linee della Rete di Livellazione Italiana interessando gran parte dell'estensione dell'area deltizia del fiume Po. Grazie all'impiego di strumentazioni ad alta precisione messe a disposizione dall'Università, è stato possibile rispettare pienamente le disposizioni tecniche richieste per l'esecuzione di queste operazioni di precisione.

Il Delta del Po è un sito di notevoli dimensioni che si estende per circa 25 km e occupa una superficie di circa 400 km². In questo complesso sistema deltizio, il corso principale del fiume si divide in cinque rami principali: Po di Maistra, Po di Pila, Po di Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro, che danno origine a sette lagune o sacche, rispettivamente Caleri, Marinetta, Basso, Barbamarco, Canarin, Scardovari e Goro (*fig. 0*).

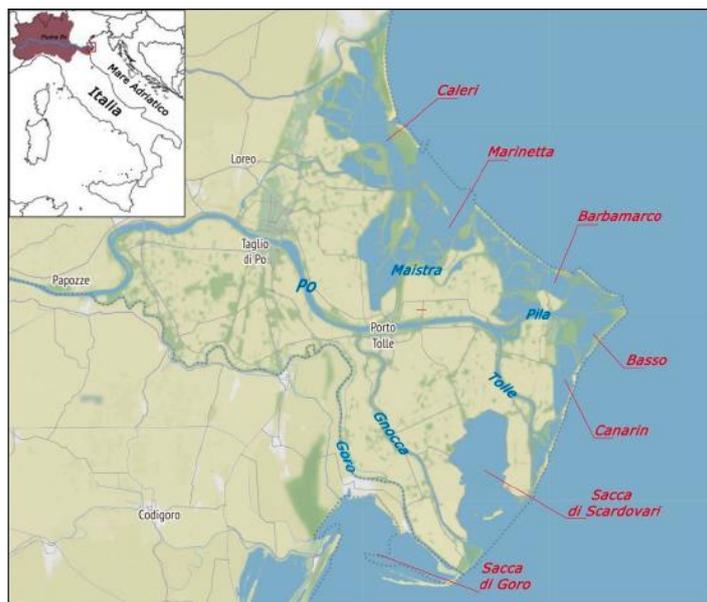


fig. 0 - Ingrandimento delle 7 lagune presenti nel Delta del Po

Le principali operazioni connesse a questa attività sono state: la progettazione, la ricognizione e la materializzazione delle linee di livellazione nell'area deltizia; successivamente, l'esecuzione delle osservazioni, i controlli durante l'opera e le verifiche finali di collaudo; infine, l'elaborazione dei dati raccolti, seguita dalle verifiche finali e dalla restituzione dei risultati ottenuti.

Questo progetto ha permesso la riqualificazione della Rete Altimetrica Nazionale nell'area del delta Po. In particolare, sono state recuperate e aggiornate le linee di livellazione esistenti e si è proceduto alla creazione di nuove linee integrative, al fine di garantire una maggiore copertura del territorio.

1.0 RETE ALTIMETRICA FONDAMENTALE ITALIANA

1.1 GENERALITA' E DEFINIZIONI

L'Istituto Geografico Militare (IGM) ha competenze che spaziano su vari campi, quali ad esempio: la geodesia, con il mantenimento e l'aggiornamento delle reti geodetiche nazionali, il controllo dei confini di Stato, effettuazione di misure di alta precisione per il controllo di stabilità di edifici storici di particolare importanza e per il monitoraggio di movimenti crostali o superficiali in situazioni rilevanti a livello nazionale o di rischio ambientale; ma si occupa anche di cartografia, database geografici, fotogrammetria e telerilevamento; organizza corsi di formazione nel campo delle discipline cartografiche e topografiche; inoltre tratta anche l'archiviazione e catalogazione di documenti e materiale storici, del loro mantenimento e risanamento qualora soggetti a usura.



fig. 1.1 - Rete di Livellazione di alta precisione

La rete altimetrica fondamentale italiana è composta da una serie di riferimenti, denominati *caposaldi*, che sono disposti nel territorio in modo stabile e tra i quali vengono misurati con alta precisione i dislivelli, cioè le differenze di quota ortometrica. Queste misure vengono condotte attraverso la procedura geomatica più precisa attualmente per la determinazione del dislivello che viene denominata come Livellazione Geometrica dal Mezzo. La successione dei caposaldi collegati tra loro attraverso tali misure di dislivello prende il nome di *linea di livellazione*. I caposaldi sono

disposti solitamente su manufatti che garantiscono stabilità e durabilità e si susseguono ad una distanza di circa 1 km l'uno dall'altro.

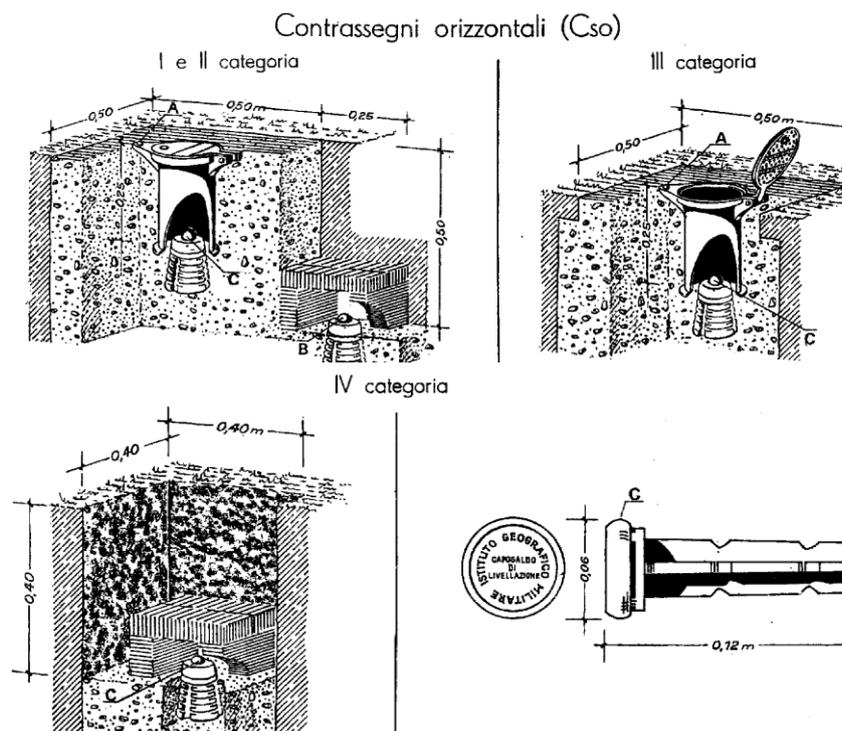
L'IGM ha emanato delle "Specifiche tecniche" per la progettazione, ricognizione, segnalizzazione e misura di linee di livellazione di alta precisione appartenenti alla Rete Altimetrica Fondamentale Italiana.

Ogni caposaldo è costituito da un contrassegno solido sul terreno, posato su una fondazione propria o fissato su un manufatto preesistente dopo averne verificato la stabilità e durabilità nel tempo (come edifici, ponti o muri di sostegno).

Un caposaldo può essere formato da più contrassegni: il *contrassegno orizzontale principale* (CSO), eventuali *contrassegni orizzontali secondari* (CSO', CSO'', ecc.) ed anche uno o più *contrassegni verticali* (CSV, CSV', ecc.). Essi essendo appartenenti tutti al medesimo caposaldo, sono posti a breve distanza tra di loro, fissati sullo stesso manufatto o su manufatti differenti ma che si trovino nelle immediate vicinanze.

Distinguiamo i caposaldi in 4 diverse categorie:

- I categoria: *nodali*, corrispondenti ai vertici dei poligoni della rete;
- II categoria: *fondamentali*, posti ogni 25 km circa di linea;
- III categoria: *principali*, posti ogni 5 km circa di linea, sono realizzati allo scopo di costituire un riferimento altimetrico più duraturo nel tempo;
- IV categoria: *di linea*, distanti 1 km circa l'uno dall'altro, sono costituiti dal solo contrassegno orizzontale;



Contrassegno verticale (C_{sv})

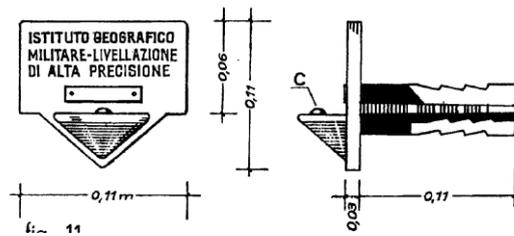


fig. 1.2 – Rappresentazione grafica delle tipologie di contrassegni di livellazione

I contrassegni orizzontali sono definiti tali quando sia possibile misurarli per mezzo di una stadia semplicemente appoggiandola su di essi. Sono posti infatti a breve distanza dal suolo, o sul suolo stesso.

Nella prima fase di istituzione delle linee di alta precisione erano costituiti da un elemento tronco-conico di porcellana (*fig. 1.3*) o da un chiodo di metallo (*fig. 1.4*), interrati a 20/40 cm di profondità e protetti da un pozzetto in ghisa o cemento.

Il punto a cui è riferita la quota non è altro che quello individuato dal piano orizzontale tangente alla sommità della sporgenza emisferica del segnale in porcellana o in metallo. Tale punto è indicato con la lettera *C* (*fig. 1.2*).

In caso di protezione con pozzetto in ghisa (I, II e III cat.) era presente un ulteriore contrassegno orizzontale, in aggiunta al segnale di porcellana interrato, costituito da una sporgenza emisferica presente nella parte superiore del pozzetto che alloggia il coperchio. La quota è riferita al piano orizzontale tangente a tale sporgenza, indicato con la lettera “A” (*fig. 1.2*).

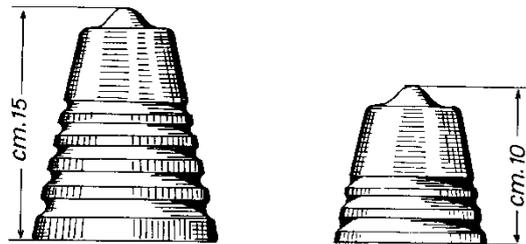


fig. 1.3 – Rappresentazione grafica del contrassegno orizzontale tronco-conico in porcellana

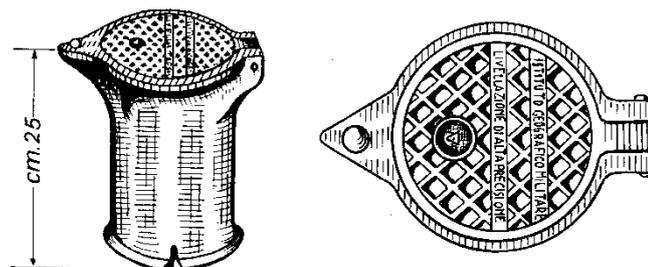


fig. 1.4 – Rappresentazione grafica del contrassegno orizzontale in metallo

Attualmente, invece, i contrassegni orizzontali sono materializzati su pareti verticali inserendo un bullone di ghisa infisso orizzontalmente a 50 cm dal suolo, con la testa sporgente in modo tale da potervi appoggiare la stadia durante le misure; la quota è riferita al piano orizzontale tangente alla sommità della testa torica del bullone.

Ove non siano disponibili strutture verticali, si procede ad inserire centrini in acciaio inox, terminanti con una parte emisferica, posti su strutture orizzontali quali ad esempio: ponti, chiaviche, chiuse, ecc. Il riferimento è costituito dal piano orizzontale tangente alla sommità della testa del chiodo o del centrino.

Per quanto concerne invece i contrassegni verticali, vengono definiti tali quando non possono essere misurati appoggiandovi direttamente la stadia sopra, essendo posizionati ad un'altezza di qualche metro su pareti verticali. Si utilizzano quindi nastri o stadiette, appesi direttamente o per mezzo di apposite staffe. Essendo posti in alto, sono molto più protetti rispetto ai contrassegni orizzontali.

Attualmente si utilizzano piastrine dalle quali fuoriesce un cilindretto orizzontale al cui asse è riferita la quota.

1.2 PROGETTAZIONE E RICOGNIZIONE

Le linee di livellazione devono necessariamente seguire la viabilità esistente, ovvero lungo le strade adeguatamente pavimentate dove vengono evitati gli affondamenti della stadia e dello strumento durante le operazioni di misura. Tali operazioni, condotte secondo la metodologia della livellazione geometrica dal mezzo, sono davvero di breve durata ma risentono anche di piccolissimi assestamenti in quanto devono stimare lunghezze di entità dell'ordine del centesimo di millimetro.

Nel progettare una nuova livellazione è indispensabile quindi la conoscenza dello sviluppo della rete altimetrica di alta precisione dell'IGM, ed è opportuno considerare la presenza di eventuali caposaldi appartenenti ad altri Enti.

Individuato il percorso più idoneo, si dovrà identificare, attraverso una attenta ricognizione, l'esatta ubicazione dei caposaldi esistenti e la posizione migliore per quelli di nuova istituzione. Essi saranno posti su manufatti già presenti in loco ed aventi dimensioni, consistenza e destinazione d'uso tali da garantire una adeguata stabilità nel tempo.

Lungo una linea, i caposaldi dovranno essere posti ad una distanza di $1 \text{ km} \pm 200\text{m}$.

Mediamente un caposaldo ogni 8 km dovrà essere adatto all'esecuzione di una stazione GPS, ma se non sarà idoneo a tale scopo si procederà ad istituire un apposito CSO' in una posizione tale da essere esente da possibili ostacoli che possano impedire la ricezione dei segnali satellitari e in assenza di disturbi elettromagnetici.

1.3 SEGNALIZZAZIONE

Questa operazione comprende al suo interno tutte le lavorazioni necessarie al riattamento dei caposaldi esistenti ritrovati e l'eventuale materializzazione di nuovi caposaldi.

I nuovi caposaldi saranno materializzati con i seguenti contrassegni:

- Contrassegni orizzontali, come bulloni oppure centrini universali;
- Contrassegni verticali, aventi piastrine con cilindretto;
- CSO destinati a stazionamenti GNSS, ovvero centrini universali.

Per quanto concerne il riattamento invece, i chiusini dei caposaldi di I, II e III categoria presentano quasi sempre difficoltà all'apertura a causa dell'ossidazione delle cerniere. Solo in queste circostanze è consentito all'operatore di rompere il chiusino e richiederne uno nuovo privo di cerniere all'IGM. Successivamente alla rottura viene pulita l'area da eventuali detriti e si pone attenzione a non usurare il contrassegno.

Nel caso in cui i chiusini siano di difficile ritrovamento perché coperti si procederà alla loro ricerca tramite scavo. Il chiusino, poi, sarà reso visibile tramite un pozzetto in ghisa o cemento che verrà murato sul chiusino ed avrà dimensioni tali da rendere possibile anche la misura del contrassegno A.

Per i chiusini dei caposaldi di IV categoria (interrati), il loro ritrovamento viene eseguito sulla base delle informazioni contenute nelle monografie e quelle raccolte in loco dal proprietario del manufatto sul quale il caposaldo ha luogo. Verranno eseguiti quindi una serie di scavi di profondità di almeno 50 cm, ponendo attenzione a non danneggiare il contrassegno.

In caso di ritrovamento, il contrassegno non verrà nuovamente interrato, ma reso utilizzabile tramite un tubo in pvc (con diametro di 160 mm) che viene fissato verticalmente sopra il contrassegno di una lunghezza tale da raggiungere il piano di calpestio. All'interno del tubo stesso verrà inserita la stadia all'esecuzione delle misure, il tubo poi verrà chiuso con un apposito tappo in ghisa fornito dall'IGM.

1.4 MISURE

Nella procedura di livellazione geometrica dal mezzo, si definisce *campata* l'operazione di misura eseguita da una stazione, dove viene posto il livello, verso due stadie posizionate sui due caposaldi, tra i quali viene determinato il dislivello tramite la semplice differenza tra le due letture alle stadie.

Per ragioni di portata strumentale, la lunghezza della campata non può superare gli 80/90 metri. La misura del dislivello esistente fra due caposaldi della linea, detta *tratta* (distanza media di 1 km), sarà ottenuta, secondo il metodo della *livellazione frazionata*, dalla somma dei dislivelli relativi a ciascuna campata.

Sempre con la livellazione geometrica dal mezzo viene determinato il dislivello tra il contrassegno principale e quelli secondari di un caposaldo.

In ogni stazione il livello si deve trovare ad uguale distanza tra le due stadie con eccentricità non superiore ad 1 m; alla fine della tratta la somma delle eccentricità non dovrà eccedere il limite di 5 metri.

Si assume come misura di ogni singola tratta il dislivello derivante dalle operazioni di livellazione frazionata, cioè la somma dei dislivelli di tutte le campate comprese in quella tratta. Ogni dislivello

così determinato dovrà essere corretto del *metro medio* e dei valori di *tallone* per l'appoggio sui caposaldi, ottenuti dalla campionatura delle stadia.

Il valore del metro medio di una stadia è il valore corrispondente alla media delle lunghezze che intercorrono tra tacche nominalmente distanti 1 m. Il valore assunto per la correzione del dislivello sarà la media dei due metri medi delle stadia utilizzate che presentano metri medi simili.

Il dislivello di ogni tratta verrà corretto moltiplicando il dislivello stesso per il metro medio.

Il *tallone* è l'estremità della stadia che poggia sui caposaldi durante le misure ed è una superficie piana di acciaio rettificata. Essa dovrebbe coincidere con lo zero della graduazione del nastro, ma in realtà non è proprio così. Sussiste infatti un piccolo errore residuo, detto errore del tallone (nelle stadia di buona qualità utilizzate per la livellazione di alta precisione, non supera qualche decimo di millimetro). Ponendo la stadia in posizione operativa con il tallone rivolto verso il basso, l'errore è positivo se il tallone resta sotto allo zero della graduazione, negativo invece nel caso contrario. Nella prassi operativa, poiché la stadia avanti di una campata diventa, nella campata successiva, quella indietro, la correzione ha nei due casi uguale entità e segno opposto e quindi si elide automaticamente. Utilizzando la stessa stadia per le letture di inizio e fine tratta sui caposaldi non risulta necessaria nessuna correzione di tallone (ad esempio quando si eseguono un numero pari di campate), che deve invece essere fatta qualora si usassero stadia diverse.

È bene che l'esecuzione delle misure venga effettuata solo con buona visibilità: non si opera infatti in presenza di foschia, forte pioggia, nelle ore più calde dei giorni d'estate e qualora vi siano visuali radenti al terreno che possono causare errori nelle letture (si dovranno sempre effettuare letture al di sopra di 0,40 m dal suolo).

Durante le misure le stadia vengono sempre appoggiate su apposite *piastre* metalliche terminanti con una superficie sferica. Il treppiede e le piastre, invece, vengono poste su strada o terreni stabili e non sull'erba o terra bagnata. L'operatore che si occupa di portare la stadia deve avere cura che la piastra, prima dell'appoggio della stadia, sia ben stabilizzata nel terreno premendola con i piedi senza sporcarla. Durante la lettura, la stadia deve essere posta in posizione verticale centrando la relativa livella sferica e mantenuta stabile con l'ausilio dei puntali reggi stadia. Al fine di consentire al porta-stadia di mantenere la stadia in bolla solo per il tempo necessario alla lettura, l'operatore agente allo strumento lo avverte con un cenno dell'inizio dell'operazione di misura. La stadia indietro non dovrà essere mossa fino a quando non è terminata con successo la misura sulla stadia avanti.

1.5 TOLLERANZE

Il dislivello di ogni tratta dovrà essere misurato due volte (*andata e ritorno*) in modo totalmente indipendente. La discordanza tra il dislivello in andata e quello in ritorno di ogni singola tratta non deve superare la seguente tolleranza:

$$T = \pm 2,5\sqrt{L} \text{ mm (con L espressa in km)}$$

Quando questa tolleranza risulta rispettata si assumerà come dislivello di ogni tratta la media fra i valori di andata e ritorno.

Nel caso in cui la discordanza risulti superiore alla tolleranza, si dovrà ripetere la misura della tratta tante volte quante sono necessarie ad ottenere una coppia di misure che rientrino in tolleranza. Nel caso in cui questo non sia possibile, può essere che la causa risalga al malfunzionamento della strumentazione utilizzata o un errore durante la fase operativa e si procederà quindi ad avvisare il responsabile attenendosi alle sue disposizioni.

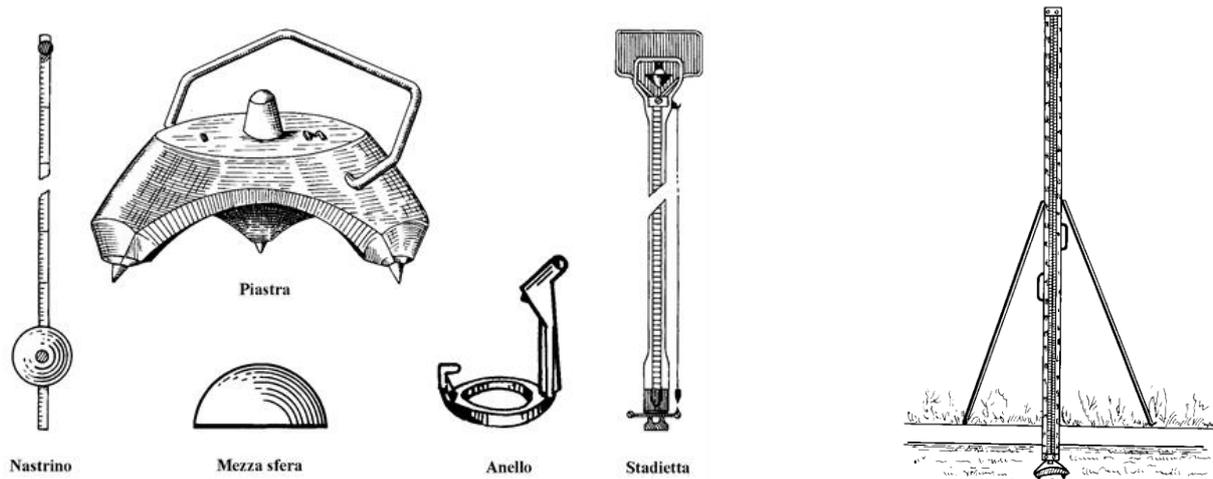


fig. 1.5 – Rappresentazione grafica degli strumenti necessari ad una livellazione ad alta precisione

Nel caso in cui ci si debba collegare a linee di livellazione esistenti si verifica la stabilità del caposaldo, come visto in precedenza. Si misura il dislivello fra il caposaldo in questione e quello precedente e seguente e si confrontano i valori ottenuti con quelli di catalogo.

Un caposaldo invariato sarà definito tale qualora gli scarti fra i nuovi e i vecchi dislivelli risulteranno inferiori a:

$$T = \pm 4\sqrt{L} \text{ mm}$$

Se questa tolleranza non sarà rispettata si procederà nella rimisura della linea di riattacco, in entrambi i versi, fino a quando non si verifica e non sarà soggetto quindi a movimenti locali.

La tolleranza, inoltre, per quanto concerne i poligoni chiusi di lunghezza L, non deve superare il seguente valore soglia:

$$T = \pm 2\sqrt{L} \text{ mm}$$

2.0 STRUMENTAZIONE

2.1 GENERALITÀ

Il livello preso unicamente non è uno strumento di misura; infatti non è altro che un elemento di confronto col quale si ottiene la misura del dislivello soltanto con l'ausilio di stadie sulle quali si effettuano le letture. Di conseguenza livello e stadie non possono essere considerati elementi disgiunti, ma costituiscono un'unica strumentazione.

Intorno alla metà del 1600 si ebbe un'importante evoluzione nello schema costruttivo dei livelli, anche se i primi esemplari più utilizzati comparvero solo alla fine del 700'. In particolare, si ricorda del dispositivo ideato dal francese *Chezy* al quale si deve il primo livello dotato di livella torica, a cui fece seguito intorno al 1800 il livello a cannocchiale con livella rigidamente fissata.

Risulta costituito dai seguenti componenti:

- Una traversa che ruota attorno all'asse a-a imperniata sulla base di B, dotata di viti calanti che permettono di disporre tale asse lungo la verticale;
- Un cannocchiale, solidale con la traversa, dotato di livella torica rigidamente connessa, al cui centramento si provvede con la vite di elevazione E.

Sempre nell'800 vennero prodotti svariati strumenti: *Wild*, ad esempio, ideò un tipo di livello a cui si ispirò la costruzione della gran parte dei suoi successori sino alla fine degli anni Settanta del secolo scorso, avente un cannocchiale fisso alla traversa (non mobile come in quelli precedenti) e con livella torica fissata al cannocchiale. Esso venne chiamato generalmente "tipo inglese".

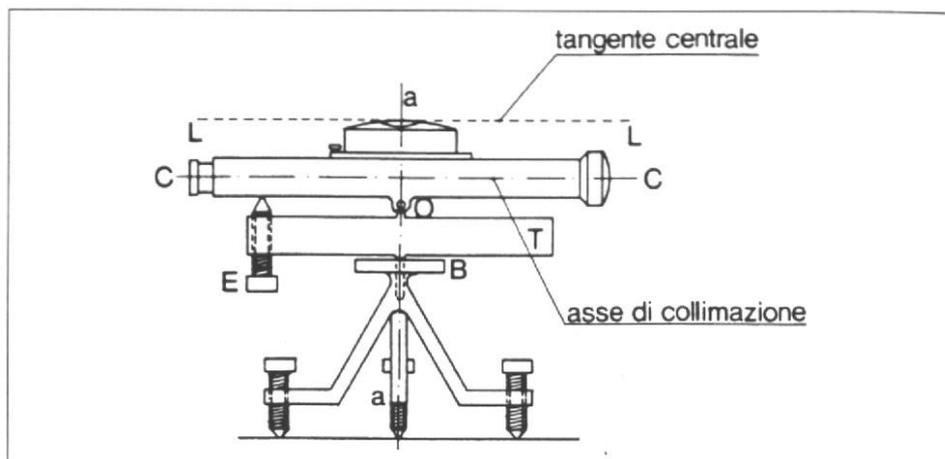


fig. 2.1 - Struttura del livello a livella fissa al cannocchiale ("Tipo inglese").

A partire dagli anni 50' vennero introdotti anche gli "autolivelli", che affiancarono i livelli fino ad allora costruiti ad orizzontamento dell'asse di collimazione del cannocchiale e dotati di meccanismo ottico-meccanico che permette di avere un orizzontamento automatico, con evidenti vantaggi operativi a parità di precisione.

Negli ultimi anni invece sono comparsi i livelli “*digitali*”: strumenti elettronici abbinati a stadie codificate. Cosicché si introdusse la distinzione tra livelli moderni di tipo convenzionale e i livelli digitali.

In rapporto alla loro destinazione e alle incertezze che si ottengono nelle misure dei dislivelli, si classificano i livelli in:

- livelli da cantiere, con s.q.m. di $\pm 5/10$ mm/km;
- livelli da ingegneria, con s.q.m. di $\pm 2/3$ mm/km;
- livelli di precisione, con s.q.m. di ± 0.5 mm/km;
- livelli di alta precisione, con s.q.m. di ± 0.2 mm/km.

2.2 LIVELLI DIGITALI

La strada intrapresa per la digitalizzazione delle misure dei dislivelli è stata alquanto lunga.

Nel 1966 si tenta per la prima volta a raggiungere la digitalizzazione, motivo per cui *Zetsche* descrisse un livello digitale (*fig. 2.2*), ma mancavano ancora i componenti elettronici e i sensori necessari alla realizzazione. Per i quindici anni successivi, ricercatori e costruttori tentarono numerose vie, ma senza successo. Il primo tentativo andato a buon fine fu quello di *Zeiss*, con l'aiuto della Università di Dresda, durato dal 1982 al 1988, che portò a provvedere il livello *Ni 002* con un sensore CCD da 1024 pixel: vi era possibile la lettura tutta automatica delle parti fini, mentre quelle grosse dovevano pur sempre essere conteggiate per via ottica dall'operatore. Era però permessa anche la registrazione con la successiva elaborazione informatica dei dati.

Fu solo la tecnica dei sensori CCD e l'avvento delle stadie codificate che condussero a una soluzione pratica del problema: il primo successo commerciale fu quello del livello *NA 2000* di *Wild-Leica* nel 1990.

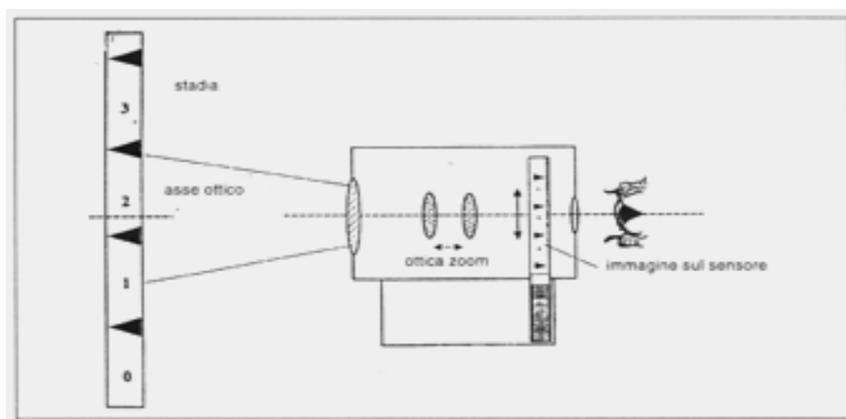


fig. 2.2 - Schema semplificato del livello di Zetsche.

Per le caratteristiche ottico-meccaniche si veda la *fig. 2.3*, in cui si nota anche la posizione del sensore; per lo schema elettronico si osservi il grafico a blocchi in *fig. 2.4*. L'operazione di misura in automatico prevede in primo luogo la collimazione della stadia e la sua messa a fuoco.

L'immagine del codice a barre della stadia passa attraverso un separatore di raggio che invia la luce visibile all'oculare dello strumento e la componente nell'infrarosso a un diodo rivelatore. Il rivelatore trasforma l'immagine del codice così ricevuta in un segnale video che opportunamente amplificato e digitalizzato è inviato ad un microprocessore. Una volta premuto il tasto "misura", il livello, attraverso il microprocessore, effettua una stima approssimativa della distanza della stadia risalendovi dalla posizione della lente di messa a fuoco. Tramutato il segnale binario proveniente dalla stadia in segnale analogico, amplificato dal circuito apposito indicato nello schema, lo manda al circuito A/D. Qui risiede un segnale da 8 bit (256 pixel); il tratto di stadia interessato forma così la sua immagine sul sensore, con scala variabile in funzione della distanza e secondo la relazione:

$$d = \frac{k}{s}$$

dove k = costante dello strumento;
 s = posizione della lente di focamento.

Dopo di che la distanza viene calcolata dal microprocessore e memorizzata. L'interpolazione del segnale, dopo la sua sovrapposizione a quello residente, avviene non prima della sua riduzione alla scala costante di quest'ultimo, secondo lo schema di *fig. 2.5* e *fig. 2.6*. Le variabili che influenzano il problema sono rappresentate dalla distanza strumento – stadia, leggibile come una variazione di scala verticale dello stesso codice.

Dal punto di vista matematico, la relazione è la seguente:

$$p_i(d, h) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(d, y - h) D_i(y) dy$$

di cui:

- $p_i(d, h)$ = valore di riferimento del pixel i-esimo;
- $D_i(y)$ = funzione della sensibilità del pixel i-esimo;
- $c(d, y - h)$ = funzione del codice;
- h = quota dell'asse di collimazione (rispetto allo zero di stadia);
- y = posizione relativa del codice rispetto al sensore;
- d = distanza fra stadia e sensore.

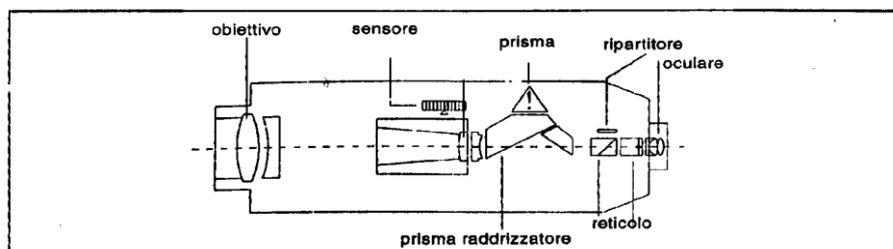


fig. 2.3 - Schema del livello digitale NA2000 Leica.

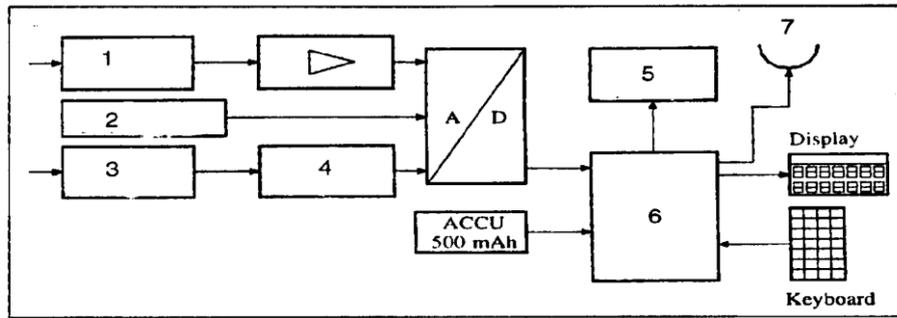


fig. 2.4 - Diagramma a blocchi del livello NA2000; parte elettronica; 1) distanza funzione del focamento, 2) controllo, 3) sensore, 4) elettronica di lettura, 5) memoria interna, 6) processore, 7) uscita dati e alimentazione.

Confrontato il segnale residente con l'immagine del tratto di stadia ridotto alla stessa sua scala, si ricava la posizione h dell'asse di collimazione; di fatto, si calcola di quanto il segnale corrispondente all'immagine di stadia vada traslato dall'origine (lo zero della stadia) per farlo coincidere col campione di riferimento residente: la traslazione corrispondente ad h .

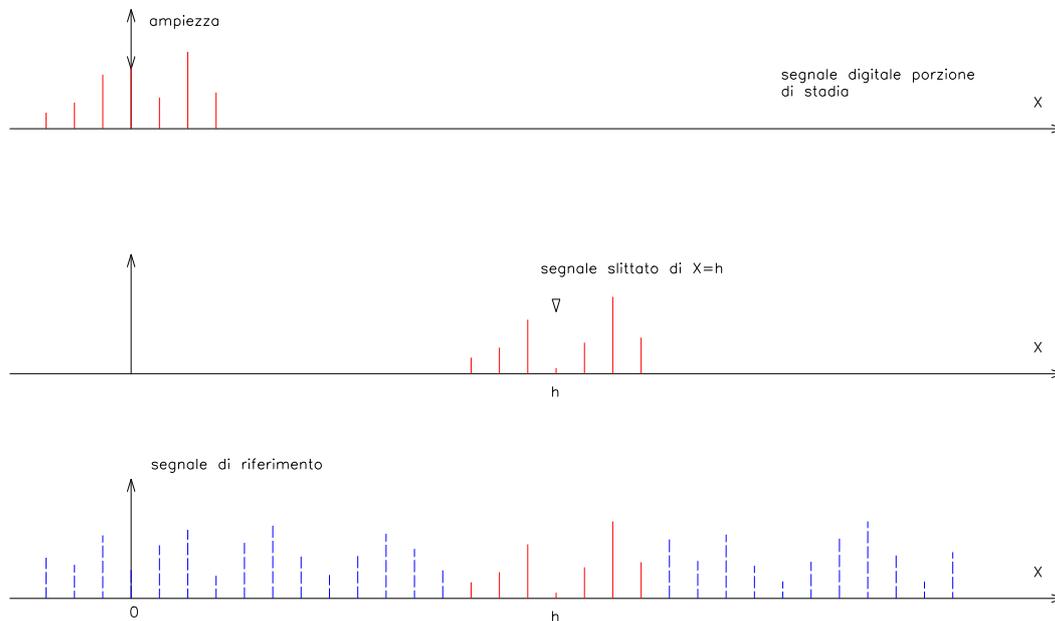


fig. 2.5 - Valutazione del segnale nello NA2000.

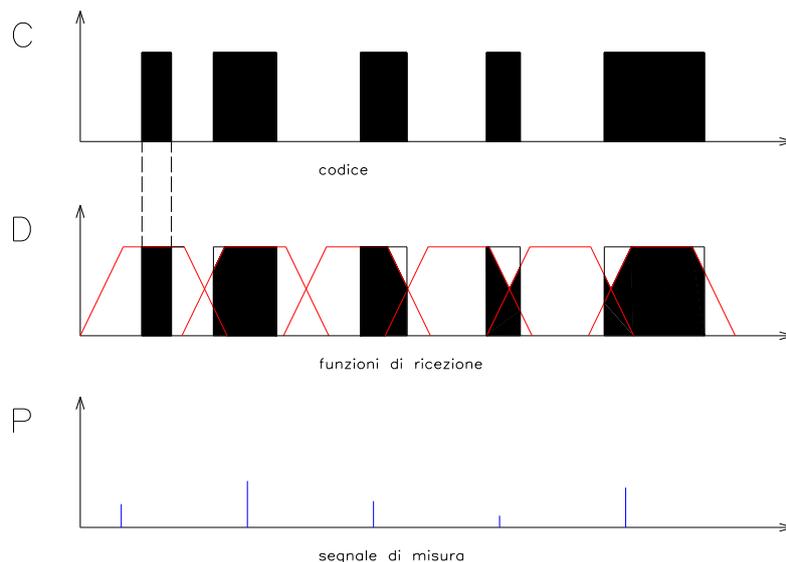


fig. 2.6 - Elaborazione del segnale nello NA2000.

Il confronto avviene per correlazione, e occorre qui ottimizzare i due parametri, scala e altezza; ecco che la messa in scala (almeno approssimativa tramite il calcolo della distanza d) è indispensabile per l'applicazione della procedura. Si tratta di ricercare il massimo di correlazione tra il segnale di misura e quello di riferimento; in corrispondenza a questo picco si determinano le letture d'altezza e di distanza ottimale.

Il microprocessore calcola la funzione di correlazione bidimensionale secondo la formula seguente:

$$P_{PQ}(d, h) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N Q_i(y) P_i(d, y - h)$$

Con:

$Q(y)$ = segnale di misura;

$P(d, y-h)$ = segnale di riferimento;

La *fig. 2.7* mostra il tipico picco della funzione di correlazione bidimensionale; le coordinate del picco forniscono rispettivamente la distanza d e la lettura h alla stadia.

Il *tempo d'integrazione* corrisponde al tempo d'esposizione in fotografia. Nella modalità automatica, il tempo di misura (escluso il tempo di calcolo) varia da quattro millisecondi a due secondi, a seconda della luce prevalente. In condizioni di misura difficili, quando l'immagine della stadia oscilla leggermente in conseguenza di riverbero o vibrazione, tempi di integrazione molto brevi sono uno svantaggio, perché la misura è un evento momentaneo e perciò non rappresenta il valore medio. La possibilità di cambiare i tempi d'integrazione ci sono forniti con la nuova versione *NA3003*. È perciò utile eseguire la misura in tempi più lunghi, e questo si ottiene con un tempo d'integrazione che può essere fissato tra 3/9 secondi.

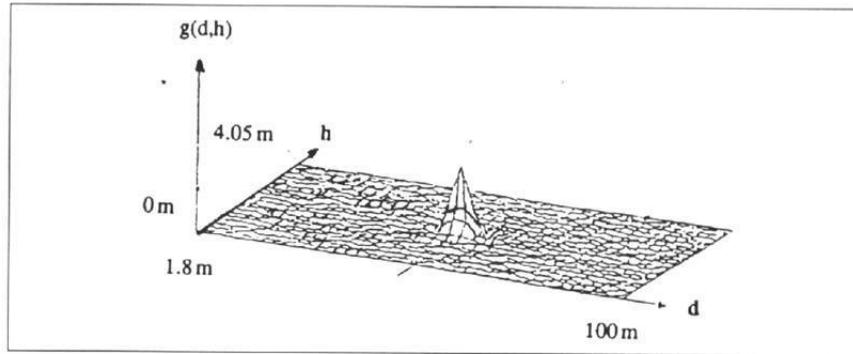


fig. 2.7 - Funzione di correlazione per distanza e dislivello.

Per gestire i dati il modo più facile è quello di memorizzarli in un modulo di registrazione il *GRM10*. Dopo, i dati possono essere estratti con un lettore *GIF12* o direttamente attraverso l'interfaccia dello strumento (procedura di scarico dati). Invece, se è disponibile un cavo di collegamento, è possibile collegare un computer da campagna e memorizzare i dati su di esso. Inoltre, in modalità on-line, si può configurare lo strumento ed avviare le misure, comandando a distanza.

2.3 ACCESSORI

Le stadiie a lettura ottica di precisione sono costituite da un nastro di *invar* di 3m che è messo in una scanalatura sistemata in una trave incavata di legno trattato. Tale cornice in legno è meno soggetta alla variazione di lunghezza di una cornice in alluminio. La trave termina con un piede di metallo in acciaio rettificato al quale è fissata all'estremità inferiore del nastro di *invar* da una vite eccentrica. L'estremità superiore del nastro è legata alla trave da una molla che assicura una tensione costante, compensando le piccole variazioni di lunghezza del quadro. Il coefficiente di dilatazione dell'acciaio *invar* è trascurabile. Tale valore si ottiene, per controllo di lettura, sottraendo la lettura di sinistra a quella di destra. La stadia è munita di una livella sferica che ne permette il posizionamento sulla verticale.

Le stadiie di precisione a lettura codificata, da utilizzare con i livelli digitali, sono costruite con le medesime caratteristiche e quindi con lamina di acciaio *invar*, dove viene impresso il codice a barre, montate su carter in lega metallica e della lunghezza di 2 o 3 m.

3.0 LA RETE ALTIMETRICA NELL'AREA DEL DELTA DEL PO

3.1 PROGETTO, RICOGNIZIONE E MATERIALIZZAZIONE

Il **progetto** della rete altimetrica nell'area oggetto di studio è iniziato con una serie di sopralluoghi e di analisi delle monografie e della documentazione esistente.

In questa fase le operazioni sono state condotte attraverso la collaborazione tra il Laboratorio di Rilevamento e Geomatica dell'Università degli Studi di Padova, il Genio Civile di Rovigo e l'Istituto Geografico Militare.

Le linee di livellazione già presenti sono state ridefinite, ampliate ed integrate con nuove linee per avere una maggiore copertura del territorio.

Per dare una corretta conformazione alla rete si è cercato di chiudere le linee in modo da formare dei poligoni chiusi (anelli) che permettono di eseguire ulteriori controlli oltre alla compensazione delle osservazioni.

Di seguito vengono riportati gli schemi delle linee esistenti e progettate:

- 174
- 174_D01
- 174_D02
- 174_D03
- 174_D04
- 174_D05
- 174_D06
- 174_D07
- 174_D08
- 174_D09
- 174_D10
- 174_D11

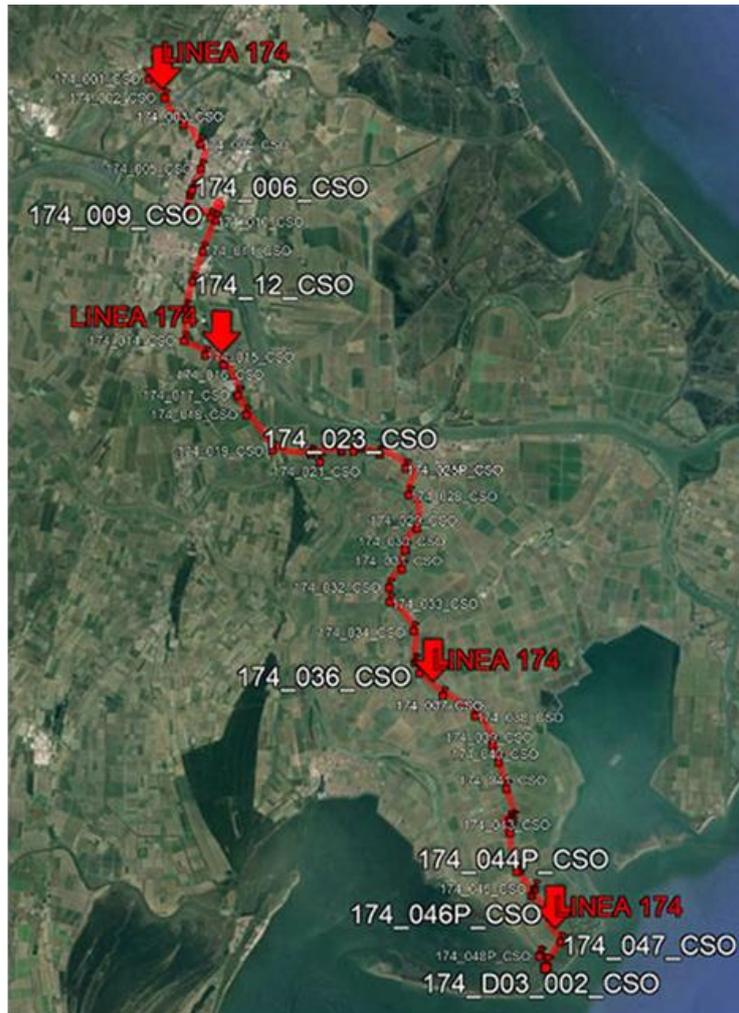


fig. 3.1 – Linea 174 che da Loreo arriva alla foce del Po di Goro: è la linea principale esistente. Lo schema riporta a sud anche due caposaldi della deviazione 174_D03.



fig. 3.2 – Linea 174_D1 che dal cimitero di Porto Viro conduce a Porto Levante: è una deviazione esistente.

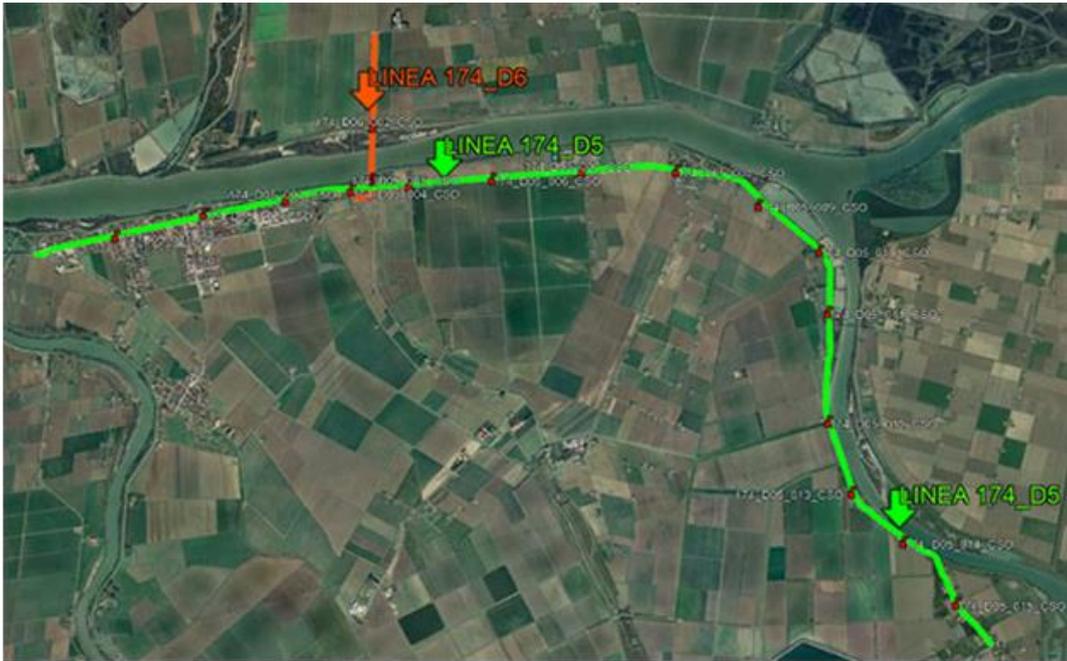


fig. 3.5 – Linea 174_D05 che collega la 174 con la D04 e la linea 174_D06 che collega la D05 con la D02: sono due deviazioni di nuova istituzione.



fig. 3.6 – Linea 174_D7 che collega la D01 a Porto Levante con la D02 a Cà Zuliani: è una nuova deviazione.



fig. 3.7 – Linea 174_D11 che completa la parte sud della 174 passando per Gorino Veneto lungo il Po di Goro: è una nuova deviazione.

Una volta completato il progetto si è passati alla **ricognizione** che ha permesso di valutare la presenza e lo stato di conservazione dei contrassegni dei caposaldi esistenti e l'individuazione dei siti idonei alla materializzazione di quelli di nuova istituzione.

Questa operazione ha portato alla creazione di opportuni report (schemi e immagini) che sono stati utilizzati sia per la materializzazione che per le operazioni di misura.

Di seguito vengono riportati alcuni estratti di questi libretti.

Linea 174:





Linea 174_D04:

174_D04_016#

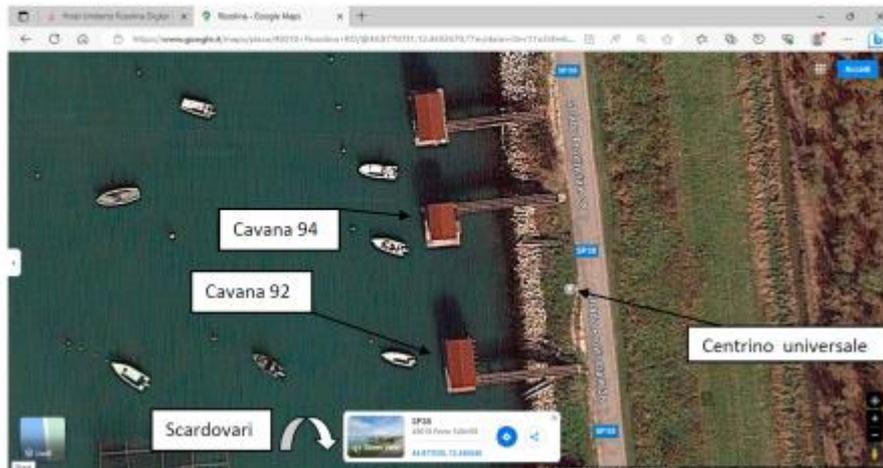
Il centrino posto sul plinto di sostegno del Mareografo è stato danneggiato e pertanto è da considerarsi abolito.





174_D04_023#

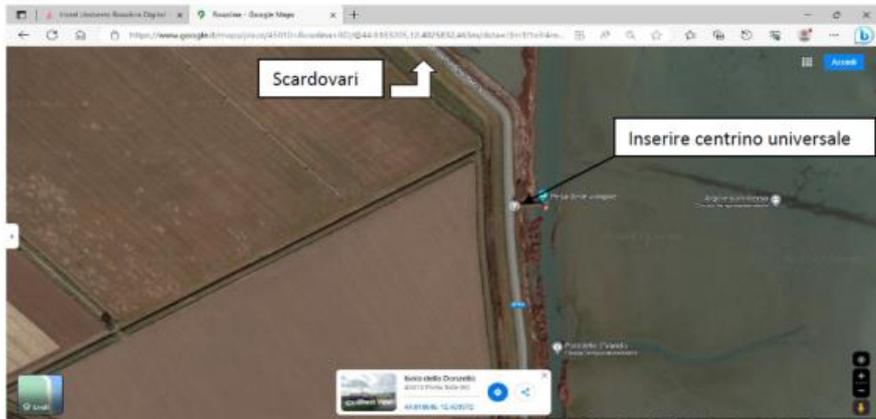
Centrino universale esistente su pilastro in c.a. posto lungo SP38 tra le cavane 92 e 94.



Linea 174_D07.

174_D07_004

Inserire centrino universale sulla sommità del margine della piattaforma in c.a. di accesso al pontile, come indicato.



La **materializzazione**, detta anche *segnalizzazione*, dei caposaldi è stata eseguita rispettando le indicazioni riportate sui report di ricognizione, visti in precedenza.

Nei siti dove in fase di ricognizione non è stato possibile trovare manufatto idoneo alla materializzazione del caposaldo è stato eseguito un manufatto ad hoc secondo il progetto riportato nella *fig. 3.8*.

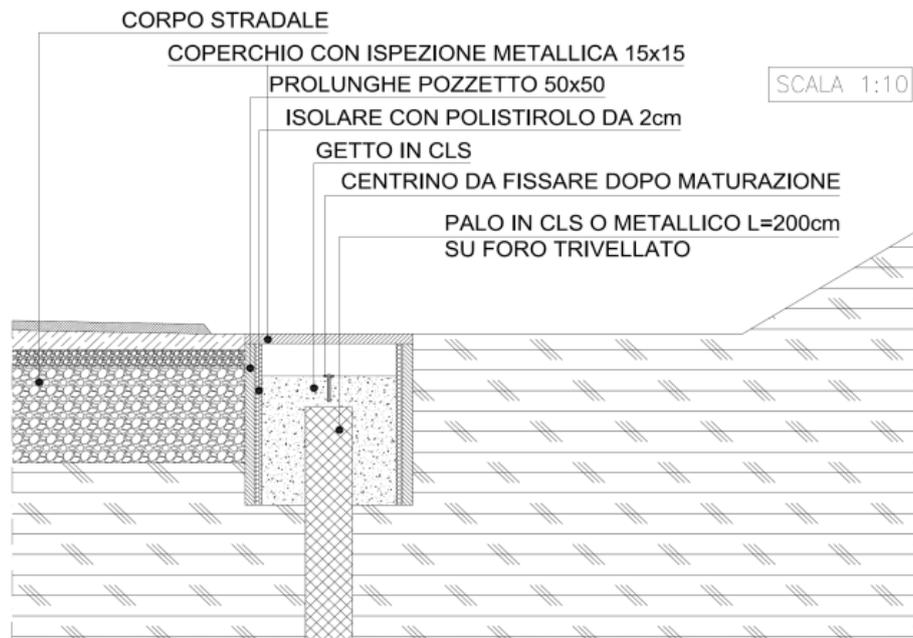


fig. 3.8 – Progetto di un manufatto a pozzetto idoneo per contenere un caposaldo di livellazione.

Le fasi di ricognizione e successiva materializzazione sono punti focali che hanno condotto al progetto finale della rete altimetrica nell'area del Delta del Po che, rispetto al progetto preliminare, ha previsto delle semplificazioni riducendo il numero delle deviazioni inizialmente previste.

Nelle figure seguenti vengono riportati degli estratti dei tracciati definitivi materializzati.



fig. 3.9 – Linea 174 con la deviazione 174_D03 (costituita dal solo caposaldo 174_D03_002)



fig. 3.10 – Linea 174_D01



fig. 3.11 – Linea 174_D02+D06



fig. 3.12 – Linea 174_D05

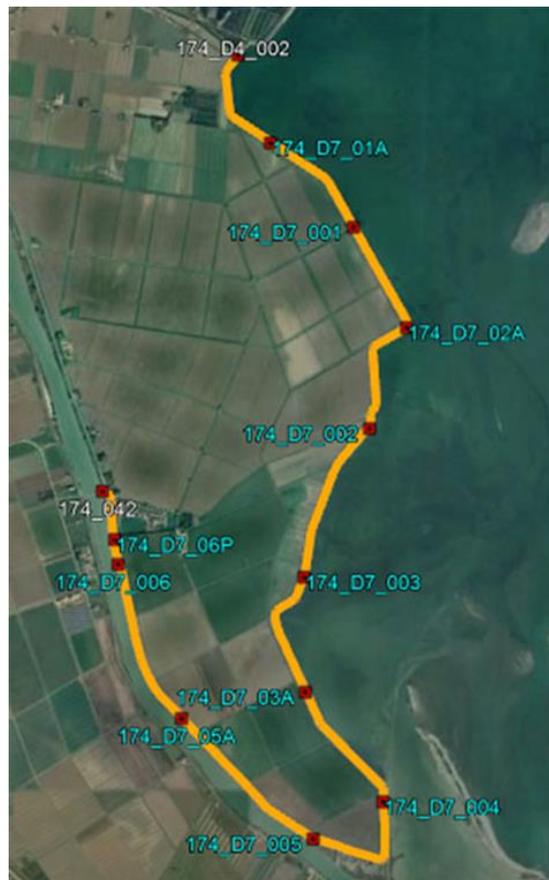


fig. 3.13 – Linea 174_D07

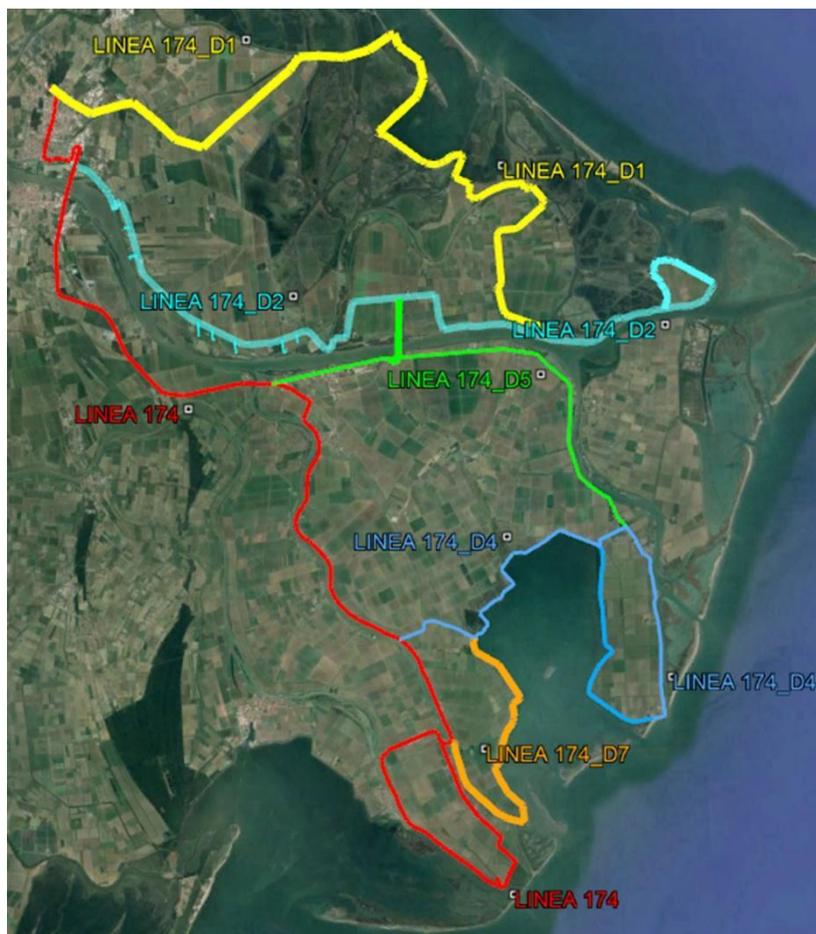


fig. 3.14 – Rete altimetrica nel Delta del Po realizzata nel 2023

3.2 ESECUZIONE DELLE MISURE

L'esecuzione delle misurazioni di dislivello relativamente alla rete del Delta del Po è stata affidata a tre ditte diverse. Il coordinamento e l'assistenza alla direzione dei lavori è stata svolta dall'Università di Padova, che si è occupata anche di misurare una parte delle linee di livellazione progettate.

Le operazioni di misura si sono svolte a partire dal mese di luglio 2023 e si sono concluse nel mese di dicembre 2023.

Tutte le squadre hanno operato con la metodologia della livellazione geometrica dal mezzo utilizzando un livello digitale ed una coppia di stadie con lamina in acciaio invar a lettura codificata. Le operazioni di misura sono state condotte nel rispetto delle Specifiche Tecniche IGM.

Nella *fig. 3.13* viene riportato lo schema della linea 174_D07, misurata dal Laboratorio di Rilevamento e Geomatica nei giorni 19, 20 e 21 settembre 2023. Alle operazioni di misura ha partecipato anche la sottoscritta.

Viene ora descritta una sintesi di queste operazioni di misura.

Il 19 settembre sono state avviate le misurazioni a partire dal caposaldo 174_D7_004, proseguendo fino al caposaldo 174_D7_005. Essendovi una distanza di quasi un chilometro tra i due caposaldi, sono state eseguite 20 stazioni con la misura di altrettante campate.

Il 20 settembre, le operazioni sono iniziate dal chiodo 174_D4_002 in direzione del chiodo 174_D7_01A, continuando poi verso il chiodo 174_D7_003, attraversando la Sacca degli Scardovari da nord a sud. Le tratte misurate erano per lo più inferiori al chilometro, ad eccezione della linea 174_D7_002 – 174_D7_003, che si estendeva per circa 1,3 km e ha richiesto l'esecuzione di 23 stazioni, a differenza invece delle altre che comprendevano dalle 15 alle 17 campate.

Il 21 settembre, ultimo giorno di rilievo, è stata completata la linea partendo dal caposaldo 174_D7_003 fino a raggiungere l'ultimo punto, il 174_042.

La linea 174_D7 si estende, nella sua interezza, per una lunghezza di 11,40 km circa.

3.3 PRE-PROCESSAMENTO DEL DATO MISURATO

I dati giornalieri acquisiti durante la campagna di misura non vengono elaborati in loco. I dati grezzi registrati dallo strumento devono essere pre-processati e deve essere compilato un report di riepilogo contenente le seguenti informazioni (*fig. 3.15*):

- la data con cui è stata eseguita la misura;
- il nome identificativo del caposaldo “indietro”;
- il nome identificativo del caposaldo “avanti”;
- il valore del dislivello misurato in “andata” calcolato tramite la differenza tra le due letture alla stadia; eventualmente questo valore viene corretto applicando il valore del metro medio determinato con la calibrazione delle stadiie;
- la distanza misurata in “andata” in km;
- il valore del dislivello misurato al “ritorno” calcolato tramite la differenza tra le due letture alla stadia; eventualmente questo valore viene corretto applicando il valore del metro medio determinato con la calibrazione delle stadiie;
- la distanza misurata al “ritorno” in km;
- lo scarto in millimetri ovvero la differenza (in valore assoluto) tra i due dislivelli di andata e ritorno;
- la tolleranza calcolata con la media delle due distanze;
- il dislivello medio, che non è altro che la media dei dislivelli corretti del M.M. di andata e ritorno.
- Infine, viene riportata la distanza progressiva percorsa dall’inizio della linea.

Nelle figure successive si riportano le tabelle di riepilogo relative ad alcune linee misurate.

LINEA 174 SECONDA PARTE			ANDATA		RITORNO					
data misura	c.do INDIETRO	c.do AVANTI	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
mer/13/09/23	17442P	17455P	-2.82393	1.078	2.82432	0.900	-0.39	2.49	-2.82413	0.900
mer/13/09/23	17455P	17455S	0.46878	0.024	-0.46887	0.940	-0.09	1.74	0.46882	1.840
mer/13/09/23	17455P	17454P	-0.61596	0.936	0.61650	0.891	-0.54	2.39	-0.61623	2.731
mer/13/09/23	17454P	174054S	0.00053	0.022	-0.00052	0.941	0.01	1.73	0.00052	3.672
gio/14/09/23	17454P	17453	1.59049	1.024	-1.59083	1.314	-0.34	2.70	1.59066	4.986
gio/14/09/23	17453	17452	4.23345	1.579	-4.23418	1.042	-0.73	2.86	4.23382	6.028
gio/09/05/24	17453	17453P	1.42048	0.214	-1.42016	1.052	0.32	1.99	1.42032	7.080
gio/14/09/23	17452	17451	-0.65964	1.432	0.66170	1.431	-2.06	2.99	-0.66067	8.511
mar/19/09/23	17451	17450	0.05259	1.406	-0.05256	1.407	0.03	2.96	0.05257	9.919
mar/19/09/23	17450	17449	0.04681	1.533	-0.04769	1.534	-0.88	3.10	0.04725	11.452
mar/19/09/23	17449	174D302	-2.10179	0.239	2.10181	0.279	-0.02	1.27	-2.10180	11.731

fig. 3.15 – Riepilogo misure parte sud della linea 174

LINEA 174 + 174_D3			ANDATA		RITORNO		SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
data misura	c.do INDIETRO	c.do AVANTI	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)				
mar/24/10/23	17404	17405	-0.80434	0.978	0.80580	1.022	-1.46	2.50	-0.80507	1.022
mar/24/10/23	17405	17406	0.12317	0.799	-0.12312	0.794	0.05	2.23	0.12315	1.816
mar/24/10/23	17406	17407	0.34601	0.171	-0.34615	0.175	-0.14	1.04	0.34608	1.992
mar/24/10/23	17407	17408	3.27046	0.661	-3.26953	0.648	0.93	2.02	3.27000	2.639
mer/25/10/23	17408	17409	-0.99423	0.903	0.99424	0.903	-0.01	2.38	-0.99424	3.543
mer/25/10/23	17409	17410	9.99260	0.934	-9.99236	0.934	0.24	2.42	9.99248	4.476
dom/10/12/23	17410	17411	-0.09204	1.139	0.09273	1.139	-0.69	2.67	-0.09239	5.615
mer/25/10/23	17411	17412	-12.67929	1.107	12.67865	1.107	0.64	2.63	-12.67897	6.723
mer/25/10/23	17412	17413	-0.62899	0.981	0.63042	0.982	-1.43	2.48	-0.62971	7.704
mer/25/10/23	17413	17414	0.98578	1.076	-0.98573	1.076	0.05	2.59	0.98576	8.781
ven/27/10/23	17414	17415	-0.40777	0.920	0.40741	0.920	0.36	2.40	-0.40759	9.701
ven/27/10/23	17415	17416	0.10810	0.717	-0.10723	0.717	0.87	2.12	0.10767	10.417
gio/26/10/23	17416	17417	-0.20718	1.161	0.20759	1.161	-0.41	2.69	-0.20739	11.578
gio/26/10/23	17417	17418	-0.13541	0.733	0.13590	0.733	-0.49	2.14	-0.13566	12.311
gio/26/10/23	17418	17419	0.48832	1.496	-0.48781	1.496	0.51	3.06	0.48807	13.807
lun/23/10/23	17419	17420	-1.73513	1.355	1.73557	1.339	-0.44	2.90	-1.73535	15.146
lun/23/10/23	17420	17421	1.44452	0.577	-1.44424	0.575	0.28	1.90	1.44438	15.721
mar/24/10/23	17421	17422	-1.45717	1.226	1.45766	1.140	-0.49	2.72	-1.45742	16.862
lun/23/10/23	17422	17423	4.22055	0.418	-4.22044	0.418	0.11	1.62	4.22050	17.280
lun/23/10/23	17423	17424	-0.95820	0.892	0.95800	0.892	0.20	2.36	-0.95810	18.172
gio/26/10/23	17424	17425P	-4.83039	1.017	4.83078	1.017	-0.39	2.52	-4.83059	19.189
gio/26/10/23	17425P	17428	1.20722	1.326	1.20738	1.326	-0.16	2.88	-0.00008	20.515
mar/07/11/23	17428	17429	3.39711	1.286	-3.39541	1.286	1.70	2.84	3.39626	21.800
mar/07/11/23	17429	17430	-2.25847	0.906	2.25865	0.906	-0.18	2.38	-2.25856	22.706
mar/07/11/23	17430	17431	0.64436	0.777	-0.64370	0.777	0.66	2.20	0.64403	23.484
mar/07/11/23	17431	17432	-0.43463	0.826	0.43491	0.826	-0.28	2.27	-0.43477	24.310
mer/08/11/23	17432	17433	2.18559	0.575	-2.18532	0.575	0.27	1.90	2.18546	24.885
mer/08/11/23	17433	17434	-0.14609	1.290	0.14516	1.297	0.93	2.84	-0.14563	26.182
mer/08/11/23	17434	17435	0.09278	1.110	-0.09180	1.110	0.98	2.63	0.09229	27.292
mer/08/11/23	17435	17436P	-0.60709	0.413	0.60741	0.413	-0.32	1.61	-0.60725	27.705
mer/08/11/23	17436P	17437	-0.01893	1.088	0.02049	1.088	-1.56	2.61	-0.01971	28.792
gio/09/11/23	17437	17438	-1.60095	1.336	1.60003	1.336	0.92	2.89	-1.60049	30.128
gio/09/11/23	17438	17439	1.08372	1.342	-1.08533	1.300	-1.61	2.87	1.08453	31.428
gio/09/11/23	17439	17440	-0.53599	0.715	0.53431	0.698	1.68	2.10	-0.53515	32.127
gio/09/11/23	17440	17441	-0.24210	1.037	0.24184	1.037	0.26	2.55	-0.24197	33.164
ven/10/11/23	17441	17442	2.19536	1.143	-2.19467	1.143	0.69	2.67	2.19502	34.306
	17442	17442P	PONTE DI BARCHE DI S.GIULIA - MISURA IGM						-0.29518	34.556
ven/10/11/23	17442P	17443	-2.32661	0.828	2.32744	0.828	-0.83	2.27	-2.32703	35.384
ven/10/11/23	17443	17444P	-0.47723	1.429	0.47853	1.429	-1.30	2.99	-0.47788	36.813
lun/20/11/23	17444P	17445P	-0.01433	0.969	0.01506	0.969	-0.73	2.46	-0.01470	37.782
lun/20/11/23	17445P	17446P	-0.87873	0.953	0.87819	0.954	0.54	2.44	-0.87846	38.736
mar/21/11/23	17446P	17447	4.50301	1.085	-4.50262	1.085	0.39	2.60	4.50282	39.821
mar/21/11/23	17447	174D302	-1.08106	0.969	1.08162	0.968	-0.56	2.46	-1.08134	40.789

fig. 3.16 – Riepilogo misure linea 174 e 174_D3

LINEA 174_D4			ANDATA		RITORNO					
data misura	c.do INDIETRO	c.do AVANTI	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
lun/09/10/23	17438	174D401	-0.58116	1.032	0.57989	1.014	1.27	2.53	-0.58053	1.014
lun/09/10/23	174D401	174D402	4.99636	2.073	-4.99805	2.072	-1.69	3.60	4.99721	3.086
mer/27/09/23	174D402	174D403	0.11681	0.973	-0.11771	0.970	-0.90	2.46	0.11726	4.056
gio/28/09/23	174D403	174D404	-0.07749	0.942	0.07747	0.939	0.02	2.43	-0.07748	4.995
gio/28/09/23	174D404	174D405	-0.14168	1.459	0.14140	1.460	0.28	3.02	-0.14154	6.455
gio/28/09/23	174D405	174D406	0.49136	0.965	-0.49090	0.968	0.46	2.46	0.49113	7.423
28-29/09/23	174D406	174D407	-0.02332	0.818	0.02461	0.816	-1.29	2.26	-0.02397	8.240
ven/29/09/23	174D407	174D408	-0.22617	0.986	0.22605	0.979	0.12	2.48	-0.22611	9.219
ven/29/09/23	174D408	174D409	0.22479	0.851	-0.22533	0.851	-0.54	2.31	0.22506	10.070
ven/29/09/23	174D409	174D410	-4.43129	1.522	4.43235	1.520	-1.06	3.08	-4.43182	11.590
mar/10/10/23	174D410	174D411	-0.56306	0.951	0.56215	0.941	0.91	2.43	-0.56261	12.531
mar/10/10/23	174D411	174D412	-0.02133	1.078	0.02269	1.077	-1.36	2.60	-0.02201	13.608
mar/10/10/23	174D412	174D413	1.62794	1.119	-1.62677	1.116	1.17	2.64	1.62736	14.725
mar/10/10/23	174D413	174D414	3.49708	1.040	-3.49750	1.041	-0.42	2.55	3.49729	15.765
mar/10/10/23	174D414	174D415	-3.41377	1.248	3.41473	1.248	-0.96	2.79	-3.41425	17.013
mer/11/10/23	174D415	174D417	3.14320	0.501	-3.14292	0.502	0.28	1.77	3.14306	17.515
mer/11/10/23	174D417	174D418	0.59056	0.981	-0.59079	0.974	-0.23	2.47	0.59068	18.488
mer/11/10/23	174D418	174D419	-0.86053	1.528	0.86111	1.528	-0.58	3.09	-0.86082	20.016
mer/11/10/23	174D419	174D420	0.10855	0.840	-0.10796	0.839	0.59	2.29	0.10826	20.855
mer/11/10/23	174D420	174D421	-0.09027	1.396	0.09148	1.392	-1.21	2.95	-0.09088	22.247
gio/12/10/23	174D421	174D421P	-0.00496	0.408	0.00549	0.408	-0.53	1.60	-0.00523	22.656
gio/12/10/23	174D421P	174D422	0.17281	0.518	-0.17241	0.516	0.40	1.80	0.17261	23.172
gio/12/10/23	174D422	174D423	0.49431	0.929	-0.49451	0.931	-0.20	2.41	0.49441	24.103
gio/12/10/23	174D423	174D424	-0.34309	1.110	0.34168	1.110	1.41	2.63	-0.34239	25.213
gio/12/10/23	174D424	174D409	0.09488	1.043	-0.09433	1.043	0.55	2.55	0.09461	26.256

fig. 3.17 – Riepilogo misure linea 174_D4

LINEA 174_D7			ANDATA		RITORNO					
data misura	c.do INDIETRO	c.do AVANTI	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
mer/20/09/23	174D402	174D701A	0.32655	0.902	-0.32679	0.900	-0.24	2.37	0.32667	0.900
mer/20/09/23	174D701A	174D701	1.67294	0.938	-1.67282	0.940	0.12	2.42	1.67288	1.840
mer/20/09/23	174D701	174D702A	-1.79625	0.889	1.79727	0.891	-1.02	2.36	-1.79676	2.731
mer/20/09/23	174D702A	174D702	-2.20914	0.941	2.20809	0.941	1.05	2.42	-2.20861	3.672
mer/20/09/23	174D702	174D703	2.25388	1.323	-2.25345	1.314	0.43	2.87	2.25366	4.986
gio/21/09/23	174D703	174D703A	-0.05096	1.041	0.05012	1.042	0.84	2.55	-0.05054	6.028
gio/21/09/23	174D703A	174D704	-0.16251	1.052	0.16091	1.052	1.60	2.56	-0.16171	7.080
mar/19/09/23	174D704	174D705	-0.09313	0.993	0.09350	0.988	-0.37	2.49	-0.09331	8.068
gio/21/09/23	174D705	174D705A	0.67939	1.363	-0.68073	1.363	-1.34	2.92	0.68006	9.431
gio/21/09/23	174D705A	174D706	-0.30899	1.313	0.30962	1.313	-0.63	2.86	-0.30930	10.744
gio/21/09/23	174D706	174D706P	-2.42943	0.210	2.42928	0.212	0.15	1.15	-2.42935	10.956
gio/21/09/23	174D706P	17442	0.94756	0.428	-0.94784	0.428	-0.28	1.64	0.94770	11.384

fig. 3.18 – Riepilogo misure linea 174_D7

FILE DI ESPORTAZIONE DEL LIVELLO

Viene ora descritto il contenuto del file grezzo di registrazione dei dati misurati da un livello digitale della casa *Leica*. Il formato dei file di registrazione è definito dall'estensione “.GSI”, rappresenta uno standard comunemente utilizzato ed è stato scelto da tutte le squadre che hanno misurato la rete del delta del Po.

Di seguito viene riportato un estratto del file *200923.GSI* relativo alla misura della linea 174_D7:

```
410001+?......1
110002+174D701A 83..58+00000000
110003+174D701A 32...8+02342920 331.08+00147728 390...+00000003 391.08+00000006
110004+00000001 32...8+02211284 332.08+00140063 390...+00000003 391.08+00000001
110005+00000001 573..8+00131637 574..8+04554204 83..08+00007665
110006+00000001 32...8+02167082 331.08+00137661 390...+00000003 391.08+00000003
110007+00000002 32...8+02205581 332.08+00141602 390...+00000003 391.08+00000001
110008+00000002 573..8+00093138 574..8+08926868 83..08+00003723
110009+00000002 32...8+02185609 331.08+00140378 390...+00000003 391.08+00000001
110010+00000003 32...8+02308445 332.08+00136621 390...+00000003 391.08+00000003
110011+00000003 573..8-00029698 574..8+13420922 83..08+00007480
110012+00000003 32...8+02702620 331.08+00135515 390...+00000003 391.08+00000000
110013+00000004 32...8+02668000 332.08+00138782 390...+00000003 391.08+00000005
110014+00000004 573..8+00004922 574..8+18791541 83..08+00004213
110015+00000004 32...8+02666475 331.08+00136606 390...+00000003 391.08+00000001
110016+00000005 32...8+02689294 332.08+00138916 390...+00000003 391.08+00000004
110017+00000005 573..8-00017897 574..8+24147310 83..08+00001903
[...]
```

Ogni riga del file contiene una serie di stringhe ognuna delle quali viene identificata inizialmente da un codice (word index) che ne specifica il contenuto:

- **41**: inizio della livellazione;
- **11**: nome del caposaldo;
- **83**: quota del caposaldo;
- **32**: distanza tra il livello e la stadia;
- **331**: lettura alla stadia indietro;
- **390**: numero delle ripetizioni della lettura;
- **391**: deviazione standard della lettura;
- **332**: lettura alla stadia avanti;
- **573**: differenza (eccentricità) tra le distanze livello-stadie. Viene aggiornata ad ogni stazione;
- **574**: distanza percorsa lungo la linea;

3.4 CONTROLLI IN CORSO D'OPERA

La direzione dei lavori, dopo ogni giornata di misure, effettua i seguenti controlli:

- verifica della corrispondenza tra i dati riportati nel riepilogo con i dati grezzi scaricati dallo strumento;
- controllo della completezza delle misure effettuate;
- verifica del rispetto della tolleranza di ogni tratta misurata;
- verifica delle ripetizioni delle tratte fuori tolleranza.

3.5 COLLAUDI IN CAMPO

Una volta concluse le attività di misura di ogni squadra, si procede con il collaudo.

Le verifiche si eseguono facendo ripetere alla squadra alcuni tratti di livellazione scelti dalla Direzione Lavori. Queste tratte vanno da un minimo del 5% ad un massimo del 10% dell'intero lavoro commissionato. La ripetizione avviene effettuando la misura della tratta scelta solamente in un verso (andata o ritorno, non entrambe) e risulterà quindi soddisfatta se la differenza rispetto alle misure fatte in precedenza rientra in tolleranza.

Inoltre, durante il collaudo si controlla che le modalità operative e la strumentazione utilizzata dalla squadra siano conformi alle specifiche tecniche impartite.

Di seguito vengono riportati alcuni collaudi eseguiti.

data misura		c.do INDIETRO	c.do AVANTI	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (m)	TOLLERANZA (mm)	DIFFERENZE CON COLLAUDO (mm)	LOCALITA'
ven/28/07/23	ANDATA	19150014	19151002	-0.00058	945.390	2.43	0.27	MALCONTENTA
ven/28/07/23	RITORNO	19151002	19150014	-0.00090	945.270		0.05	
ven/04/08/23	COLLAUDO	19151002	19150014	-0.00085	945.300	MEDIA:	0.16	
mer/26/07/23	ANDATA	19141000	19142012	-0.78625	998.020	2.50	1.47	SAMBRUSON
mer/26/07/23	RITORNO	19142012	19141000	0.78442	998.240		0.36	
ven/04/08/23	COLLAUDO	19142012	19141000	0.78478	997.970	MEDIA:	0.91	
mer/26/07/23	ANDATA	19142012	19143014	-0.15476	813.760	2.26	1.31	SAMBRUSON
mer/26/07/23	RITORNO	19143014	19142012	0.15282	813.580		0.63	
ven/04/08/23	COLLAUDO	19143014	19142012	0.15345	813.520	MEDIA:	0.97	
mar/25/07/23	ANDATA	19134004	19134102	-3.52409	831.050	2.28	1.12	BOJON
mar/25/07/23	RITORNO	19134102	19134004	3.52378	831.140		0.81	
ven/04/08/23	COLLAUDO	19134102	19134004	3.52297	832.390	MEDIA:	0.97	
gio/20/07/23	ANDATA	19100004	19101002	-0.06059	740.930	2.15	1.43	CHIOGGIA
gio/20/07/23	RITORNO	19101002	19100004	0.05906	741.120		0.10	
ven/04/08/23	COLLAUDO	19101002	19100004	0.05916	741.350	MEDIA:	0.76	
lun/17/07/23	ANDATA	19079204	74001004	1.31476	825.930	2.27	2.87	LOREO
lun/17/07/23	RITORNO	74001004	19079204	-1.31677	825.490		0.86	
ven/04/08/23	COLLAUDO	74001004	19079204	-1.31763	834.940	MEDIA:	1.87	
lun/17/07/23	ANDATA	74001004	74002002	-0.46584	878.780	2.34	0.12	LOREO
lun/17/07/23	RITORNO	74002002	74001004	0.46481	878.840		0.91	
ven/04/08/23	COLLAUDO	74002002	74001004	0.46572	896.570	MEDIA:	0.51	
COLLAUDATI						6062		
PERCORSI COMPLESSIVAMENTE						103346		
5%						5167		
10%						10335		

fig. 3.19 – Riepilogo misure di collaudo eseguito in agosto 2023

data misura		c.do INDIETRO	c.do AVANTI	NUM. STAZIONI	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	TOLLERANZA SCARTO (mm)	DIFFERENZE CON COLLAUDO (mm)	LOCALITA'
ven/10/05/24	ANDATA RIP	174D06#001	174D06#002	16	0.45377	0.989	2.49	0.20	CA' CAPPELLINO
ven/10/05/24	RITORNO RIP	174D06#002	174D06#001	16	-0.45399	0.989	0.22	0.42	
mer/08/05/24	COLLAUDO	174D06#001	174D06#002	16	0.45357	0.989	MEDIA:	0.31	
ven/24/11/23	ANDATA	174D06#002	174D06#003	20	-1.54265	1.274	2.82	0.40	CA' CAPPELLINO
ven/24/11/23	RITORNO	174D06#003	174D06#002	20	1.54407	1.273	1.42	1.02	
mer/08/05/24	COLLAUDO	174D06#002	174D06#003	20	-1.54305	1.273	MEDIA:	0.71	
mer/18/10/23	ANDATA	174D05#011P	174D05#012	20	1.40303	1.237	2.78	3.81	GIARETTE
mer/18/10/23	RITORNO	174D05#012	174D05#011P	20	-1.40088	1.237	2.15	1.66	
mer/08/05/24	COLLAUDO	174D05#011P	174D05#012	20	1.39922	1.233	MEDIA:	2.74	
mer/11/10/23	ANDATA	174D04#019	174D04#020	14	0.10855	0.840	2.29	0.59	SACCA SCARDOVARI
mer/11/10/23	RITORNO	174D04#020	174D04#019	14	-0.10672	0.839	1.83	1.24	
mer/08/05/24	COLLAUDO	174D04#019	174D04#020	13	0.10796	0.839	MEDIA:	0.91	
gio/28/09/23	ANDATA	174D04#005	174D04#006	16	0.48922	0.965	2.46	2.14	SACCA SCARDOVARI
gio/28/09/23	RITORNO	174D04#006	174D04#005	16	-0.49090	0.968	1.68	0.46	
mer/08/05/24	COLLAUDO	174D04#006	174D04#005	14	-0.49136	0.965	MEDIA:	1.30	
gio/28/09/23	ANDATA	174D04#006	174D04#007	16	-0.02613	0.826	2.27	2.81	SACCA SCARDOVARI
gio/28/09/23	RITORNO	174D04#007	174D04#006	16	0.02461	0.816	1.52	1.29	
mer/08/05/24	COLLAUDO	174D04#007	174D04#006	12	0.02332	0.818	MEDIA:	2.05	
lun/20/11/23	ANDATA	174#044P	174#045P	16	-0.01325	0.969	2.46	1.08	BACUCCO/GORINO SULLAM
lun/20/11/23	RITORNO	174#045P	174#044P	16	0.01506	0.969	1.81	0.73	
gio/09/05/24	COLLAUDO	174#044P	174#045P	16	-0.01433	0.969	MEDIA:	0.91	
COLLAUDATI (km)						7.09			
PERCORSI COMPLESSIVAMENTE IN LINEA (senza deviazioni) (km)						113.20			
5%						5.66			
10%						11.32			

fig. 3.20 - Riepilogo misure di collaudo eseguito in maggio 2024

3.6 VERIFICA DELLE CHIUSURE

Una volta concluse le misure dell'intera rete altimetrica ed effettuati i controlli, le verifiche ed i collaudi descritti in precedenza si procede con ulteriori verifiche che sfruttano le condizioni di sovrabbondanza delle osservazioni di dislivello rispetto al numero di misure strettamente necessarie.

La rete altimetrica è composta da una serie di linee di livellazione il cui percorso può condurre alla formazione di anelli chiusi. In questi casi, dunque, si individua una linea di livellazione chiusa che ha inizio in un caposaldo e si chiude nello stesso punto dopo aver percorso una certa distanza. Se, quindi, viene assegnata una quota iniziale al caposaldo di partenza sommando a questa i dislivelli misurati lungo la linea chiusa ad anello troverò un nuovo valore della quota iniziale che sarà diversa da quella stabilita in partenza per effetto di immancabili errori di misura. Tale differenza viene definita come *errore di chiusura* il quale, sempre secondo le specifiche tecniche IGM, deve essere inferiore ad una tolleranza pari a:

$$Ta = \pm 2,0\sqrt{L} \text{ mm}$$

dove L è la lunghezza dell'anello espressa in chilometri.

Assegnando al caposaldo iniziale una quota pari a 0 , l'errore di chiusura sarà pari alla somma dei dislivelli misurati sulla linea chiusa.

Di seguito si riportano schema e tabella di verifica relativi ad alcuni di questi percorsi chiusi.

ANELLO 4 – composto da parte delle linee 174 + 174_D5 + 174_D4

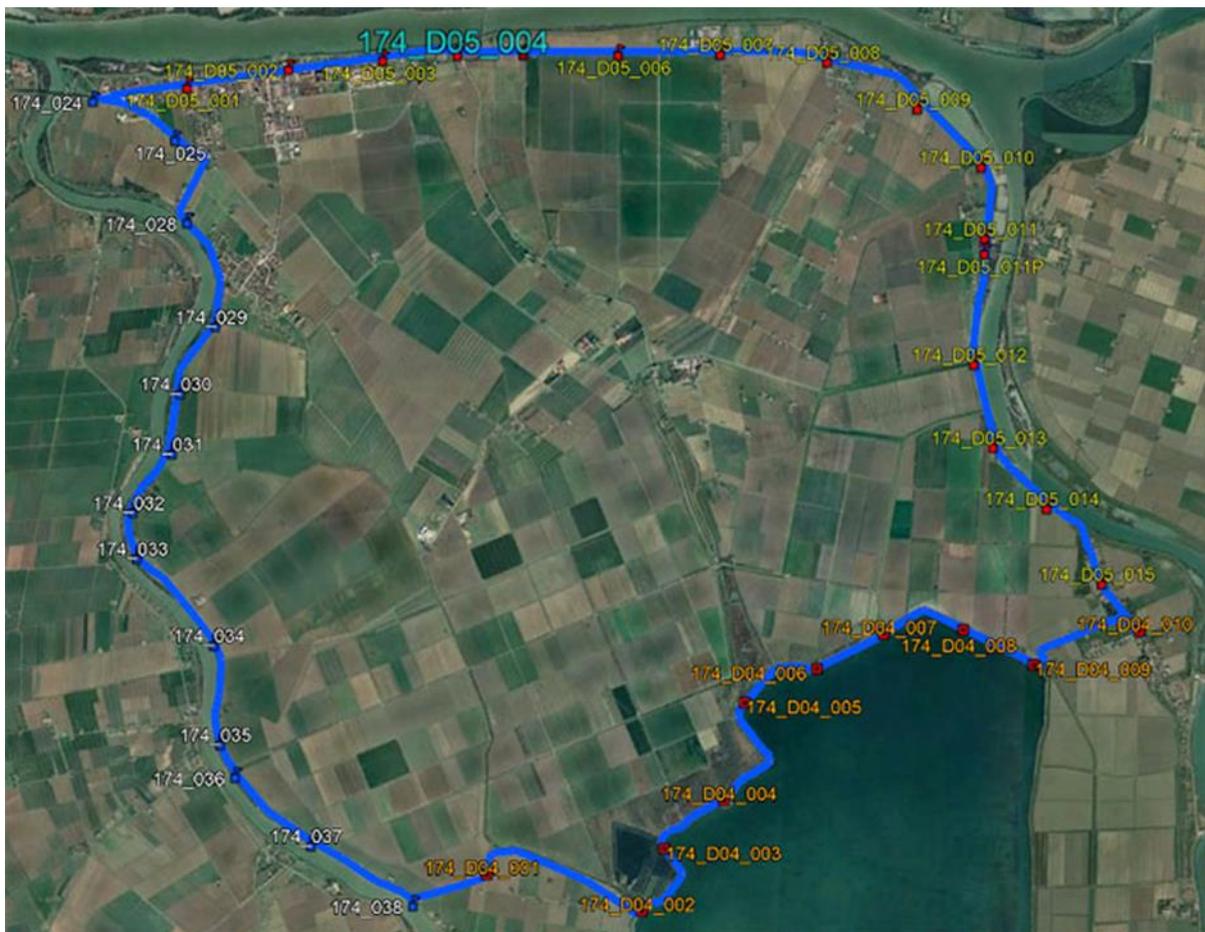


fig. 3.22a

data misura	CS INDIETRO	CS AVANTI	ANDATA		RITORNO		SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
			DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)				
lun/16/10/23	17424	174D501	-3.14505	1.057	3.14596	1.049	-0.91	2.57	-3.14551	1.053
lun/16/10/23	174D501	174D502	0.56299	1.134	-0.56236	1.136	0.63	2.66	0.56268	2.188
lun/16/10/23	174D502	174D503	-0.06436	1.059	0.06366	1.067	0.70	2.58	-0.06401	3.251
mar/17/10/23	174D503	174D504	1.53436	0.833	-1.53411	0.831	0.25	2.28	1.53424	4.083
mar/17/10/23	174D504	174D505	-1.03127	0.718	1.03096	0.714	0.31	2.12	-1.03112	4.799
mar/17/10/23	174D505	174D506	-0.24168	1.038	0.24178	1.037	-0.10	2.55	-0.24173	5.836
mar/17/10/23	174D506	174D507	-0.58262	1.136	0.58274	1.141	-0.12	2.67	-0.58268	6.975
mar/17/10/23	174D507	174D508	1.35352	1.174	-1.35299	1.194	0.53	2.72	1.35326	8.159
mar/17/10/23	174D508	174D509	-0.99547	1.204	0.99658	1.198	-1.11	2.74	-0.99603	9.360
mer/18/10/23	174D509	174D510	1.86609	1.019	-1.86662	1.018	-0.53	2.52	1.86636	10.378
mer/18/10/23	174D510	174D511P	1.67961	1.019	-1.67979	0.986	-0.18	2.50	1.67970	11.381
mer/18/10/23	174D511P	174D512	1.39922	1.233	-1.40088	1.237	-1.66	2.78	1.40005	12.616
gio/19/10/23	174D512	174D513	-2.81686	0.936	2.81675	0.935	0.11	2.42	-2.81681	13.551
gio/19/10/23	174D513	174D514	-1.72815	0.941	1.72810	0.941	0.05	2.43	-1.72813	14.492
gio/19/10/23	174D514	174D515	0.22588	1.082	-0.22596	1.084	-0.08	2.60	0.22592	15.575
gio/19/10/23	174D515	174D410	-0.03861	0.729	0.03910	0.731	-0.49	2.14	-0.03886	16.306
ven/29/09/23	174D410	174D409	4.43235	1.520	-4.43129	1.522	1.06	3.08	4.43182	17.827
ven/29/09/23	174D409	174D408	-0.22533	0.851	0.22479	0.851	0.54	2.31	-0.22506	18.678
ven/29/09/23	174D408	174D407	0.22605	0.979	-0.22617	0.986	-0.12	2.48	0.22611	19.661
28-29/09/23	174D407	174D406	0.02461	0.816	-0.02332	0.818	1.29	2.26	0.02397	20.478
gio/28/09/23	174D406	174D405	-0.49090	0.968	0.49136	0.965	-0.46	2.46	-0.49113	21.444
gio/28/09/23	174D405	174D404	0.14140	1.460	-0.14168	1.459	-0.28	3.02	0.14154	22.903
gio/28/09/23	174D404	174D403	0.07748	0.939	-0.07747	0.942	0.01	2.43	0.07748	23.844
mer/27/09/23	174D403	174D402	-0.11771	0.970	0.11681	0.973	0.90	2.46	-0.11726	24.816
lun/09/10/23	174D402	174D401	-4.99805	2.072	4.99636	2.073	1.69	3.60	-4.99721	26.888
lun/09/10/23	174D401	17438	0.57989	1.014	-0.58116	1.032	-1.27	2.53	0.58053	27.911
gio/09/11/23	17438	17437	1.60003	1.336	-1.60095	1.336	-0.92	2.89	1.60049	29.247
mer/08/11/23	17437	17436P	0.02049	1.088	-0.01893	1.088	1.56	2.61	0.01971	30.335
mer/08/11/23	17436P	17435	0.60741	0.413	-0.60709	0.413	0.32	1.61	0.60725	30.747
mer/08/11/23	17435	17434	-0.09180	1.110	0.09278	1.110	-0.98	2.63	-0.09229	31.857
mer/08/11/23	17434	17433	0.14516	1.297	-0.14609	1.290	-0.93	2.84	0.14563	33.151
mer/08/11/23	17433	17432	-2.18532	0.575	2.18559	0.575	-0.27	1.90	-2.18546	33.726
mar/07/11/23	17432	17431	0.43491	0.826	-0.43463	0.826	0.28	2.27	0.43477	34.552
mar/07/11/23	17431	17430	-0.64370	0.777	0.64436	0.777	-0.66	2.20	-0.64403	35.330
mar/07/11/23	17430	17429	2.25865	0.906	-2.25847	0.906	0.18	2.38	2.25856	36.235
mar/07/11/23	17429	17428	-3.39541	1.286	3.39711	1.286	-1.70	2.84	-3.39626	37.521
gio/26/10/23	17428	17425P	-1.20722	1.326	1.20738	1.326	-0.16	2.88	-1.20730	38.847
gio/26/10/23	17425P	17424	4.83078	1.017	-4.83039	1.017	0.39	2.52	4.83059	39.864
									12.6	TOLLERANZA 2°RADO(L) (mm)
									-0.2	CHIUSURA (mm)

fig. 3.22b

ANELLO 5 – composto da parte della linea 174_D4



fig. 3.23a

data misura	CS INDIETRO	CS AVANTI	ANDATA		RITORNO		SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
			DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)				
ven/29/0923	174D409	174D410	-4.43129	1.522	4.43235	1.520	-1.06	3.08	-4.43182	1.521
mar/10/10/23	174D410	174D411	-0.56306	0.951	0.56215	0.941	0.91	2.43	-0.56261	2.467
mar/10/10/23	174D411	174D412	-0.02133	1.078	0.02269	1.077	-1.36	2.60	-0.02201	3.544
mar/10/10/23	174D412	174D413	1.62794	1.119	-1.62677	1.116	1.17	2.64	1.62736	4.662
mar/10/10/23	174D413	174D414	3.49708	1.040	-3.49750	1.041	-0.42	2.55	3.49729	5.702
mar/10/10/23	174D414	174D415	-3.41377	1.248	3.41473	1.248	-0.96	2.79	-3.41425	6.950
mer/11/10/23	174D415	174D417	3.14320	0.501	-3.14292	0.502	0.28	1.77	3.14306	7.452
mer/11/10/23	174D417	174D418	0.59056	0.981	-0.59079	0.974	-0.23	2.47	0.59068	8.429
mer/11/10/23	174D418	174D419	-0.86053	1.528	0.86111	1.528	-0.58	3.09	-0.86082	9.957
mer/11/10/23	174D419	174D420	0.10855	0.840	-0.10796	0.839	0.59	2.29	0.10826	10.796
mer/11/10/23	174D420	174D421	-0.09027	1.396	0.09148	1.392	-1.21	2.95	-0.09088	12.190
gio/12/10/23	174D421	174D421P	-0.00496	0.408	0.00549	0.408	-0.53	1.60	-0.00523	12.598
gio/12/10/23	174D421P	174D422	0.17281	0.518	-0.17241	0.516	0.40	1.80	0.17261	13.115
gio/12/10/23	174D422	174D423	0.49431	0.929	-0.49451	0.931	-0.20	2.41	0.49441	14.045
gio/12/10/23	174D423	174D424	-0.34309	1.110	0.34168	1.110	1.41	2.63	-0.34239	15.155
gio/12/10/23	174D424	174D409	0.09488	1.043	-0.09433	1.043	0.55	2.55	0.09461	16.198
									8.0	TOLLERANZA 2°RADIO(L) (mm)
									-1.7	CHIUSURA (mm)

fig. 3.23b

ANELLO 6 – composto da parte delle linee 174 + 174_D4 + 174_D7

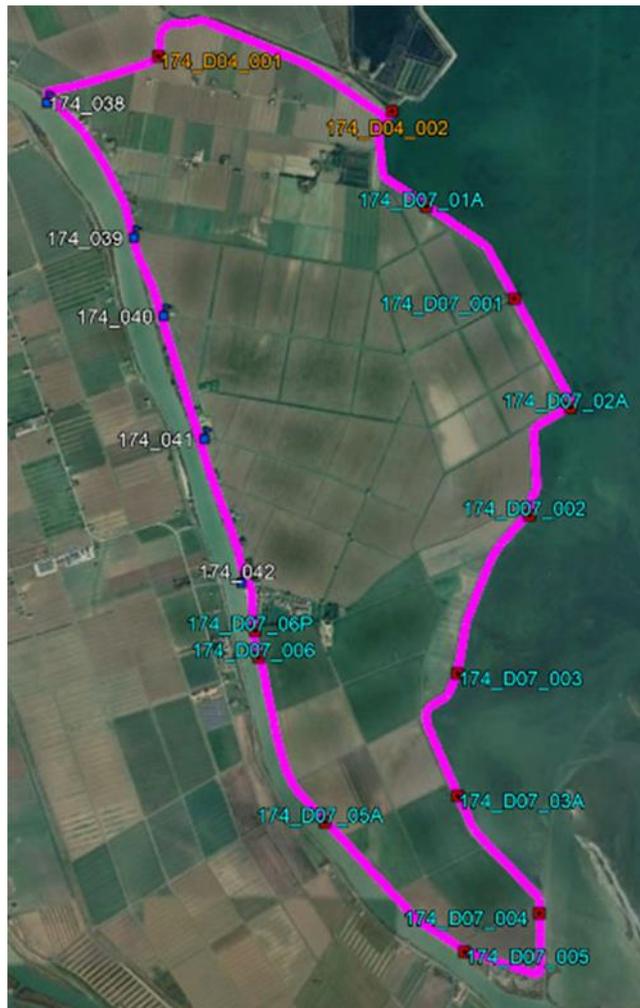


fig. 3.24a

data misura	CS INDIETRO	CS AVANTI	ANDATA		RITORNO		SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
			DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)				
lun/09/10/23	17438	174D401	-0.58116	1.032	0.57989	1.014	1.27	2.53	-0.58053	1.023
lun/09/10/23	174D401	174D402	4.99636	2.073	-4.99805	2.072	-1.69	3.60	4.99721	3.095
mer/20/09/23	174D402	174D701A	0.32655	0.902	-0.32679	0.900	-0.24	2.37	0.32667	3.996
mer/20/09/23	174D701A	174D701	1.67294	0.938	-1.67282	0.940	0.12	2.42	1.67288	4.935
mer/20/09/23	174D701	174D702A	-1.79625	0.889	1.79727	0.891	-1.02	2.36	-1.79676	5.826
mer/20/09/23	174D702A	174D702	-2.20914	0.941	2.20809	0.941	1.05	2.42	-2.20861	6.766
mer/20/09/23	174D702	174D703	2.25388	1.323	-2.25345	1.314	0.43	2.87	2.25366	8.085
gio/21/09/23	174D703	174D703A	-0.05096	1.041	0.05012	1.042	0.84	2.55	-0.05054	9.126
gio/21/09/23	174D703A	174D704	-0.16251	1.052	0.16091	1.052	1.60	2.56	-0.16171	10.179
mar/19/09/23	174D704	174D705	-0.09313	0.993	0.09350	0.988	-0.37	2.49	-0.09331	11.169
gio/21/09/23	174D705	174D705A	0.30962	1.313	-0.30899	1.313	0.63	2.86	0.30931	12.482
gio/21/09/23	174D705A	174D706	-0.68073	1.363	0.67939	1.363	1.34	2.92	-0.68006	13.844
gio/21/09/23	174D706	174D706P	-2.42943	0.210	2.42928	0.212	0.15	1.15	-2.42935	14.056
gio/21/09/23	174D706P	17442	0.94756	0.428	-0.94784	0.428	-0.28	1.64	0.94770	14.483
ven/10/11/23	17442	17441	-2.19467	1.143	2.19536	1.143	-0.69	2.67	-2.19502	15.626
gio/09/11/23	17441	17440	0.24184	1.037	-0.24210	1.037	-0.26	2.55	0.24197	16.663
gio/09/11/23	17440	17439	0.53431	0.698	-0.53599	0.715	-1.68	2.10	0.53515	17.369
gio/09/11/23	17439	17438	-1.08533	1.300	1.08372	1.342	1.61	2.87	-1.08453	18.691
										8.6 TOLLERANZA 2°RADO(L) (mm)
										4.1 CHIUSURA (mm)

fig. 3.24b

ANELLO 7 – composto da parte delle linee 174 + 174_D3



fig. 3.25a

data misura	CS INDIETRO	CS AVANTI	ANDATA		RITORNO		SCARTO (mm)	TOLLERANZA (mm)	DISLIVELLO MEDIO (m)	DISTANZA progressiva (km)
			DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)				
mer/13/09/23	17442P	17455P	-2.82393	1.078	2.82432	1.043	-0.39	2.57	-2.82413	1.061
mer/13/09/23	17455P	17454P	-0.61596	0.936	0.61650	0.933	-0.54	2.42	-0.61623	0.934
gio/14/09/23	17454P	17453	1.59049	1.024	-1.59083	1.036	-0.34	2.54	1.59066	1.965
gio/14/09/23	17453	17452	4.23345	1.579	-4.23418	1.578	-0.73	3.14	4.23382	3.543
gio/14/09/23	17452	17451	-0.65964	1.432	0.66170	1.431	-2.06	2.99	-0.66067	4.975
mar/19/09/23	17451	17450	0.05259	1.406	-0.05256	1.407	0.03	2.96	0.05257	6.381
mar/19/09/23	17450	17449	0.04681	1.533	-0.04769	1.534	-0.88	3.10	0.04725	7.915
mar/19/09/23	17449	174D302	-2.10179	0.239	2.10181	0.279	-0.02	1.27	-2.10180	8.174
mar/21/11/23	174D302	17447	1.08162	0.968	-1.08106	0.969	0.56	2.46	1.08134	9.142
mar/21/11/23	17447	17446P	-4.50262	1.085	4.50301	1.085	-0.39	2.60	-4.50282	10.227
lun/20/11/23	17446P	17445P	0.87819	0.954	-0.87873	0.953	-0.54	2.44	0.87846	11.181
lun/20/11/23	17445P	17444P	0.01506	0.969	-0.01433	0.969	0.73	2.46	0.01470	12.150
ven/10/11/23	17444P	17443	0.47853	1.429	-0.47723	1.429	1.30	2.99	0.47788	13.579
ven/10/11/23	17443	17442P	2.32744	0.828	-2.32661	0.828	0.83	2.27	2.32703	14.407
										7.6 TOLLERANZA 2°RADO(L) (mm)
										-1.9 CHIUSURA (mm)

fig. 3.25b

3.7 COMPENSAZIONE DELLA RETE

La rete altimetrica del delta del Po è stata misurata con 185 osservazioni di dislivello che hanno collegato tra loro, senza soluzioni di continuità, 179 caposaldi di livellazione.

Una rete altimetrica risulta monodimensionale in quanto le coordinate incognite sono costituite dalle sole quote dei caposaldi che la costituiscono. La medesima rete, costituita dai caposaldi collegati tra loro dalle misure del dislivello, presenta nello spazio un solo grado di libertà. Per definire le incognite del problema altimetrico sono perciò necessarie un numero di osservazioni almeno pari ad $n-1$ dove n rappresenta il numero dei caposaldi della rete collegati tra loro senza soluzione di continuità.

Il numero di misure effettuate nella rete del delta del Po risulta essere sovrabbondante rispetto al numero strettamente necessario con una sovrabbondanza pari a $185-(179-1) = 7$.

In queste condizioni è possibile attivare la procedura rigorosa di compensazione delle *osservazioni indirette* la quale, attraverso il criterio probabilistico dei minimi quadrati, permette di analizzare la distribuzione degli errori di misura di tipo accidentale e di valutare la precisione delle quote dei caposaldi espressa attraverso la deviazione standard o scarto quadratico medio relativo ad ogni quota.

La compensazione delle osservazioni che viene fatta inizialmente è quella cosiddetta di tipo intrinseco o ai minimi vincoli. In questo caso viene fissata la quota di un unico caposaldo per eliminare il grado di libertà della rete. Con tale procedura si ottengono le deviazioni standard sui singoli caposaldi che esprimono la precisione tenendo conto solamente delle misure effettuate senza, cioè, essere influenzata da condizioni di vincolo superflue. La compensazione intrinseca viene eseguita per prima, quindi, per validare la campagna di misure.

Nella rete del delta del Po la compensazione intrinseca delle osservazioni è stata eseguita fissando un caposaldo baricentrico assegnando allo stesso un valore di quota aleatorio. Il caposaldo baricentrico scelto si trova nella piazza del municipio di Porto Tolle, è denominato 174_D5_02 e gli è stato dato un valore arbitrario di quota pari a 10,000 m.

Viene ora riportato un estratto del report del programma di calcolo della *compensazione delle osservazioni*. Si tratta del software *StarNet* verificato e applicato da molti enti per la verifica rigorosa dei dati di misura.

Il report inizia con delle informazioni generali sul tipo di compensazione, la precisione strumentale, il numero dei caposaldi vincolati ed il loro valore di quota fissata e poi prosegue con il numero e la lista delle osservazioni di dislivello da compensare. In ognuna di queste vengono riportate il nome del caposaldo indietro e quello in avanti, il valore della misura di dislivello, precisione della stessa e la distanza della tratta. Alla fine della lista delle osservazioni si riporta un sommario con il numero delle incognite, delle osservazioni, dei vincoli ed il valore della sovrabbondanza.

Summary of Files Used and Option Settings

```

=====
Project Option Settings
STAR*NET Run Mode      : Adjust with Error Propagation
Type of Adjustment     : Lev
Project Units          : Meters
Input/Output Coordinate Order : North-East
Create Coordinate File : Yes
  
```

Instrument Standard Error Settings

```

Project Default Instrument
Differential Levels      : 0.000300 Meters / Km
  
```

Summary of Unadjusted Input Observations

```

=====
Number of Entered Stations (Meters) = 1
Fixed Stations      Elev  Description
174D502             10.0000
  
```

Number of Differential Level Observations (Meters) = 185

From	To	Elev Diff	StdErr	Length
17442P	17455P	-2.8241	0.0003	1078
17455P	17454P	-0.6162	0.0003	936
17454P	17453	1.5907	0.0003	1024
17453	17452	4.2338	0.0004	1579
17452	17451	-0.6607	0.0004	1432
17451	17450	0.0526	0.0004	1406
17450	17449	0.0473	0.0004	1533
17449	174D302	-2.1018	0.0001	239
174D302	17447	1.0813	0.0003	968
17447	17446P	-4.5028	0.0003	1085
[...]				

Adjustment Statistical Summary

```

=====
Number of Stations      = 179
Number of Observations = 185
Number of Unknowns     = 178
Number of Redundant Obs = 7
  
```

Il report prosegue, poi, con una tabella nella quale si riporta per ogni caposaldo la quota compensata e la relativa deviazione standard.

Naturalmente, tale quota compensata non ha significato, avendo fissato in modo arbitrario la quota del caposaldo baricentrico, mentre la deviazione standard esprime l'effettiva precisione raggiunta di ogni punto e generata esclusivamente dalle misure eseguite.

Dalla tabella delle deviazioni standard si evince che la precisione più scarsa sulle quote compensate sia di 4 mm. Quindi, considerato che la lunghezza delle linee che formano l'intera rete risulta pari a 175,1 km, considerato che le misure sono state svolte da tre squadre diverse e indipendenti, si può concludere che il risultato ottenuto sia soddisfacente e che le misure effettuate possano considerarsi validate.

Adjusted Elevations and Error Propagation (Meters)

```

=====
Station      Elev      StdDev
174D502      10.0000  0.000000
17442P       12.4196  0.003439
  
```

17455P	9.5956	0.003581
17454P	8.9795	0.003684
17453	10.5703	0.003776
17452	14.8043	0.003880
17451	14.1438	0.003936
17450	14.1966	0.003959
17449	14.2440	0.003947
174D302	12.1422	0.003941
[...]		

Infine il report del calcolo di compensazione espone la differenza tra i dislivelli calcolati con le quote compensate rispetto a quelli misurati. Con questa è possibile evidenziare le eventuali misure aventi residui alti e che quindi potrebbero essere soggette a ripetizioni eventuali. Come fatto in precedenza si riportano solo le prime dieci righe.

Adjusted Observations and Residuals

=====

Adjusted Differential Level Observations (Meters)

From	To	Elev Diff	Residual	StdErr	StdRes	File:Line
17442P	17455P	-2.8240	0.0001	0.0003	0.4	1:10
17455P	17454P	-0.6161	0.0001	0.0003	0.4	1:11
17454P	17453	1.5908	0.0001	0.0003	0.4	1:12
17453	17452	4.2340	0.0002	0.0004	0.5	1:13
17452	17451	-0.6605	0.0002	0.0004	0.5	1:14
17451	17450	0.0527	0.0002	0.0004	0.5	1:15
17450	17449	0.0474	0.0002	0.0004	0.5	1:16
17449	174D302	-2.1018	0.0000	0.0001	0.2	1:17
174D302	17447	1.0815	0.0001	0.0003	0.4	1:18
17447	17446P	-4.5027	0.0001	0.0003	0.4	1:19
[...]						

3.8 RESTITUZIONE E MONOGRAFIE

La fase finale vede il calcolo delle quote aggiornate dei caposaldi della rete e la stesura dei libretti monografici, che archiviano i valori di quota e contengono le indicazioni e le immagini necessarie per l'identificazione di ogni singolo caposaldo. Questa fase è eseguita e coordinata dall'IGM essendo la rete del delta del Po appartenente alla rete altimetrica fondamentale italiana.

4.0 LIVELLAZIONE ALTIMETRICA DI PRECISIONE

4.1 GENERALITA' E DEFINIZIONI

La livellazione geometrica dal mezzo è il metodo più preciso per la misura del dislivello tra due caposaldi; pertanto viene impiegata per determinare, con la massima precisione possibile, le quote di punti fondamentali distribuiti su un vasto territorio a cui si possono ricollegare le altre operazioni altimetriche.

La livellazione geometrica è altresì comunemente e largamente impiegata nella determinazione delle quote di punti per scopi tecnici, quali ad esempio per la progettazione e costruzione di strade, ferrovie, acquedotti, fognature, ecc.; è evidente che, in questi casi, specie in opere in cui si hanno deflussi d'acque, le quote di riferimento per la costruzione dei manufatti vanno determinate con elevata precisione.

La livellazione altimetrica di precisione si esegue inoltre per la determinazione delle quote dei caposaldi di livellazione di una rete altimetrica e per valutare le deformazioni altimetriche del suolo. Per fare ciò si utilizza la livellazione geometrica dal mezzo, procedura utilizzata in questa campagna di livellazioni, ovvero si dispone lo strumento livello alla stessa distanza da due stadi poste su due caposaldi per la determinazione del dislivello tra i medesimi.

Per determinare il dislivello fra due punti A e B mediante livellazione geometrica, si ricorre al livello che deve soddisfare essenzialmente la sola condizione di poter disporre orizzontale l'asse di collimazione del cannocchiale in qualsiasi direzione si effettui il puntamento.

Si dispongono quindi verticalmente le due stadi su ciascuno dei punti A e B; si dispone il livello stazionandolo in posizione equidistante tra A e B; si esegue la lettura alla stadia indietro L_i ; si ruota quindi il cannocchiale e si esegue la lettura alla stadia avanti L_a .

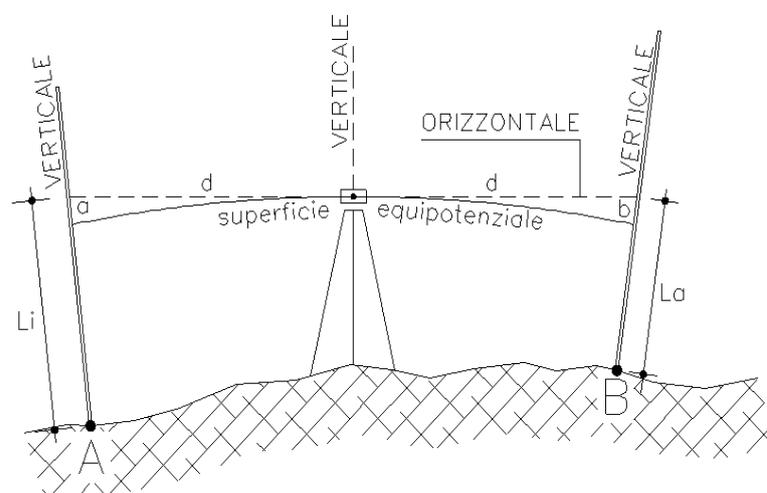


fig. 4.1 – Schema di una stazione della livellazione geometrica dal mezzo

Di seguito viene riportata la formula per la determinazione del dislivello tra due punti A e B con l'utilizzo della livellazione dal mezzo:

$$\Delta_{AB} = H_B - H_A = L_i - L_a$$

I vantaggi nell'utilizzare questo tipo di livellazione, principalmente dovuti alla simmetria dello schema, sono:

- si elimina l'influenza dell'errore residuo strumentale di orizzontalità della linea di mira;
- si elimina l'effetto della rifrazione atmosferica
- consente di non fare alcuna ipotesi sulla superficie di riferimento.

Quando si deve misurare il dislivello fra punti la cui distanza sia superiore ai 100 m o fra punti non visibili fra loro si eseguono più battute di livellazione. Si divide cioè la loro distanza in tratti per ciascuno dei quali si esegue una battuta dal mezzo, come è stato fatto nel nostro caso: abbiamo infatti suddiviso le tratte in varie battute di livellazione in base alla sua lunghezza totale (fig. 4.2).

In questo caso la misura del dislivello risulta:

$$\Delta_{AB} = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n$$

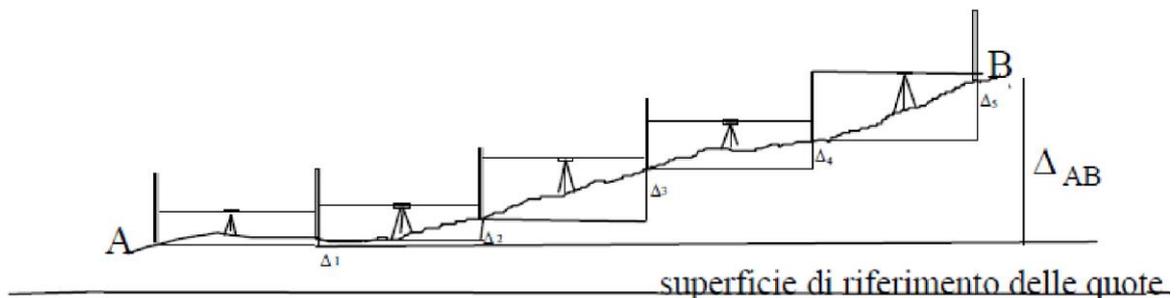


fig. 4.2 – schema della livellazione geometrica dal mezzo frazionata

4.2 COMPENSAZIONE OSSERVAZIONI

4.2.1 IL METODO DI COMPENSAZIONE ALLE OSSERVAZIONI INDIRETTE

Il metodo consiste nella determinazione del valore di m grandezze incognite X, Y, Z, \dots attraverso la misura di altre grandezze l, q, t, \dots in numero qualsiasi legate alle prime da uno o più vincoli funzionali.

$$f_j(X, Y, Z, \dots; l, q, t, \dots) = 0 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, r)$$

- Se $r = 1$ (un'osservazione = 1 equazione)
- Per n osservazione = n equazione in m incognite
- Se $n = m \Rightarrow 1$ soluzione determinata (non esiste alcun elemento di controllo che consenta di valutare l'influenza degli errori accidentali).

- Se $n > m \Rightarrow$ le n equazioni disponibili per la soluzione del problema saranno in genere incompatibili fra di loro nel senso che se da m di esse si ricavano i valori delle m incognite e si sostituiscono nelle $n-m$ equazioni rimanenti, queste non risulteranno soddisfatte.

Per risolvere le equazioni generate viene introdotto il linguaggio matriciale, il cui utilizzo si è dimostrato utile per risolvere i problemi di compensazione utilizzando i calcoli elettronici.

A causa degli errori accidentali presenti nei valori osservati l_i, q_i, t_i, \dots le n equazioni possono essere tutte contemporaneamente soddisfatte:

$$f_j(X, Y, Z, \dots; l_i, q_i, t_i, \dots) = v_i \quad \text{Equazioni generatrici o equazione agli errori.}$$

v_i = indice dell'influenza degli errori accidentali nei valori misurati.

v_i = residuo di osservazione

Occorre individuare un criterio probabilistico che permetta di assegnare dei valori significativi alle incognite.

Il termine compensare significa determinare le correzioni d'apportare alle misure (e a valori approssimati dei parametri incogniti) per renderle tutte congruenti tra loro, cioè tali da soddisfare tutte le relazioni di vincolo.

Il criterio comunemente usato è quello dei minimi quadrati applicato agli scarti v delle equazioni. Secondo il criterio dei minimi quadrati la somma dei quadrati di tutte le differenze fra i valori osservati per le singole grandezze misurate ed i valori finali di queste ultime, cioè i valori che chiamiamo "compensati", deve essere minima.

$$[v^2] = \text{minimo}; [pv^2] = \text{minimo.}$$

Da un sistema di equazioni lineari (risolvendo m delle n equazioni del sistema) ottengo:

- X_0, Y_0, Z_0, \dots : valori approssimati delle incognite;
- x, y, z, \dots : correzioni da apportare ai valori approssimati tali da dare i valori più plausibili.

$$X = X_0 + x; Y = Y_0 + y; Z = Z_0 + z, \dots$$

$$f_j(X_0 + x, Y_0 + y, Z_0 + z, \dots; l_i, q_i, t_i, \dots) = v_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

sviluppendo in serie e trascurando i termini di secondo ordine:

$$f_j(X_0, Y_0, Z_0, \dots; l_i, q_i, t_i, \dots) + \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_0 x + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)_0 y + \dots = v_i$$

Ponendo:

$$f_j(X_0, Y_0, Z_0, \dots; l_i, q_i, t_i, \dots) = L_i; \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_0 = a_i; \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)_0 = b_i; \dots$$

$$\rightarrow a_i x + b_i y + c_i z + \dots + L_i \quad \text{equazione generate}$$

Con:

$$[pv^2] = \min \rightarrow \text{moltiplicando tutte le equazioni per } \sqrt{p} \Rightarrow [v^2] = \min$$

La condizione di minimo si traduce in quella d'annullamento delle derivate parziali fatte rispetto alle incognite:

$$\frac{\partial [v^2]}{\partial x} = 0; \frac{\partial [v^2]}{\partial y} = 0; \dots$$

In un sistema di m equazioni in m incognite troviamo come soluzione valori più plausibili delle incognite.

⇒ Espressioni risolutive.

⇒ Es. caso di due sole incognite X e Y

$$a_i x + b_i y + L_i = v_i \quad \text{equazioni generate}$$

$$\text{condizione di minimo} \rightarrow \frac{\partial [v^2]}{\partial x} = 2 \left[v \frac{\partial v}{\partial x} \right] = 0; \quad \frac{\partial [v^2]}{\partial y} = 2 \left[v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = 0;$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x} = a_i; \quad \frac{\partial v_i}{\partial y} = b_i$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x} v_i = a_i a_i x + a_i b_i y + a_i L_i \quad \frac{\partial v_i}{\partial y} v_i = a_i b_i x + b_i b_i y + b_i L_i$$

$$\begin{cases} [aa]x + [ab]y + [aL] = 0 \\ [ab]x + [bb]y + [bL] = 0 \end{cases}$$

Sistema Normale

La soluzione del sistema normale fornisce i valori più probabili delle correzioni x e y che sommate ai valori X_0 e Y_0 di prima approssimazione, danno infine i valori più plausibili delle grandezze incognite X, Y cioè i loro valori compensati.

Generalizzando al caso di m incognite ($n > m$): i valori più plausibili delle incognite sono le soluzioni di un sistema normale di m equazioni lineari ad m incognite ottenute annullando le derivate parziali di $[v^2]$ rispetto a ciascuna delle m incognite.

$$\begin{cases} [aa]x + [ab]y + [ac]z + \dots + [aL] = 0 \\ [ab]x + [bb]y + [bc]z + \dots + [bL] = 0 \\ [ac]x + [cb]y + [cc]z + \dots + [cL] = 0 \\ \dots \\ \dots \end{cases}$$

n equazioni lineari ad n incognite

Introduciamo il linguaggio matriciale per risolvere le equazioni generate, il cui utilizzo si è dimostrato utile per risolvere i problemi di compensazione utilizzando i calcolatori elettronici.

Sia **A** la matrice che contiene i coefficienti noti a_i, b_i, c_i, \dots

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & \dots & \dots & \dots \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & \dots & \dots \\ a_3 & b_3 & c_3 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & c_n & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$A = (n * m)$

Sia il vettore \bar{X} quello che contiene le incognite X, Y, Z,

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix}$$

$\bar{X} = (m \bullet 1)$

Il vettore \bar{L} che contiene i termini noti L_i

$$\bar{L} = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ L_n \end{pmatrix}$$

$\bar{L} = (n \bullet 1)$

Il vettore \bar{x} che contiene le correzioni x, y, z,

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$$

$$\bar{x} = (m \bullet 1)$$

Il vettore \bar{v} che contiene gli scarti v_1, v_2, v_3, \dots

$$\bar{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_n \end{pmatrix}$$

$$\bar{v} = (n \bullet 1)$$

Il corrispondente sistema delle equazioni generate è:

$$A\bar{x} + \bar{L} = v \quad [1]$$

L'equivalente del principio dei minimi quadrati nel linguaggio matriciale, introducendo la matrice dei pesi P :

$$P = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & p_2 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & p_3 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 0 & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & p_n \end{pmatrix} \text{ matrice diagonale}$$

Diventa:

$$\bar{v}^T P \bar{v} = \min \quad \text{principio dei minimi quadrati.}$$

Si esegue il differenziale e lo si pone = 0:

$$d\bar{v}^T P \bar{v} + \bar{v}^T P d\bar{v} = 0 \quad [2]$$

per le proprietà delle matrici si ha (perché matrice diagonale):

$$\bar{v}^T P d\bar{v} = (\bar{v}^T P d\bar{v})^T = d\bar{v}^T P \bar{v}$$

La [2] si riscrive:

$$2d\bar{v}^T P \bar{v} = 0 \quad [3]$$

Si fa il differenziale della [1] e se ne fa il trasposto:

$$\begin{aligned} d(A\bar{x})^T &= d\bar{v}^T \\ d\bar{x}^T A^T &= d\bar{v}^T \end{aligned} \quad [4]$$

Si sostituisce la [4] e la [1] nella [3] in modo da avere equazioni nella sola incognita \bar{x}

$$d\bar{x}^T A^T P(A\bar{x} + \bar{L}) = 0 \quad [5]$$

La [5] deve essere soddisfatta per qualsiasi variazione di $d\bar{x}^T$ allora:

$$(A^T P A)\bar{x} + A^T P \bar{L} = 0 \quad [6]$$

La [6] equivale al sistema normale visto precedentemente: si dimostra nel caso di due variabili x e y:

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} & A^T &= \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \\ A^T P A &= \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 p_1 & a_2 p_2 \\ b_1 p_1 & b_2 p_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} a_1 a_1 p_1 + a_2 a_2 p_2 & a_1 b_1 p_1 + a_2 b_2 p_2 \\ b_1 a_1 p_1 + b_2 a_2 p_2 & b_1 b_1 p_1 + b_2 a_2 p_2 \end{pmatrix} \\ A^T P \bar{L} &= \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 p_1 L_1 + a_2 p_2 L_2 \\ b_1 p_1 L_1 + b_2 p_2 L_2 \end{pmatrix} \\ (A^T P A)\bar{x} + A^T P \bar{L} &= \begin{pmatrix} [aap] & [abp] \\ [bap] & [bbp] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [apL] \\ [bpL] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [aap]x + [abp]y + [apL] \\ [bpa]x + [bbp]y + [bpL] \end{pmatrix} \text{ c.d.v.} \end{aligned}$$

Il sistema è risolvibile se la matrice $(A^T P A)$ ha determinante diverso da zero, allora ammette l'esistenza della sua inversa: $(A^T P A)^{-1}$ ed il sistema si risolve:

$$\bar{x} = -(A^T P A)^{-1} A^T P \bar{L}$$

che è il vettore delle correzioni più probabili da attribuire alle grandezze incognite X,Y,Z,....

Si devono infine determinare varianze e covarianze dei valori più plausibili. Si definisce la matrice normale N:

$$N = (A^T P A)$$

La sua inversa:

$$H = (A^T P A)^{-1}$$

E la matrice delle varianze-covarianze C:

$$C = \sigma_o^2 N^{-1} = \sigma_o^2 H$$

dove la stima della varianza dell'unità di peso viene calcolata utilizzando i valori più plausibili degli scarti, ricalcolati dopo aver risolto il sistema normale, e si ottiene:

$$\sigma_o^2 = \frac{\bar{v}^T P \bar{v}}{n - m}$$

le varianze sono date da:

$$\sigma_i^2 = \sigma_o^2 H_{ii} = C_{ii} \quad \text{diagonale}$$

e le covarianze:

$$\sigma_{i,k}^2 = \sigma_o^2 H_{ik} = C_{iK} \quad \text{extra-diagonale}$$

da associare ai valori più plausibili determinati.

4.3 COMPENSAZIONE DELLE RETI DI LIVELLAZIONE

La compensazione di una rete di livellazione si esegue con le stesse modalità qualunque sia il tipo di collegamento altimetrico adottato; variano solo l'entità degli s.q.m. delle misure dei dislivelli e la dipendenza di questi dalla distanza fra i punti collegati; nella livellazione geometrica lo s.q.m. è proporzionale alla radice quadrata della distanza, mentre nella livellazione trigonometrica si può assumere, per distanze inferiori a una decina di chilometri, proporzionale alla distanza; si possono così valutare i pesi da introdurre nei calcoli di compensazione tutte le volte che gli s.q.m. non sono noti a posteriori (per esempio osservazioni altimetriche lungo poligoni chiusi, senza ripetizione delle misure).

Ovviamente prima di procedere alla compensazione, bisogna verificare che le differenze fra i dislivelli misurati in andata e in ritorno o gli errori di chiusura dei poligoni siano inferiori alle tolleranze: queste si fissano con i soliti criteri in base agli s.q.m. delle misure calcolati a priori.

Procediamo con l'illustrazione della compensazione con il *metodo delle osservazioni indirette*.

Le equazioni generatrici sono:

$$H_j - H_i - \Delta_{ij}^* = v_{ij}$$

dove $\Delta_{ij} = H_j - H_i$ è il valore più plausibile del dislivello e Δ_{ij}^* è il dislivello misurato. Anche se le equazioni generatrici sono lineari conviene, per questioni di approssimazioni numeriche e di maggiore facilità di calcolo, determinare dei valori approssimati delle quote \bar{H}_i e \bar{H}_j ed assumere come incognite le correzioni δH_i e δH_j da attribuire ai valori approssimati per ottenere le quote più plausibili:

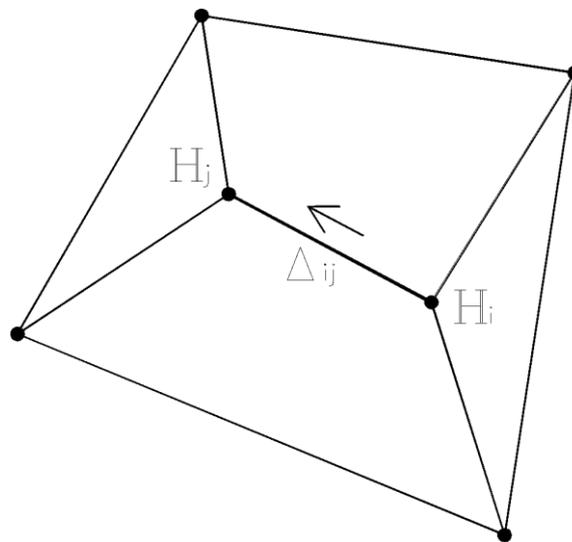
$$\bar{H}_j + \delta H_j - \bar{H}_i - \delta H_i - \Delta_{ij}^* = v_{ij}$$

ponendo:

$$\bar{H}_j - \bar{H}_i - \Delta_{ij}^* = l_{ij}$$

si ottiene

$$\delta H_j - \delta H_i + l_{ij} = v_{ij}$$



Di queste equazioni ne possiamo scrivere una per ogni dislivello misurato: nell'esempio in figura quindi 9 equazioni.

Una rete di livellazione può essere collegata a uno o più caposaldi di quota nota, oppure essere a sé stante; in quest'ultimo caso per eseguire i calcoli di compensazione si attribuisce un valore arbitrario alla quota di uno dei punti.

Se, nell'esempio in figura, supponiamo di avere un punto di quota nota, le quote incognite si riducono a 5: avremo quindi un sistema di 9 equazioni in 5 incognite.

Per determinare i valori più plausibili delle incognite si applica, come è noto, il principio dei minimi quadrati nella forma $[pv^2] = \min$, tenendo presente che:

$$p_{ij} = \frac{1}{D_{ij}} \quad \text{per la livellazione geometrica}$$

$$p_{ij} = \frac{1}{D_{ij}^2}$$

per la livellazione *trigonometrica*.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questa tesi di laurea era presentare in modo chiaro e dettagliato le procedure geomatiche volte alla realizzazione e all'aggiornamento di una Rete di Livellazione di Alta Precisione.

Dopo aver analizzato le Specifiche Tecniche fornite dall'IGM, dopo aver consultato attentamente le monografie della rete esistente, si è proceduti con la **progettazione** delle linee di livellazione in modo tale da mantenere i percorsi esistenti, ridefinirli ed eventualmente ampliarli.

Si è proceduti quindi con la **ricognizione** dei caposaldi per conoscerne lo stato di mantenimento e, successivamente, sulla base dei report realizzati in codesta fase, si sono materializzati i caposaldi di nuova istituzione.

Concluse queste indispensabili fasi, si è passati al **rilevamento delle linee** che, essendo di una lunghezza considerevole, è stato organizzato in step in vari giorni di lavoro.

I dati acquisiti con le misure in campo sono stati pre-processati e si sono compilati i report di riepilogo contenenti il valore di dislivello tra due caposaldi contigui, misurato in andata e in ritorno, il valore della distanza percorsa in andata e in ritorno, il valore calcolato della differenza (scarto) tra i due dislivelli, il valore della tolleranza calcolata in base alla distanza media e il valore di dislivello medio. Dopo le varie giornate di misura sono state verificate le tolleranze di ogni tratta misurata ed eventualmente ripetute le tratte in cui lo scarto era maggiore della tolleranza stessa.

Il lavoro compiuto all'interno di un appalto è stato poi **collaudato** in campo mediante la ripetizione di una percentuale di livellazioni compresa tra il 5% e il 10% dell'intero lavoro commissionato. Il collaudo risulta soddisfatto quando la ripetizione delle varie tratte rientra in tolleranza con le misure fatte in origine dalla squadra. Tutti i collaudi relativi alle livellazioni dell'area in questione sono stati superati.

Si è passati quindi alla **verifica delle chiusure** sui percorsi ad anello delle linee. Si è provveduto ad assicurarsi che questo valore fosse inferiore ad una tolleranza. Abbiamo potuto notare che nell'anello 6 che racchiude le linee 174 + 174_D4 + 174_D7 il valore di chiusura di 4,1 mm è ampiamente minore rispetto alla tolleranza di 8,6 mm. O ancora, l'anello 7 che racchiude le linee 174 + 174_D3 mostra un valore assoluto di chiusura pari a 1,9 mm contro i 7,6 mm di tolleranza. Anche qui le verifiche possono considerarsi superate.

L'ultima fase ha riguardato la **compensazione delle misure** che ha permesso di valutare la precisione delle quote dei caposaldi. La modalità di compensazione scelta inizialmente è stata quella della compensazione libera (o intrinseca) nella quale è stato fissato un unico caposaldo baricentrico, situato nella piazza di Porto Tolle, al quale è stata assegnata una quota di valore arbitrario pari a 10 m. Analizzando il report della compensazione si nota che la precisione più

scarsa risulta di 4 mm, che su un totale di 175,1 km dell'intera rete, è un risultato più che soddisfacente. Quindi le misure effettuate possono essere considerate verificate.

BIBLIOGRAFIA

Servizio Geodetico e Direzione Lavori Ricerca e sviluppo - IGM, (2007): “*Specifiche tecniche per la progettazione, ricognizione, segnalizzazione e misura di linee di livellazione geometrica di alta precisione appartenenti alla rete altimetrica fondamentale.*” Documento di riferimento SPECIFICA_IGM_4.

A. Menin: “*Livellazioni altimetriche*”; dispense delle lezioni (2023).

V. Achilli: “*Strumenti topografici*”; dispense delle lezioni (2022).

V. Achilli: “*Geomatica per il monitoraggio ambientale*”; dispense delle lezioni (2022).

D. Marangon; tesi di laurea (2002): “*Metodologie geo-topografiche integrate per l’acquisizione e l’analisi di dati di deformazione. Progetto di ricerca “Rilevato sperimentale per il modello geotecnico del sottosuolo della laguna di Venezia”.*” Tesi di laurea svolta presso il DAUR, Università degli Studi di Padova.

SITOGRAFIA

Pubblicazioni contenute all’interno del sito ufficiale del Consorzio di Bonifica del Delta del Po: <https://www.bonificadeltadelpo.it/02-header-menu/attivita-consorziali/pubblicazioni/>

Tra cui:

- [Atlante lagunare costiero del Delta del Po](#), anno 2015;
- **1950-2010 – 60 anni di bonifica nel delta del Po anno 2011**
 - [Introduzione](#)
 - [Capitolo 1](#)
 - [Capitolo 2](#)
 - [Capitolo 3](#)
 - [Capitolo 4](#)
 - [Capitolo 5](#)
 - [Capitolo 6](#)
 - [Appendice](#)

Spiegazioni contenute all’interno del sito dell’IGM: i loro compiti ad oggi

<https://www.igmi.org/it/chi-siamo/chi-siamo-1/listituto-geografico-militare-oggi>

RINGRAZIAMENTI

Alla mia famiglia...

Ai miei cari nonni, fonti di saggezza e insegnamento, che mi hanno vista crescere dandomi tutto l'amore possibile... e a te caro nonno che avresti tanto voluto essere qui a gioire con me di questo traguardo, ci manchi tanto.

Ai miei genitori, che non hanno mai smesso di credere in me, che mi hanno dato la forza di continuare anche nei momenti difficili. A voi che, anche se con qualche sacrificio, mi avete dato l'opportunità di continuare gli studi e di formarmi in questo settore.

Al mio caro fratello, mia metà e amico più fidato, grazie per quello che sei. Sei sempre stato e sarai un ragazzo brillante e determinato, inseguì sempre i tuoi sogni e non arrenderti mai. Ti auguro il meglio nella vita.

Ai miei cugini e ai miei zii, per essere cresciuti insieme, per aver condiviso gioie e dolori. Grazie per tutti i bei momenti che abbiamo condiviso insieme e chissà che questo presente e prossimo futuro ci porti tanti altri bei ricordi da custodire nella nostra mente.

Alle mie care amiche B, G, K ed E (anche se sei dall'altra parte dell'Italia) grazie per le belle persone che siete, non so cosa farei senza di voi. Grazie per supportarmi, per sopportarmi (perché sì, ho un bel caratterino) e per il bel gruppo che si è creato in questi anni. Certi legami sono destinati a perdurare nel tempo.

Ai miei amici di sempre, grazie per volermi bene e per esserci sempre stati, auguro a tutti noi di continuare questa amicizia per sempre.

Agli amici conosciuti lungo questo cammino, grazie per tutti i bei momenti passati sotto i banchi e fuori dalle aule; a tutti quegli attimi di spensieratezza che non mi stancano mai. Grazie per le uscite in montagna, le grigliate, le feste e gli aperitivi post lezione. Quasi quasi mi mancherà fare lezione con voi!

A te R, grazie di stare al mio fianco e di avermi spronato a dare il meglio di me. Vedo in te una persona brillante e intraprendente, ti stimo per quello che sei. Che questo nostro cammino continui e che questo legame si fortifichi sempre più nel tempo.

Ai miei mentori, R e W, grazie per avermi insegnato il vostro lavoro con passione, costanza e impegno. Durante questi anni ho appreso tantissime nozioni che mi erano ancora sconosciute e sto scoprendo, con stupore, ogni giorno che passa quanto possa essere appassionante questo lavoro.

Al mio relatore, per avermi dato l'opportunità di partecipare a questa campagna di rilievi, è stato gratificante poter cooperare con dei professori universitari ad un progetto di tale importanza. Ho

potuto apprendere l'utilizzo di uno strumento che fino ad allora avevo studiato solo nei libri e soprattutto di quanta precisione e meticolosità ci voglia per svolgere questo genere di lavori.

Ed infine ringrazio me stessa, per l'impegno e la costanza che ho messo in questi anni per raggiungere questo obiettivo. Auguro alla Giada di domani di inseguire sempre i suoi sogni, come ha sempre fatto anche dinanzi alle difficoltà, e dare sempre il meglio di sé in ogni cosa.

Buona fortuna!



