



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

---

**Sviluppo e test di un sistema  
di acquisizione dati basato su Labview  
per comparatori Mitutoyo wireless**

**Development and test of a data  
acquisition system based on Labview  
for Mitutoyo wireless comparators**

Relatore:  
**Prof. Paolo Castellini**

Tesi di Laurea di:  
**Valerio Collina**

Tutor aziendale:  
**Arch. Virginio Angelini**

---

ANNO ACCADEMICO 2021/2022



Dedicata a tutti coloro che sanno di aver creduto in me e mi hanno supportato nei momenti di difficoltà. Un ringraziamento speciale va alla mia pazienza e alla mia testardaggine che mi hanno sempre accompagnato nel percorso evitandomi di perdere di vista l'obiettivo.

## Abstract

L'Italia è una delle nazioni più esposte ai rischi sismici in Europa, con molte regioni che si trovano in zone sismiche a elevato rischio. Per prevenire i danni causati dai terremoti, le autorità italiane hanno sviluppato normative e requisiti specifici per la progettazione e la costruzione delle strutture edili. Questi requisiti sono stabiliti dalle norme tecniche per le costruzioni (NTC) e mirano a garantire la sicurezza sismica delle strutture. Nelle norme sono contenute le modalità e le procedure per la verifica e la certificazione della sicurezza degli edifici e della loro conformità alle norme tecniche. A tal proposito, sono di rilevante importanza le prove di collaudo strutturale, che possono essere effettuate durante la fase di costruzione dell'edificio o in seguito a un intervento di ristrutturazione o manutenzione. Queste prove sono effettuate da professionisti qualificati e accreditati e possono comprendere ispezioni visive, prove di carico, simulazioni al computer, prove su modelli di laboratorio e monitoraggio strutturale. Durante il mio lavoro di tirocinio, ho potuto osservare le numerose tecniche e le apparecchiature attualmente utilizzate, e insieme al direttore di laboratorio, abbiamo deciso di sviluppare un sistema Labview che permettesse di sfruttare la tecnologia wireless con sensori Mitutoyo; In particolare l'obiettivo principale, è quello di dimostrare come Labview è un ambiente di sviluppo che può risultare particolarmente pratico e versatile per la gestione di tutti quei dispositivi utili per l'esecuzione di prove di laboratorio, o in sito. Il progetto ha lo scopo di realizzare un sistema di misura automatico basato su Labview per l'acquisizione delle misure registrate da 4 comparatori. Il bisogno nasce dalla necessità di mantenersi ad una dovuta distanza dagli strumenti di misura, i quali vengono posizionati in zone in cui persiste una componente di rischio; per questo e ovvi motivi i sensori wireless sono una realtà sempre più emergente. Il percorso di studio si è valso di una fase di documentazione del funzionamento della strumentazione, a cui è corrisposta una verifica pratica, ed una fase di realizzazione del software per il loro monitoraggio. Per questa implementazione sono stati utilizzati dei sensori wireless reperibili in commercio (comparatori Digimatic Mitutoyo) basati sul protocollo di comunicazione wireless IEEE 802.15.4

Il sistema è stato poi testato per indagare le prestazioni ottenibili: tempi di ciclo (tempo trascorso tra un'interrogazione e la successiva), perdita di pacchetti, latenze di allarme. Dai risultati ottenuti è emerso che la tecnologia scelta permette prestazioni interessanti.

---

## Indice degli argomenti

INTRODUZIONE	1
Capitolo 1 – Stato dell’arte	
1.1 Indagini strutturali e NTC.....	3
1.2 Strumenti e metodi d’utilizzo .....	6
1.2.1 Termografia .....	6
1.2.2 Endoscopia.....	11
1.2.3 Magnetometria .....	13
1.2.4 Prova sonica e ultrasonica .....	15
1.2.5 Martinetto piatto singolo e doppio .....	18
1.2.6 Sclerometria .....	20
1.2.7 Prove penetrometriche .....	21
1.2.8 Pull-out .....	22
Capitolo 2 – Prove di carico	
2.1 Introduzione e norme .....	25
2.1.1 Prova di carico su solaio .....	26
2.1.2 Prova di carico su pali .....	36
2.2 Comparatori Mitutoyo .....	41
Capitolo 3 – Sensori Wireless	
3.1 Introduzione alla Tecnologia Wireless.....	44
3.1.1 Banda ISM.....	46
3.1.2 Lo Standard IEEE 802.15.4 .....	47
3.1.3 Zigbee e IEE 802.15.4 .....	49

## Capitolo 4 - Labview

4.1 Introduzione a Labview .....	50
4.1.1 VISA VI e funzioni .....	59

## Capitolo 5 – Caso studio

5.1: Introduzione al progetto.....	61
5.1.1: Metodologia di sviluppo.....	62
5.1.2: Applicazioni nelle prove di cantiere .....	71
5.1.3: Fasi esecutive della prova .....	74

## Capitolo 6 – Discussioni

6.1: Considerazioni principali sulla sperimentazione .....	75
6.1.1: Considerazioni su eventuali limiti .....	76
6.1.2: Possibili miglioramenti .....	77

CONCLUSIONE .....	78
-------------------	----

BIBLIOGRAFIA .....	79
--------------------	----

---

## Indice delle figure

### Capitolo 1

Figura 1.1: Fonte Roberto Ricca INPROTEC .....	7
Figura 1.2: Termocamera .....	9
Figura 1.3: Immagine dalla termocamera di un solaio .....	10
Figura 1.4: Dispersione del calore in prossimità di una fessurazione .....	10
Figura 1.5: Video ispezione di una muratura con endoscopio .....	11
Figura 1.6: Particolare della bretella di sostegno ripresa con lo zoom .....	12
Figura 1.7: Endoscopia in una muratura a sacco .....	12
Figura 1.8: Schema di funzionamento di un magnetometro .....	13
Figura 1.9: Immagine del software di analisi.....	14
Figura 1.10: Strumento per la rilevazione del dato .....	14
Figura 1.11: Strumentazione avanzata per indagini soniche e ultrasoniche .....	15
Figura 1.12: Prova sonica su muratura .....	16
Figura 1.13: Immagine che descrive l'installazione di un martinetto piatto .....	18
Figura 1.14: LVDT .....	18
Figura 1.15: Grafico andamento sforzo-deformazione degli n sensori utilizzati.....	19
Figura 1.16: Sclerometro .....	20
Figura 1.17: Pistola di Windsor.....	21
Figura 1.18: Pull-out calcestruzzo .....	22
Figura 1.19: Prelievo di barra da un pilastro in calcestruzzo armato .....	24
Figura 1.20: Tratto di barra prelevato sostituito per mezzo della saldatura .....	24
Figura 1.21: Carotaggio di un elemento in calcestruzzo armato .....	24
Figura 1.22: Test calorimetrico della carbonatazione .....	24
Figura 1.23: Strain Gauge nelle prove di rilievo tensionale .....	24
Figura 1.24: Prove resistografiche tramite trapano strumentato .....	24

## Capitolo 2

Figura 2.1: Disegno schematico .....	26
Figura 2.2: Materasso d'acqua per generare il carico .....	29
Figura 2.3: Carico caratterizzato da pallet di laterizi .....	29
Figura 2.4: Passaggio dalla configurazione di progetto a quella sperimentale ....	30
Figura 2.5: Disposizione dei trasduttori in relazione alla striscia di carico .....	31
Figura 2.6: Calcolo dell'area sottesa per la determinazione di B .....	31
Figura 2.7: Esempio applicativo delle modalità di esecuzione .....	33
Figura 2.8: Carichi equivalenti.....	33
Figura 2.9: Prova a tiro .....	35
Figura 2.10: Prova a tiro su capriate in legno .....	35
Figura 2.11: Schema della prova di carico.....	39
Figura 2.12: Foto comparatori Mitutoyo Absolut .....	43

## Capitolo 3

Figura 3.1 : Suddivisione delle reti in base all'estensione geografica .....	45
Figura 3.2 : Frequenze dei diversi standard.....	46
Figura 3.3: Tipologie di rete .....	48

## Capitolo 4

Figura 4.1: Immagine esemplificativa che riporta le palette .....	52
Figura 4.2: Insieme di icona e Connector Pane della VI.....	53
Figura 4.3: Pattern disponibili per il collegamento della subVI .....	53
Figura 4.4: Esempio di ciclo for.....	55
Figura 4.5 : Esempio di utilizzo del ciclo while.....	56
Figura 4.6: Esempio di struttura Case .....	57
Figura 4.7: Esempio di macchina a stati.....	58



## Capitolo 5

Figura 5.1: Dispositivi Mitutoyo .....	61
Figura 5.2: Schema di montaggio dei dispositivi.....	64
Figura 5.3: Interfaccia programma installazione comunicazione .....	64
Figura 5.4: Immagine catturata nel Block Diagram .....	65
Figura 5.5: Snappet VI del Block Diagram .....	68
Figura 5.6: Block panel e front panel delle situazioni descritte.....	69
Figura 5.7: Prova di carico sul solaio realizzato in legno.....	70
Figura 5.8: Particolare del montaggio .....	70
Figura 5.9: Particolare del montaggio dei comparatori a 120° .....	71
Figura 5.10: Prova di carico su palo .....	71

**Indice delle tabelle**

## Capitolo 2

Tabella 2.1: Vengono riportati i valori dei carichi di esercizio ..... 28

Tabella 2.2: Vengono riportati i valori dei carichi di esercizio..... 28

## Capitolo 4

Tabella 4.1: Tabella fornita da NI Instrument ..... 59

## Capitolo 5

Tabella 5.1: Caratteristiche dell'U-wave R ..... 63

Tabella 5.2: Pacchetto di richiesta dati da PC a U-wave R ..... 66

## INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, i terremoti hanno avuto un forte impatto sul nostro Paese, registrando, oltre al tragico bilancio di perdite di vite umane, un elevato impatto socioeconomico principalmente causato dall'elevata densità abitativa e dalla notevole fragilità del nostro patrimonio edilizio. Negli ultimi 50 anni è stata infatti stimata una spesa annua di circa tre miliardi di euro per la gestione delle emergenze e per i processi di ricostruzione. Per troppo tempo si è preferito rinviare la discussione all'indomani di eventi calamitosi, credendo erroneamente di allontanare o meglio ancora esorcizzare tale rischio. Risulta perciò di fondamentale importanza il dibattito circa la necessità di intervenire sulla prevenzione e sulla tutela dei danni a seguito di eventi catastrofici.

A tal proposito, la valutazione della vulnerabilità degli edifici esistenti è un problema di particolare rilevanza per il territorio italiano, dove gran parte del patrimonio costruito non è stato realizzato con criteri antisismici. Lo studio di tale problematica è importante per la determinazione del livello di sicurezza di queste strutture a seguito di un evento sismico sia per poter effettuare degli studi di scenario, individuando gli edifici più a rischio sul territorio e pianificarne gli interventi utili al ripristino della sicurezza, sia per indirizzare i primi soccorsi post evento sismico verso le aree più vulnerabili. L'evoluzione scientifica che si è avuta negli ultimi 20 anni, e conseguentemente quella Normativa, ha sicuramente permesso di progettare strutture in grado di soddisfare gli stati limite richiesti, ma la gran parte delle costruzioni esistenti in Italia è vulnerabile perché ricade per la quasi totalità in un periodo temporale in cui la conoscenza delle strutture, dei materiali e delle azioni era molto limitata ed al contempo sorretta da basi Normative non sufficientemente adeguate sia dal punto di vista tecnico che istituzionale.

Per una verifica efficace dell'edificio è necessario impostare correttamente le prove diagnostiche in sito. A tal proposito le recenti NTC forniscono delle linee guida per il loro svolgimento, ma spetta al professionista scegliere l'approccio più consono in base alle esigenze del singolo edificio.

Dunque, la Labortec Ingest Srl è un'azienda fondata nel 1977 come Laboratorio Autorizzato dal Ministero dei Lavori Pubblici (ai sensi della Legge 5 Novembre 1971, N° 1086, relativa alle costruzioni in C.A., C.A.P. ed a

struttura metallica), la Società è un Istituto Sperimentale organizzato in Laboratori di Prova e Certificazione; Servizi di Ingegneria Strutturale su materiali e strutture. Essa opera nell'ambito delle costruzioni civili, grandi infrastrutture, edilizia, materiali da costruzione, produzione industriale, costruzioni esistenti, ossia edifici ed opere infrastrutturali strategiche e rilevanti, e dei beni culturali.

Il presente lavoro ha come obiettivo quello di dimostrare quanto la continua evoluzione dei mezzi a disposizione possa semplificare le metodologie per l'acquisizione dei dati necessari a redigere le dovute relazioni tecniche.

Entrando nel dettaglio, il presente elaborato parte dal Capitolo 1, nel quale vengono illustrate quelle che sono le varie indagini che possono essere eseguite nella fase di diagnosi delle strutture. In particolar modo, tra le prove maggiormente accreditate ( ai fini del collaudo delle strutture) vi sono le prove di carico, necessarie per verificare la corrispondenza tra il comportamento teorico e reale delle strutture. Il Capitolo 2 invece descrive le tipologie di sensori utilizzati nella prova di carico e le varie metodologie di utilizzo. Viene fatta una panoramica dei comparatori, e del loro utilizzo. Il Capitolo 3 costituisce il cuore della tesi poiché si va ad esplorare l'impatto dell'innovazione tecnologica sull'utilizzo dei sensori per le indagini diagnostiche delle strutture, e nel dettaglio, si va a lavorare sull'utilizzo della tecnologia wireless per la trasmissione dei dati in tempo reale. Il capitolo 4 illustra e descrive come questi sistemi wireless possano essere controllati e gestiti attraverso un ambiente di sviluppo come il Labview, che consente di creare interfaccia semplici da controllare per l'acquisizione, l'elaborazione e la visualizzazione dei dati. Nel capitolo 5 infine viene riportato un caso di studio nel quale sono stati utilizzati per realizzare le prove di carico, 4 comparatori Mitutoyo collegati in wireless ad un pc portatile sul quale viene creata attraverso il Labview un interfaccia capace di acquisire, elaborare e visualizzare i dati raccolti. Nel capitolo 6 vengono riportati i vantaggi e gli svantaggi che si hanno utilizzando la tecnologia wireless in combinata con il sistema di acquisizione Labview. Si discutono eventuali errori di misura che si possono avere con le metodologie tradizionali e con quelle in oggetto di studio.

## 1.1 Indagini strutturali e NTC

Le indagini strutturali sugli edifici sono studi che hanno lo scopo di determinare la salute e la sicurezza degli edifici, nonché di valutare la loro capacità di resistere alle sollecitazioni imposte da fattori esterni come il vento, la neve, il terremoto e altri carichi. Queste indagini sono effettuate per identificare eventuali problemi strutturali e per determinare la necessità di eventuali riparazioni o ristrutturazioni.

Possono essere effettuate utilizzando una combinazione di tecniche, tra cui ispezioni visive, test di laboratorio su campioni di materiali di costruzione, analisi computerizzate e test strutturali sull'edificio stesso. Inoltre, le indagini possono anche includere l'utilizzo di strumenti come termocamere, strumenti di misura della vibrazione e altri strumenti di misura avanzati.

Le prove diagnostiche necessarie per effettuare le dovute verifiche si basano sull'utilizzo di un'ampia gamma di strumentazioni e sensori, le cui tecnologie sono in continua evoluzione. L'innovazione tecnologica ha consentito e consente di mettere a punto tecniche di prova molto avanzate su materiali e strutture e tali da permettere la stesura di un quadro diagnostico del costruito preciso e dettagliato. Le tecniche utilizzate per le indagini sono numerose, è compito del tecnico, del direttore di laboratorio e del progettista, valutare quali siano i metodi più adatti per la specifica situazione, con l'obiettivo di arrivare ad ottenere i risultati attesi che consentono la costruzione di un quadro diagnostico il più attendibile possibile.

Ci sono diverse tipologie di prove strutturali che possono essere effettuate sugli edifici per valutare la loro integrità e stabilità. Ecco alcuni dei tipi più comuni di prove strutturali:

1. Ispezioni visive: queste prove consistono nell'osservare visivamente l'edificio alla ricerca di eventuali danni, deformazioni o segni di instabilità.
2. Prove di carico: queste prove consistono nell'applicare un carico controllato sulla struttura dell'edificio per valutare la sua risposta e identificare eventuali debolezze o difetti strutturali.
3. Analisi di elementi finiti: queste prove utilizzano tecniche di analisi al computer per simulare la risposta dell'edificio a diverse situazioni, tra cui i terremoti.

4. Prove su modelli di laboratorio: queste prove consistono nella costruzione di un modello in scala dell'edificio e nella sottoposizione di questo modello a prove di carico per identificare eventuali debolezze o difetti strutturali.
5. Monitoraggio strutturale: queste prove consistono nell'utilizzare sensori e strumenti di misura come comparatori per raccogliere dati in tempo reale sulle prestazioni strutturali dell'edificio durante un evento sismico o un'altra situazione di carico.

In sintesi, ci sono diverse tipologie di prove strutturali che possono essere effettuate sugli edifici per valutare la loro integrità e stabilità, e la scelta della tipologia più adeguata dipende dalle specifiche esigenze dell'edificio e della situazione. I risultati della campagna diagnostica vengono rielaborati in modo tale da fornire tutte le informazioni richieste dalla committenza in modo chiaro e di facile comprensione, poiché devono essere compresi sia dai progettisti (architetto, ingegnere, geometra) che da personale non specializzato (carpentieri, titolare impresa, committenti, etc.). Al termine del lavoro si fornisce al cliente una relazione tecnica corredata dal rilievo fotografico che esemplifica il processo di analisi adottato e dai risultati restituiti in forma grafica o tabulare.

Per una verifica efficace dell'edificio è necessario impostare correttamente le prove diagnostiche in situ. A tal proposito le NTC forniscono delle linee guida per il loro svolgimento, ma spetta al professionista scegliere l'approccio più consono in base alle esigenze del singolo edificio. La Labortec Ingest SRL è stata particolarmente attiva a seguito del Terremoto che ha interessato le Marche nel 2016, eseguendo un'ampia campagna di valutazione dello stato di salute delle strutture pubbliche e private ( ponti, strade, aziende, edifici privati, ecc.. ).

I criteri da seguire per l'esecuzione di verifiche sismiche prevedono:

- a. Analisi storico critica, rilievo geometrico-strutturale e caratterizzazione dei materiali. Questi sono i tre step fondamentali per avviare un modello di comportamento dell'edificio in caso di sisma. Il loro livello di approfondimento dipende dalla documentazione disponibile, dalla qualità ed estensione delle indagini svolte e dagli obiettivi finali che il progettista si è prefissato.
- b. Verifiche sostenibili. Nel capitolo 2 delle NTC 2018, vengono date le indicazioni da seguire per l'esecuzione delle verifiche sismiche: ottimizzare le risorse economiche ed evitare interventi inutili, non efficaci od onerosi. È opportuno, pertanto, scegliere

indagini accessibili e sostenibili, che riducano al minimo le prove invasive e dirette, per lasciare spazio ad analisi meno invasive ed indirette, laddove possibile.

c. Approccio graduale. Per eseguire verifiche sostenibili è opportuno avvalersi di un approccio graduale, che presti attenzione all'impatto che le analisi hanno sull'edificio, poiché devono preservarne il più possibile l'integrità. Per questo è necessario eseguire prove preliminari e poi stilare il piano di indagini effettivo.

d. Verifiche statiche. Oltre alle azioni sismiche, le NTC 2018, introducono anche l'esecuzione delle verifiche statiche, quando si analizza il comportamento dell'edificio in caso di evento sismico.

e. Verifica degli elementi non strutturali. Sempre le NTC 2018 introducono la verifica degli elementi non strutturali dell'edificio, in quanto anch'essi sono ugualmente significativi ai fini della sicurezza e dell'incolumità delle persone.

f. Relazione finale dettagliata. Sebbene non sia definito dalle NTC, la stesura di una relazione finale dettagliata e completa è lo strumento di lavoro fondamentale per modellatori e progettisti. Il documento, con grafici, planimetrie e schede riassuntive, è alla base per la costruzione del modello e per la progettazione della manutenzione.

L'esecuzione delle verifiche sismiche non è un compito semplice e lineare: dalla fase delle prove alla modellazione dell'edificio, questo processo richiede differenti e numerose attività e coinvolge diverse professionalità, che devono continuamente collaborare e confrontarsi tra loro.

L'obiettivo finale è quello di eseguire la verifica di vulnerabilità sismica e statica che esegue la diagnosi dell'edificio, calcolare gli indici di sicurezza sismica e statica ed indicare le vulnerabilità locali del fabbricato, rilevando tutte le situazioni su cui è necessario agire per garantire la sicurezza. Inoltre, si arrivano a fornire le indicazioni per poter pianificare una manutenzione sismica adeguata. Infine, elabora la classificazione sismica dell'edificio e definisce in quale, tra le 7 classi di rischio, rientra il fabbricato.

Nella verifica sismica, quindi, particolare importanza ha la scelta dei punti di prova, delle analisi da effettuare ed il loro numero: è opportuno, quindi, individuare i punti che risultano caratterizzanti per eseguire una riproduzione il più fedele possibile alla realtà, così da vedere l'effettivo comportamento della struttura.

## 1.2 Strumenti e Metodi d'utilizzo

Le prove suddette possono essere suddivise con maggior precisione in:

- **Prove non invasive:** essenzialmente la termografia
- **Prove leggermente invasive:** prove ultrasoniche e soniche che richiedono l'asportazione dell'intonaco solo nei punti in cui la prova viene effettuata o l'endoscopia che richiede che sia praticato un foro di piccolo diametro (da 10 a 20 mm) per consentire il rilievo in murature, solai ecc...
- **Prove invasive:** come i martinetti piatti, singoli e doppi nelle murature, il pull-out nelle strutture in calcestruzzo

E' importante, quindi, prima di effettuare una campagna di prove ed indagini in sito, stilare un programma di lavoro che preveda quali tecniche adottare e quali risultati si vogliono ottenere. E' opportuno ricordare che molte di queste tecniche possono essere usate in maniera incrociata consentendo così di raggiungere un notevole livello di approfondimento. In questo caso la scelta dei parametri da sottoporre a controllo può essere opportunamente guidata dalle indagini effettuate in precedenza.

### 1.2.1 Termografia

#### **Strumento: Termocamera**

Una telecamera termica (o termocamera ad infrarossi) è un dispositivo senza contatto che rileva l'energia all'infrarosso (calore) emessa da un oggetto e la converte in un segnale elettronico che viene successivamente elaborato per produrre una mappa di calore su un display. Il calore rilevato da una telecamera termica può essere quantificato in modo estremamente preciso, permettendo non solo di monitorare l'andamento termico ma anche di identificare e valutare la gravità relativa ai problemi legati al calore. Ogni oggetto



emette una radiazione infrarossa, che passando attraverso le lenti termiche della telecamera viene processato e restituito dal rivelatore come immagine termica.

Proprio come i nostri occhi, la termocamera è sensibile alle onde elettromagnetiche, la differenza sta nella lunghezza d'onda che riesce a percepire l'occhio umano rispetto ad una termocamera ad infrarossi.

Infatti, l'occhio umano percepisce la lunghezza d'onda del visibile, comprese tra 0,4 e 0,7 mentre una termocamera, è sensibile alla radiazione termica, che oscilla da 0,75 a 14  $\mu\text{m}$ . L'energia termica od infrarossa è la parte non visibile dello spettro luminoso poiché la sua lunghezza d'onda è tale che non può essere vista dall'occhio umano, infatti essa è la parte dello spettro elettromagnetico che noi percepiamo come calore.

Diversamente dalla luce visibile, nel mondo dell'infrarosso, ogni oggetto con una temperatura al disopra dello zero assoluto emette IR. Anche oggetti molto freddi come un cubetto di ghiaccio emettono energia infrarossa.

Naturalmente, più è alta la temperatura di un oggetto e maggiore la radiazione IR emessa. Il termografo ci permette dunque di vedere quello che i nostri occhi non possono vedere, infatti esso riproduce immagini dell'IR invisibile ovvero della radiazione termica consentendo precise misure di temperatura senza contatto.

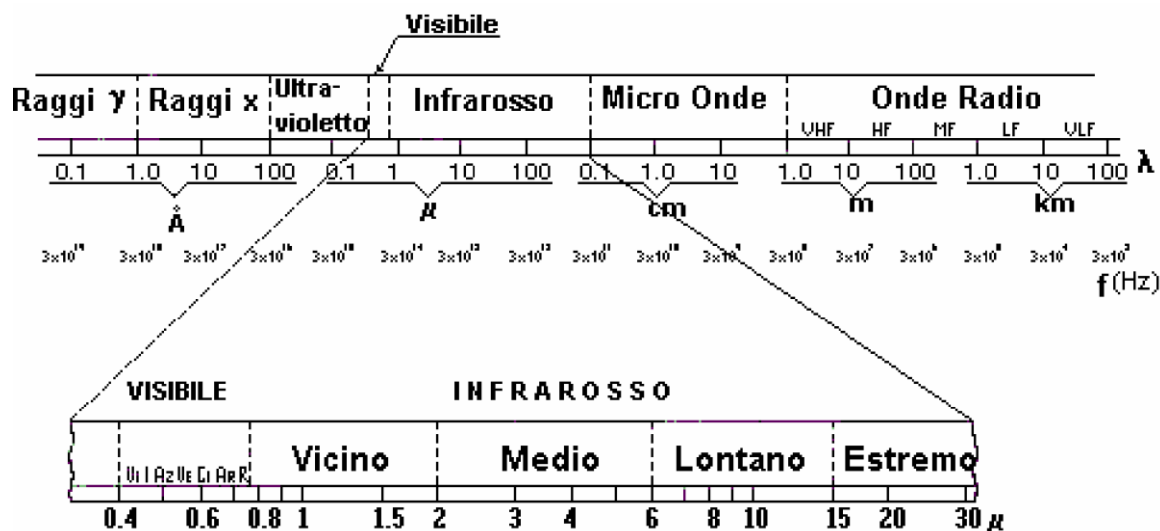


Figura 1.1 : Fonte Roberto Ricca

**Metodo d'utilizzo**

La termografia è una delle tecniche non distruttive più utilizzate per la diagnostica delle patologie edilizie. Gli edifici, anche se costruiti correttamente, sono soggetti a degrado a causa dell'invecchiamento dei materiali e della mancanza di manutenzione. A volte la termografia viene utilizzata insieme ad altre tecniche distruttive, come il prelievo di campioni per test, o come metodo unico di indagine. La termografia consente di effettuare indagini negli edifici senza interrompere le attività normali e di evitare ulteriori danni alle strutture già danneggiate, riducendo il numero di test distruttivi.

La tecnica termografica si dimostra assai utile e flessibile nella diagnostica consentendo di rilevare:

- *tamponamenti di aperture nelle murature sotto intonaco*
- *differenti materiali componenti una muratura e ricoperti da uno strato di intonaco come corsi di malta e mattoni, ciottoli, inserimento di architravi e colonne in pietra, inserti in legno, ferro;*
- *orditure di elementi strutturali di sostegno in solai piani;*
- *centinature di coperture voltate;(false volte)*
- *canalizzazione di impianti idrico sanitari e termici in funzione;*
- *la distribuzione dell'umidità nelle murature(mappe termoigrometriche)*
- *la presenza di ponti termici;*
- *dispersioni termiche dovute ad insufficiente coibentazione;*
- *verifica dell'isolamento;*
- *degrado causato da umidità;*
- *ricerca di infiltrazioni idriche.*

Può essere effettuata sia in condizioni attive che passive. Nelle condizioni attive, l'elemento viene riscaldato per aumentare la risposta termografica e analizzare i flussi di calore. Nelle condizioni passive, l'analisi viene effettuata sulla superficie così come si presenta, spesso utilizzando il sole diretto e analizzando il transitorio termico durante l'indagine. Questo è comune nelle indagini su elementi esterni di edifici come terrazze e pareti.

Il livello dei risultati ottenibili oltre a dipendere dalle capacità ed esperienza dell'operatore e dalle caratteristiche tecniche dell'apparecchiatura utilizzata, dipende in

gran parte dall'influenza delle caratteristiche fisico – ambientali al contorno che possono alterare i flussi di radiazione termica che giungono all'apparecchiatura.

Naturalmente la copertura dell'oggetto dell'indagine, con materiali riflettenti quali marmi, vetri e ceramiche o materiali isolanti quali legno e stoffa, renderà impossibile l'utilizzo di questa tecnica.

Altri fattori che possono alterare o vanificare l'indagine (nel caso debba essere condotta all'aperto, caso tipico il rilievo di facciate) sono quelli atmosferici: vento, pioggia e soleggiamento diretto, nonché la vicinanza alle superfici indagate di corpi estranei ad alta temperatura. Le limitazioni all'uso della termografia invece sono legate all'alto costo dell'apparecchiatura, alla necessità di un operatore qualificato e ad alcuni impedimenti di tipo tecnico: la difficoltà di ottenere dati precisi e veritieri per materiali con bassa emissività, la necessità in alcuni casi di schermare la termocamera dalle emissioni ambientali e l'influenza delle condizioni climatiche nel caso di utilizzo in ambito edile architettonico.



Figura 1.2 : Termocamera

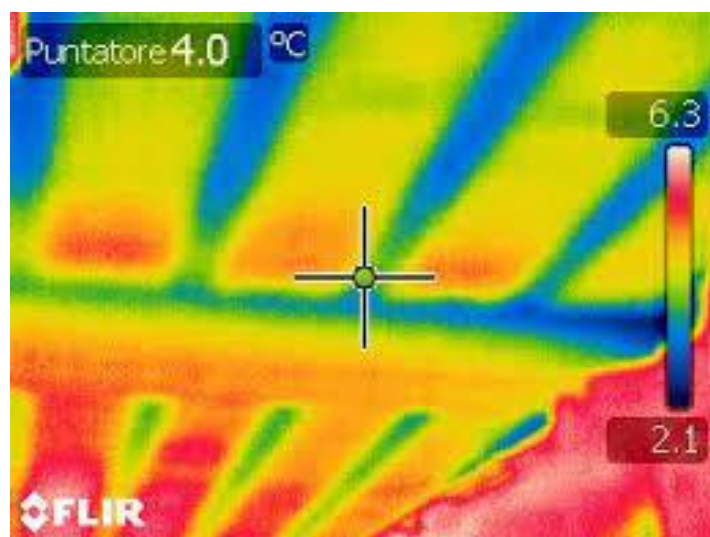


Figura 1.3: Immagine dalla termocamera di un solaio a travetti precompressi e pignatte

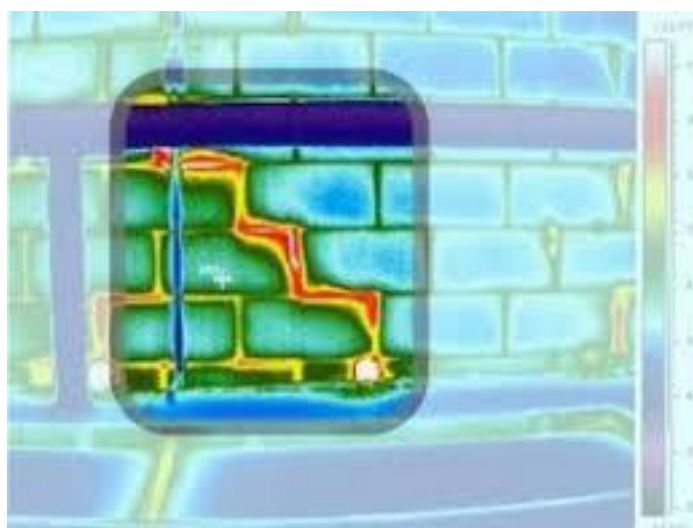


Figura 1.4: Dispersione del calore in prossimità di una fessurazione della muratura

### 1.2.2 Endoscopia

#### Strumento: Endoscopio

Un endoscopio è uno strumento ottico utilizzato solitamente per eseguire un'endoscopia. È costituito da un tubo rigido o flessibile e serve per osservare cavità non visibili normalmente. Questi strumenti sono tutti caratterizzati da un diametro molto piccolo (dai 6 ai 14 mm) dell'apparato di ispezione, di quella parte cioè che viene introdotta nei fori e nelle fessure. L'apparecchiatura è composta da una micro telecamera, dal videoprocessore e dal monitor.

La sonda comprende due parti: un fascio di fibre ottiche per l'illuminazione e un sensore CCD che raccoglie i segnali luminosi e li trasmette via cavo al videoprocessore che li elabora in immagini che vengono ricostruite su video. Queste immagini possono essere registrate su CD ed eventualmente elaborate elettronicamente con funzioni: zoom, fermo immagine, contrasto, comparazione simultanea di due immagini, trasmissione dati via modem. La lunghezza massima della sonda, per diametri attorno ai 10 mm, è di circa 8 m. Come nell'endoscopio flessibile è possibile comandare dall'esterno la parte terminale della sonda



Figura 1.5: Video ispezione di una muratura con endoscopio

### Metodo d'utilizzo

L'endoscopio è uno strumento molto importante perché serve a facilitare la possibilità di compiere un'ispezione visiva di tutte le aree interne di un apparecchio. Si tratta quindi di uno strumento essenziale per controllare tutte quelle zone che sono chiuse alla vista, che possono avere profondità differenti e lunghezze variabili. Sono dei prodotti davvero ideali per vedere all'interno di aree difficili e per ottenere delle immagini ad alta risoluzione e quindi completamente nitide.

Gli endoscopi sono utilizzati per l'esame in sito di cavità sia naturali che artificiali allo scopo di osservare direttamente in punti inaccessibili : la morfologia, tipologia e stato di conservazione dei materiali; le strutture portanti e portate dei solai piani e tutte quelle strutture e materiali che possono essere convenientemente indagati attraverso fori di piccolo diametro.

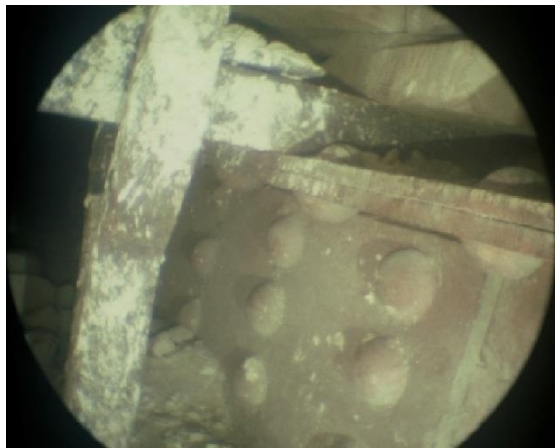


Figura 1.6: Particolare della bretella di sostegno ripresa con lo zoom

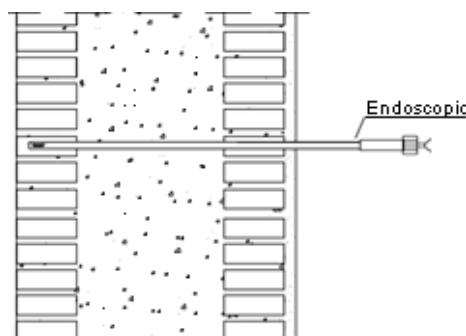


Figura 1.7: Endoscopia in una muratura a sacco

### 1.2.3 Magnetometria

#### Strumento : Pacometro (elettromagnetometro)

Il pacometro è uno strumento digitale che permette di rilevare in maniera non distruttiva la presenza, la direzione e il diametro delle barre di armatura all'interno di elementi in calcestruzzo armato e permette inoltre la misura dello spessore del copriferro e l'interferro dei tondini di acciaio.

Il pacometro rientra nei cosiddetti metodi magnetici, in quanto sfrutta le proprietà magnetiche del ferro per la localizzazione delle armature. Il suo funzionamento si basa sul principio dell'induzione elettromagnetica.

Lo strumento consiste in una sonda emettitrice di campo magnetico collegata ad una unità di elaborazione digitale ed acustica. La sonda è fatta scorrere lungo la superficie della membratura in calcestruzzo armato e dall'assorbimento del campo magnetico si è in grado di determinare la posizione delle armature, lo spessore del copriferro e, con buona approssimazione, il diametro dei ferri.

Lo strumento è costituito da: un'unità di emissione e lettura del campo elettromagnetico, e una o più sonde emittenti-riceventi il campo magnetico.

Lo strumento consiste in una sonda e in una centralina di misurazione. Ci sono due tipi di strumenti il primo lavora sulla misurazione del campo magnetico prodotto dalle correnti di Faraday, correnti indotte dalla sonda sull'elemento metallico(conduttore) che si sta rilevando: ad esempio i ferri di un'armatura nel calcestruzzo. Il secondo lavora sulle Eddy current ( correnti parassite) indotte dalla sonda. E' importante ricordare che lo strumento rileva tutti gli elementi metallici elettroconduttori.

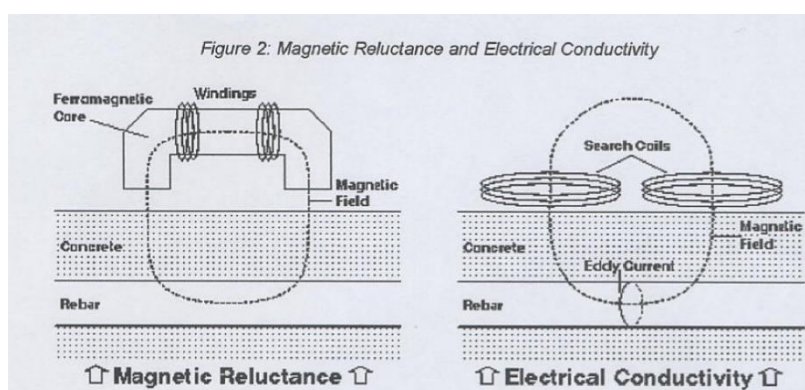


Figura 1.8: Schema di funzionamento di un magnetometro

### Metodo d'utilizzo

La norma Bs 1881:204 regola la prova pacometrica, che consiste nella misurazione del campo magnetico generato dalla presenza di materiali ferrosi nelle vicinanze della superficie del calcestruzzo oggetto di indagine.

Attraverso tali misurazioni si possono rilevare, come se proiettate sul piano costituito dalla superficie del calcestruzzo:

- la posizione (tale da consentire la stima dell'interferro e del copriferro) la direzione, il numero e il diametro delle armature, poste su piani paralleli a quello di indagine;
- il passo delle staffe;
- rilevare la presenza di altri oggetti metallici quali tubazioni, cavi elettrici, tiranti.

Nel caso si debba determinare il copriferro prima dell'esecuzione della prova va eliminato l'intonaco.

Grazie alle prove pacometriche si possono individuare anche le zone di conglomerato non attraversate da armature al fine dell'effettuazione di ulteriori prove distruttive, quali le prove di compressione su carote di calcestruzzo (serve ad individuare la zona dove prelevare la carota), e non, quali le prove sclerometriche e/o ultrasoniche (sonreb), prova pull out, prova con sonda Windsor che sono tutte influenzate dalla presenza di armature. Purtroppo a tutt'oggi l'uso del magnetometro nel calcestruzzo armato è utile solo per il rilievo della posizione dei ferri di armatura e dello spessore del copriferro. Mentre, generalmente è molto difficile determinare il diametro dei ferri specie se l'interesse è molto piccolo.

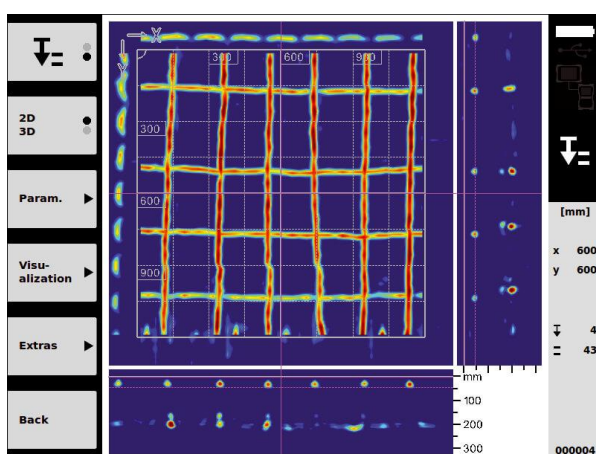


Figura 1.9 : Immagine dal software di analisi dei dati rilevati con lo strumento



Figura 1.10 : Strumento per la rilevazione del dato



### 1.2.4 Prova sonica e ultrasonica

#### Strumento: Centralina con martello strumentato

L'apparecchiatura consiste:

- in un *martello strumentato* (con un interruttore dinamico )per la sollecitazione della muratura con onde elastiche
- in un *accelerometro* per la ricezione degli impulsi meccanici che attraversano la muratura .
- centralina elettronica che comanda l'emissione di impulsi di una sonda emittente e registra i tempi di ricezione degli stessi alla sonda ricevente; viene monitorato il tempo di attraversamento del mezzo da parte dell'onda elastica (tempo di volo) da cui, come si è detto, si ricaverà la relativa velocità di propagazione.



Figura 1.11 : Strumentazione avanzata per indagini soniche e ultrasoniche

Le principali caratteristiche degli strumenti moderni sono:

- T.O.F.: lo strumento fornisce in automatico il tempo di volo (Time of Fly);
- Regolazione della potenza del segnale in dB;
- Calcolo della Velocità o Spessore dell'elemento indagato;
- PRF: regolazione della frequenza dell'impulso del trasmettitore da 1 a 10Hz o in automatico;
- Funzione istantanea e RMS: viene congelato l'oscillogramma precedente e visualizzato sopra il successivo;
- Cross-Hole: analisi di pali di fondazione a 2 canali con encoder motorizzato (opzionale).

### Metodi d'utilizzo

Le indagini soniche ed ultrasoniche, prove di tipo non distruttivo, consistono nella misura del tempo di transito tra due punti, di una muratura o di un elemento strutturale, di un'onda d'urto generata da un impulso meccanico. La velocità delle onde, nelle murature o strutture, è in relazione con la qualità del materiale che le compongono, essendo più elevata in murature o strutture con caratteristiche meccaniche migliori e viceversa o la presenza di soluzioni di continuità al loro interno.

Le indagini possono essere effettuate sia in modalità di “trasparenza diretta” e quindi ponendo la sonda ricevente l'impulso meccanico sul lato opposto della struttura indagata rispetto al punto di sorgente dell'impulso, sia in modalità di “superficie”, e cioè con trasmettitore e ricevitore sullo stesso lato della struttura o superficie muraria o in “semitransparenza”, nel caso in cui trasmettitore e ricevitore sia posti su superfici in contatto ortogonale fra loro.



Figura 1.12 : Prova sonica su muratura su cui è stato rimosso lo strato di intonaco

La prova sonica serve a verificare la coesione generale di una muratura in mattoni o materiale misto. Consiste nel misurare il tempo che un'onda elastica a bassa frequenza (generata da un impulso meccanico) impiega per attraversare il materiale, da un punto di battuta a un punto di ricezione. L'impulso viene generato con un martello dotato di un interruttore dinamico e ricevuto da un accelerometro adeguato. I punti di battuta e ricezione sono suddivisi su un reticolo tracciato sulla muratura per avere dati statisticamente significativi. Il risultato è la registrazione dei tempi di volo, che vengono convertiti in velocità basati sulla distanza tra i punti di battuta e ricezione. Poiché la velocità di trasmissione di un'onda elastica dipende dalla densità del materiale, questa misura indica il grado di aggregazione complessivo della muratura e fornisce una valutazione affidabile della zona in esame.

In questo caso, però, sono diverse le frequenze che vengono utilizzate: infatti gli impulsi ultrasonori non sono udibili ed hanno frequenze superiori a 20000 Hz. Queste frequenze più alte vengono utilizzate su materiali complessivamente più omogenei quali ad esempio materiali lapidei e legno e naturalmente calcestruzzo; al loro interno infatti, gli impulsi di frequenza così alti non vengono fortemente attenuati come si verificherebbe su di una muratura, e consentono una migliore risoluzione spaziale delle difettosità del materiale.

La prova sonica misura la velocità di propagazione delle onde ultrasoniche attraverso l'oggetto in esame. Questa velocità è influenzata dal modulo di elasticità normale e dal coefficiente di Poisson, cioè dalle proprietà di compressione e taglio del materiale. La velocità di propagazione viene correlata alle caratteristiche del materiale quali densità, omogeneità, presenza di vuoti e microfessurazioni.

L'utilizzo di onde ultrasoniche a elevata frequenza aumenta la precisione dell'indagine su materiali omogenei, ma ne limita l'utilizzo in presenza di discontinuità significative, come quelle tra malta e mattone.

Questo metodo specialmente se abbinato a prove sclerometriche (SON-REB) consente una valutazione con buona approssimazione della resistenza del calcestruzzo oltre al valore del modulo elastico dello stesso. Le prove soniche possono essere utilizzate anche su pali di fondazione (viene definita prova ecometrica) per valutarne l'integrità e determinare la presenza di riflessioni anomale dovute a variazioni di geometria, inclusioni terrose o parti di calcestruzzo di qualità scadente (riflessioni secondarie che si aggiungono al segnale di ritorno).

### 1.2.5 Martinetto piatto singolo e doppio

#### Strumento : Martinetto in pressione con pompa idraulica e sensori di spostamento

L'attrezzatura è costituita da:

- Martinetti piatti: è una specie di cuscino in metallo con buone caratteristiche di elasticità e di dimensioni variabili (solitamente 40 x 25 x 0.8 cm) che si può gonfiare immettendo olio per mezzo di un'apposita pompa ad esso collegata.
- Riscontri metallici da incollare al muro (servono di riferimento al sensore di spostamento che viene utilizzato per effettuare le misure di deformazione della muratura all'intorno della tasca contenete il martinetto)
- Sensore che misura lo spostamento da cui si può ricavare la deformazione
- Pompa idraulica munita di manometro per la messa in pressione controllata del martinetto

Figura 1.13 : Immagine che descrive la sequenza di azioni per l'installazione di un martinetto piatto

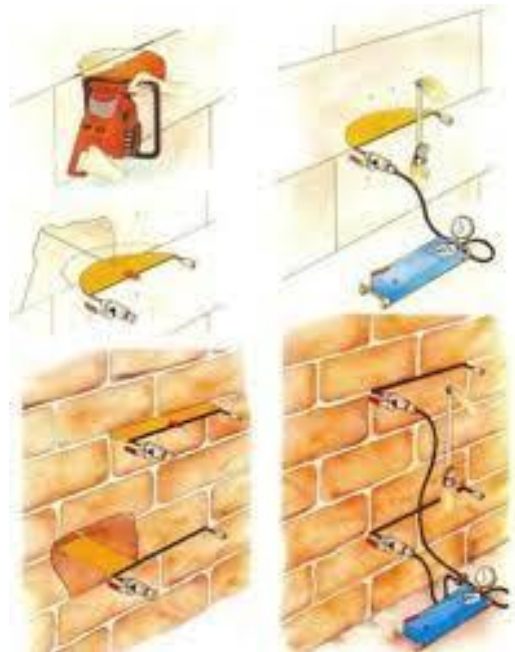


Figura 1.14 : Lvdt

## Metodo d'utilizzo

La prova con martinetto piatto singolo permette di stimare lo stato di tensione locale presente nelle strutture murarie. La tecnica di prova si basa sulla variazione dello stato tensionale in un punto della struttura provocato da un taglio piano eseguito in direzione normale alla superficie della muratura. Il rilascio delle tensioni che si manifesta provoca una parziale chiusura del taglio, che viene rilevata tramite misure di distanza relativa fra coppie di punti posti in posizione simmetrica rispetto al taglio stesso.

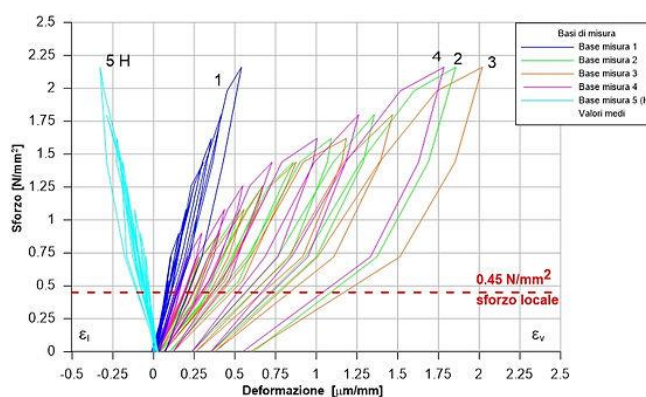
Mentre, la prova con martinetto piatto doppio consente di determinare le caratteristiche di deformabilità della muratura, nonché di fornire una indicazione sul valore di resistenza della stessa. La prova consiste nell'effettuare due tagli, paralleli ad una distanza di circa cinquanta centimetri (la zona deve essere disintonacata). I due martinetti opportunamente messi in pressione applicano al campione uno stato di sollecitazione monoassiale. Le deformazioni nella porzione muraria vengono misurate da sensori di spostamento, al fine di determinare il diagramma tensione deformazione della muratura indagata.

La prova prevede di eseguire le "letture di zero prima del taglio", a questo punto si pratica il taglio liberando una porzione del corso di malta. Ciò provoca una discesa del lembo superiore della tasca. Si effettuano ora le "letture di zero dopo il taglio".

Si procede al pompaggio dell'olio nel martinetto salendo, lentamente in pressione, ed effettuando alcune soste per consentire ogni volta la lettura col lo strumento della distanza tra i riscontri.

La prova termina quando è ripristinata la condizione di partenza (cioè si raggiungono le le distanze tra i riscontri lette con lo strumento prima di eseguire il taglio) cioè le misure coincidono con quelle di zero.

Figura 1.15: Grafico che rappresenta l'andamento sforzo – deformazione degli n sensori utilizzati



### 1.2.6 Sclerometria

#### Strumento : Sclerometro

Lo sclerometro è uno strumento che dà la valutazione della resistenza (superficiale) locale di elementi strutturali in calcestruzzo. Tale stima si basa sul principio che il rimbalzo della massa metallica che percuote la superficie è funzione della durezza della superficie stessa. Sono prove non distruttive che sono influenzate da vari fattori come: umidità del materiale, snellezza dell'elemento, carbonatazione del calcestruzzo, presenza di armature o di inerti grossolani, zone con difetti superficiali come nidi di ghiaia, porosità eccessiva.

Figura 1.16 : Sclerometro



E' una prova veloce ed economica che si basa sull'interpolazione dei dati con curve sperimentali costruite su una casistica molto ampia. I risultati sono condizionati dallo stato del calcestruzzo superficiale. Ad esempio una forte carbonatazione che rende la superficie più dura, come la presenza nei pressi della superficie di inerti di grosse dimensioni. In genere per avere una migliore valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo la prova sclerometrica è integrata con una prova ultrasonica :In questo caso le curve di riferimento sono quelle sviluppate dal British Standard con la sigla SON-REB. Il metodo d'indagine combinato o SonReb è una tecnica indiretta che consente di dare una stima della resistenza di un calcestruzzo indurito, correlando la velocità ultrasonica e l'indice sclerometrico di rimbalzo. Il *SonReb* consente di superare gli errori che si ottengono utilizzando separatamente il metodo sclerometrico, che è un metodo di indagine superficiale, e il metodo ultrasonico, che invece è un metodo di indagine volumetrico.

### 1.2.7 Prove penetrometriche

#### Strumento : Pistola di Windsor

La sonda di Windsor è un metodo penetrometrico e consiste nella penetrazione di una sonda sparata nel materiale oggetto dell'indagine da una pistola a mezzo di una carica calibrata. L'equipaggiamento tipo richiesto da questa metodica consiste di una pistola, di cartucce calibrate, di sonde di metallo temprato e geometria nota, sonde di Windsor, di un calibro e di altri attrezzi secondari connessi con le operazioni di prova.

#### Metodo d'utilizzo

Nel calcestruzzo in opera la prova viene eseguita con tre sonde, sparate ai vertici di una speciale dima, munita di tre fori posti agli spigoli di un triangolo equilatero, di lato 177 mm, la media dei tre valori sarà il valore unico, caratteristico di quella posizione. Le letture effettuate vengono correlate con la resistenza a compressione del calcestruzzo tramite tabelle, previa determinazione della durezza dell'inerte nella scala di Mohs.



Figura 1.17 :Pistola di Windsor

### 1.2.8 Pull – out

#### Strumento : Kit attrezzature

Il kit comprende :

- disco e stelo (di dimensioni normalizzate) per calcestruzzo fresco;
- tassello con testa espandente (di dimensioni normalizzate) per calcestruzzo indurito;
- sistema di carico costituito da un martinetto idraulico con all'estremità a contatto con il calcestruzzo un anello di contrasto (di dimensioni normalizzate);
- unità di pressurizzazione con manometro di precisioni indicante il valore massimo di pressione raggiunto durante la prova.



Figura 1.18 : Pull-out calcestruzzo

#### Metodo d'utilizzo

L'indagine pull-out è una prova semi-distruttiva (arrecava un danno limitato all'elemento di calcestruzzo: diametro 55 mm, profondità 25mm) per la determinazione della forza di estrazione di un inserto metallico pre-inglobato o post inserito nell'elemento in calcestruzzo da sottoporre a prova. La prova si basa sulla corrispondenza esistente tra il carico unitario di rottura a compressione del calcestruzzo e la forza necessaria ad estrarre un inserto metallico standardizzato pre-inglobato nel calcestruzzo fresco o post inserito nel calcestruzzo indurito. Utilizzando la curva interpretativa si effettua una stima della resistenza a compressione del calcestruzzo. Tutti e tre le prove: *sclerometro*, *pistola di Windsor* e *Pull-Out* hanno il limite di rilevare valori riferiti alla superficie dell'elemento provato (la profondità raggiungibile dalle sonde Windsor e dal tassello del Pull-Out è di qualche centimetro).



Oltre alle prove citate, ne esistono tante altre che mi limiterò a citare, poiché, non sono riuscito a vedere presso l'azienda Labortec per mancanza di richiesta di tali prove nel periodo di tirocinio svolto.

Tra le altre prove che riguardano il calcestruzzo armato normale o precompresso ci sono:

- Prelievo in opera di calcestruzzo armato sul quale vengono eseguite prove di compressione in laboratorio;
- Prelievo in opera di provini di acciaio dei vari diametri sui quali verranno eseguite delle prove di trazione attraverso macchine strumentate ( es. Cermac ) ;
- Prelievo di spezzone di ferro d'armatura o porzione di profilo metallico;
- Analisi chimiche ( es. carbonatazione ) ;
- Analisi elettrochimiche per la misura del potenziale e della velocità di corrosione;
- Cross – Hole ( prova per controllare la qualità delle strutture di sottofondazione)
- Prove vibrazionali per strutture di sottofondazione ( mi permette di determinare la lunghezza del palo, variazioni di sezione, difetti localizzati, incastro alla base.

Tra le altre prove che riguardano strutture in muratura abbiamo:

- Prove di scorrimento ( prova necessaria per determinare la tensione di scorrimento nelle murature);
- Rilievi tensionali ( prove eseguite utilizzando gli strain gauge)

Esistono delle indagini che riguardano anche le strutture lignee:

- classificazione a vista e secondo resistenza;
- misura dell'umidità del legno;
- stima del modulo di elasticità mediante penetrazione, prova di estrazione ed ultrasuoni;
- rilievo della sezione resistente mediante endoscopia;
- micro-carotaggi;
- indagine tramite trapano strumentato;
- prova di durezza;

Tra le varie prove ce ne sono due che nello specifico hanno attirato la mia attenzione, e sono quelle con le quali sono andato a condurre un lavoro di sperimentazione, per questo motivo vengono trattate più nello specifico nel capitolo 2.



Figura 1.19 : Prelievo di barra da un pilastro in calcestruzzo armato  
 Figura 1.20 : Tratto di barra prelevato sostituito per mezzo saldatura



Figura 1.21: Carotaggio di un elemento in calcestruzzo armato  
 Figura 1.22 : Test colorimetrico della carbonatazione



Figura 1.23 : Strain Gauge nelle prove di rilievo tensionale  
 Figura 1.24 : Prove resistografiche tramite trapano strumentato

## 2.1 Introduzione e norme

Le prove di carico sono prove che vengono effettuate su elementi strutturali con lo scopo di verificarne sperimentalmente il loro comportamento sotto le azioni di esercizio: possono essere prove di collaudo, da effettuare prima di mettere in esercizio le strutture, al fine di verificarne la rispondenza alle previsioni progettuali, o prove di analisi (verifica di vulnerabilità sismica), al fine di verificare il comportamento di un elemento strutturale già in opera, soprattutto a seguito di eventi calamitosi che ne minano l'agibilità. Le prove di carico, ove ritenute necessarie dal Collaudatore, dovranno identificare la corrispondenza del comportamento teorico e quello sperimentale. I materiali degli elementi sottoposti a collaudo devono aver raggiunto le resistenze previste per il loro funzionamento finale in esercizio. Il programma delle prove, stabilito dal Collaudatore, con l'indicazione delle procedure di carico e delle prestazioni attese deve essere sottoposto al Direttore dei lavori per l'attuazione e reso noto a Progettista e al Costruttore.

Le prove di carico vengono citate :

- cap.9 -“Collaudo Statico” , contiene i principi, e le prescrizioni generali, relative alle prove di carico delle strutture orizzontali, coperture, ponti stradali, ponti ferroviari tali prove devono consentire al Collaudatore di identificare la corrispondenza fra il comportamento teorico e quello sperimentale e di formarsi il convincimento della sicurezza, della durabilità e della collaudabilità dell'opera. Per condizioni particolari il numero di prove è maggiore e talvolta viene richiesto di integrare la prova statica con quella dinamica;
- cap.6 -“Progettazione Geotecnica” , che definisce le prove di carico sui pali di fondazione, e il controllo di integrità che è previsto per particolari modalità di esecuzione, e per terreni con caratteristiche geotecniche particolari. All'interno dei vari paragrafi vengono definite anche il numero di prove che devono essere eseguite in relazione al numero dei pali, e all'omogeneità del terreno.

### 2.1.1 Prove di carico su solaio

Le prove di carico su solaio si distinguono in : statiche o dinamiche.

Nelle prove di carico statiche si applica su una superficie di un solaio, parzialmente o totale, un carico distribuito aumentandolo di volta in volta fino a raggiungere il valore indicato dal progettista. Ad ogni gradino di carico vengono eseguite delle misure di deformazione lette all'intradosso del solaio. Allo stesso modo si procede durante lo scarico del solaio.

Le prove di carico dinamiche consentono la misura diretta delle accelerazioni/spostamenti in punti opportunamente identificati a seguito della applicazione di sollecitazioni impulsive.

Questa raccolta dati viene "trattata" a posteriori al fine di ricavare le forme modali e le relative frequenze proprie (sperimentali).

Successivamente la modellazione strutturale ( utilizzando il metodo degli elementi finiti) consente di ottenere un modello "tarato" nei propri parametri di rigidità e vincoli che riproduca fedelmente il comportamento dinamico registrato sperimentalmente.

Con tale modello è possibile, a valle, effettuare l'analisi statica e revisionare le verifiche di progetto; in altri termini è possibile "validare" le assunzioni progettuali ed il progetto stesso.

In questo senso la metodica esposta consente una misura indiretta e teorica del grado di sicurezza della struttura.

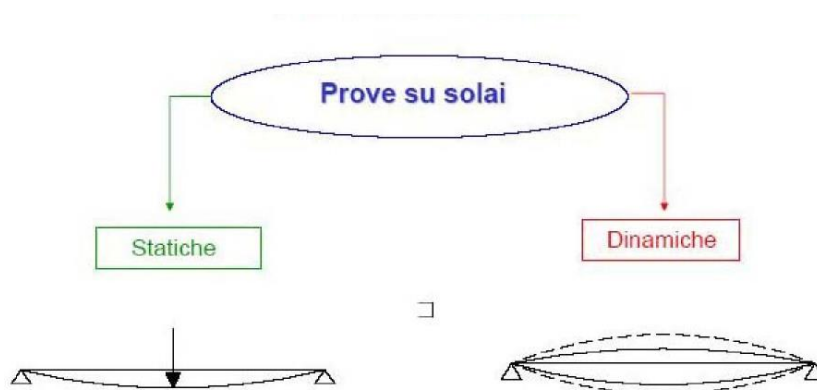


Figura 2.1: Disegno schematico

I travetti dei solai sono generalmente calcolati come appoggiati agli estremi, assegnando ai vincoli un certo grado d'incastro e supponendo che ogni elemento sia indipendente da quello vicino.

Nella realtà, invece i solai si comportano come piastre vincolate su quattro lati, e perciò anche i travetti distanti dalla zona caricata forniscono un contributo collaborando con quello più sollecitato.

Pertanto, quando è possibile caricare l'intera specchiatura di solaio compresa tra quattro pilastri, al fine di sollecitare la zona caricata così come previsto in progetto, è necessario determinare con buona approssimazione la zona di solaio collaborante e valutare di conseguenza l'entità di zavorra necessaria per la prova.

Le prove di carico su solaio vengono di norma effettuate disponendo il carico sull'intera area ovvero su un'area limitata sufficientemente distante dalle travi o dai sostegni paralleli alla direzione dell'orditura del solaio tale da minimizzare il loro possibile effetto collaborante. In quest'ultimo caso la larghezza della striscia di carico deve essere tale da interessare almeno tre travetti contigui, mentre l'intensità del carico deve essere determinata in maniera da generare le massime sollecitazioni di progetto.

Quando la prova viene eseguita sulla struttura allo stato grezzo, il carico di prova deve tenere conto dei carichi di progetto non ancora posti in opera quali:

- carico accidentale o di esercizio;
- carico permanente (pavimentazione, sottofondo, tramezzi, intonaco ecc.).

Per esigenze particolari può essere utile eseguire le prove di carico in tempi diversi, applicando separatamente il carico accidentale ed il carico permanente. L'abbassamento totale può essere valutato per sovrapposizione degli effetti.

Per quanto riguarda i carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici, le Norme tecniche per le costruzioni forniscono i valori nominali delle intensità da assumere, distinti in:

- carichi uniformemente distribuiti  $q_k$  - (kN/m<sup>2</sup>)
- carichi concentrati  $Q_k$  - (kN)
- carichi lineari  $H_k$  - (kN/m)

Cat.	Ambienti	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]	$H_k$ [kN/m]
A	<b>Ambienti ad uso residenziale.</b> Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	<b>Uffici.</b> Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	<b>Ambienti suscettibili di affollamento</b> Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	<b>Ambienti ad uso commerciale.</b> Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00

Tab. 2.1 : Vengono riportati i valori dei carichi di esercizio

Cat.	Ambienti	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]	$H_k$ [kN/m]
E	<b>Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale.</b> Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	$\geq 6,00$ —	6,00 —	1,00* —
F-G	<b>Rimesse e parcheggi.</b> Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	<b>Coperture e sottotetti</b> Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 —	1,20 —	1,00 —
		secondo categoria di appartenenza		

Tab. 2.2 : Vengono riportati i valori dei carichi di esercizio

La zavorra occorrente per materializzare i carichi distribuiti di prova può essere costituita, in relazione della disponibilità del cantiere e delle esigenze della stessa prova, da pallet di laterizi, da sacchi di materiale in polvere ( cemento, calce, ecc.), da bidoni, serbatoi o vasche da riempire con acqua, etc.

Quando il carico è generato con vasche o serbatoi riempiti d'acqua, questo si dispone in maniera uniforme e graduale, potendo quantificare con esattezza il carico misurando l'altezza d'acqua o utilizzando un contatore sia in entrata che in uscita.

Se si utilizzano elementi discreti (pallet, sacchi, bidoni,...) è opportuno procedere alla distribuzione del carico in maniera simmetrica, alternandolo per evitare la formazione di archi di scarico che trasferirebbero direttamente, in tutto o in parte, il carico agli appoggi, inficiando così i risultati e determinando ipotesi di comportamento della struttura assolutamente diverse da quelle reali.



Figura 2.2 : Materasso d'acqua per generare il carico



Figura 2.3 : Carico caratterizzato da pallet di laterizi

### Determinazione del carico di prova

Per la determinazione del carico di prova si inizia col valutare l'entità del carico accidentale uniformemente distribuito previsto in progetto, aggiungendo eventualmente il carico delle finiture non ancora in opera sulla struttura.

Poi, in relazione alla tipologia di zavorra a disposizione, ed alle configurazioni geometriche possibili, in funzione della geometria dell'elemento strutturale e dell'ingombro dell'elemento zavorra, si passa a valutare, teoricamente e/o sperimentalmente l'entità del carico di collaudo. Quando non è possibile caricare interamente la specchiatura di solaio, è possibile ricorrere a strisce di carico aventi larghezza **b** inferiore alla larghezza del campo di solaio, facendo tuttavia le dovute correzioni di carico per tenere conto della collaborazione delle fasce laterali di solaio non direttamente caricate ma collaboranti, grazie alla presenza della caldana armata con i ferri di ripartizione, con i travetti direttamente caricati. In pratica si valuta, teoricamente e/o sperimentalmente, la larghezza **B** di tale fascia collaborante ed in relazione al rapporto:

$$k = B / b$$

si incrementa il carico di collaudo sino a far lavorare i travetti direttamente caricati come se fosse tutto il solaio ad essere caricato.

$$P(\text{coll}) = k * q$$

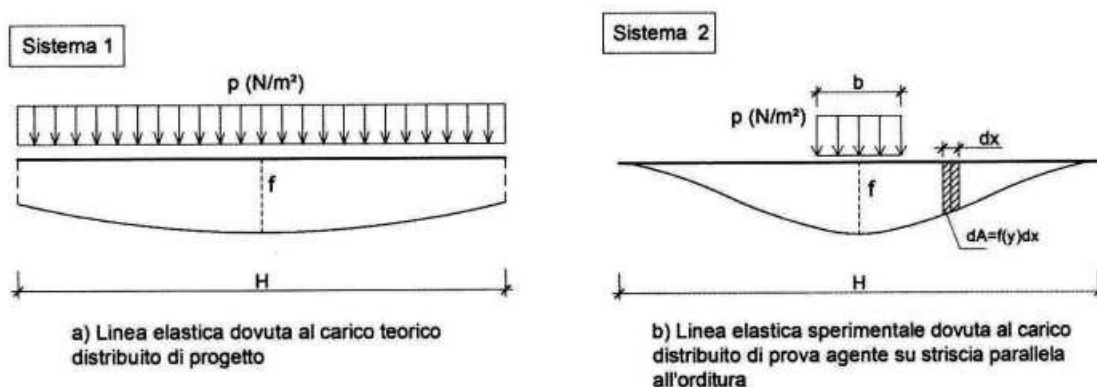


Figura 2.4 : Passaggio dalla configurazione di progetto con carico distribuito a quella sperimentale con una striscia di carico.



Il carico di prova sulla striscia di larghezza **b** di solito viene stimato, in prima approssimazione, teoricamente mediante il **metodo di Guidi**, al fine di avere un primo ordine di grandezza della zavorra da materializzare.

$$p_1 = \frac{P}{(2\lambda - \lambda^2)} \quad \text{con} \quad \lambda = \frac{b}{L}$$

- p1 = carico di prova
- p = carico di progetto
- b = larghezza della fascia di carico
- L = luce del solaio

Durante l'esecuzione della prova la larghezza **B** della fascia collaborante viene sperimentalmente determinata misurando la deformazione trasversale del solaio caricato grazie a dei trasduttori di spostamento disposti in mezzzeria e trasversalmente all'orditura dei travetti.

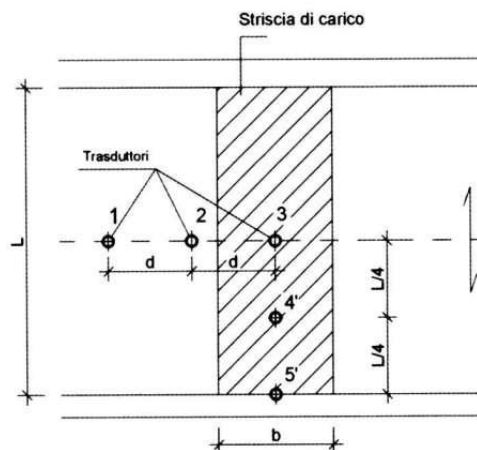


Figura 2.5 : disposizione dei trasduttori in relazione alla striscia di carico

L'ampiezza **B** della fascia collaborante viene valutata come quella del solaio immaginario infinitamente rigido che si deforma della stessa ampiezza massima, racchiudendo la stessa area della deformata trasversale reale.

Figura 2.6: Calcolo dell'area sottesa per la determinazione di B

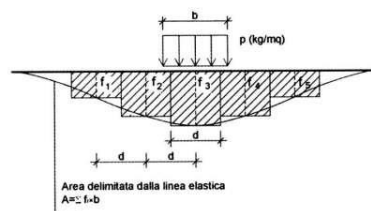


Figura E.3. Calcolo dell'area sottesa dalla linea di inflessione trasversale mediante somma dei rettangoli di compenso

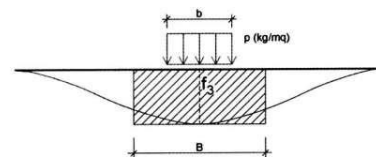


Figura E.4. Deformata trasversale

E' possibile, inoltre, utilizzare una fascia di carico avente una lunghezza  $l$  inferiore alla luce  $L$  del solaio oggetto di collaudo: anche in questo caso bisognerà incrementare il carico di collaudo al fine di equiparare i momenti della configurazione di luce parzialmente caricata con quella di luce interamente caricata.

Nelle prove di carico delle coperture, inclinate e/o la cui struttura principale sia costituita da capriate, è frequente il ricorso, nel configurare la condizione di carico, a carichi concentrati tali da generare le massime sollecitazioni di progetto. In questo ultimo caso è però necessario eseguire verifiche locali nei punti di applicazione del carico concentrato. Il paragrafo 3.1.4. delle Norme Tecniche stabilisce che in presenza di carichi atipici (quali macchinari, serbatoi, depositi interni, impianti, ecc.) le intensità del carico vengano valutate caso per caso, in funzione dei massimi carichi prevedibili; tali valori dovranno essere indicati esplicitamente nelle documentazioni di progetto e di collaudo statico.

A tal proposito, si è diffuso il ricorso alle prove di carico cosiddette a carichi concentrati equivalenti.

In base alla tipologia di applicazione del carico si distinguono in:

- 1 PROVA A SPINTA
- 2 PROVA A TIRO

#### 1 PROVA A SPINTA

La prova a spinta viene eseguita mediante l'applicazione di un carico concentrato applicato a mezzo di un sistema a spinta costituito da traverse nervate e da un martinetto idraulico, oltre ad un sistema di prolunghe ad innesti rapidi.

Mediante tale tipologia di prova sul solaio da caricare viene applicato un carico concentrato grazie al contrasto esercitato dal solaio superiore.

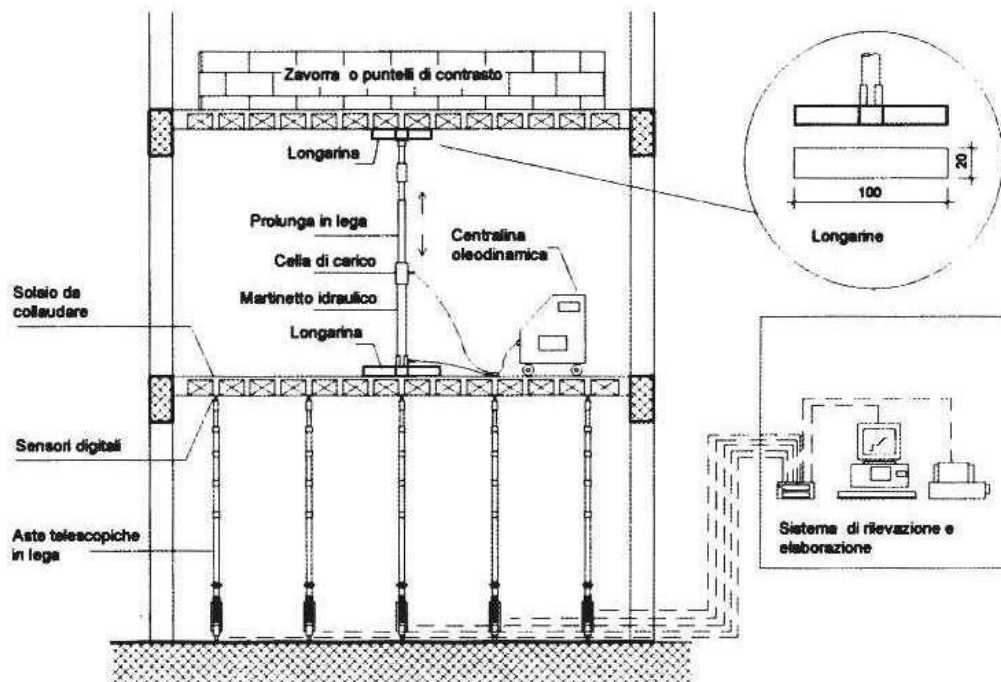


Figura 2.7 : Esempio applicativo delle modalità d'esecuzione

E' possibile utilizzare questa tipologia di carico sino a quando il solaio superiore, per effetto della spinta dal basso del martinetto, viene semplicemente scaricato dal momento positivo dovuto al peso proprio. In caso contrario, quando è possibile si può zavorrare o ulteriormente contrastare il solaio superiore, ovvero valutare la possibilità di ricorrere al metodo a tiro.

La forza "equivalente" da applicare  $F_{eq}$  è quella forza applicata in corrispondenza della mezzeria del solaio trasversalmente alle nervature e capace di indurre lo stesso momento massimo prodotto dal carico uniformemente distribuito di progetto  $q$ .

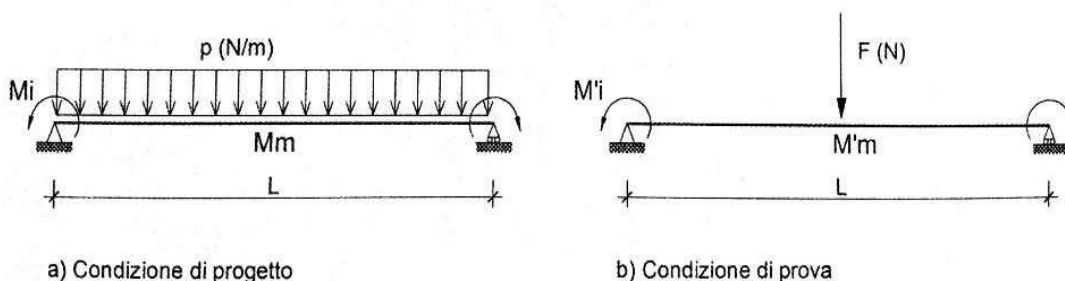


Figura 2.8 : Carichi equivalenti

$$F_{eq} = K_1 \cdot K_2 \cdot q \cdot L$$

$K_1$  = coefficiente che tiene conto della collaborazione delle zone di solaio adiacenti (valgono gli stessi ragionamenti fatti per le fasce di carico)

$K_2$  = coefficiente di equivalenza tra i momenti flettenti generati in mezzeria dal carico concentrato e dal carico uniformemente distribuito (funzione dei vincoli di estremità)

$q$  = carico uniformemente distribuito di progetto

$L$  = luce del solaio

Vantaggi del metodo a spinta

- 3 Il rapporto percentuale tra le tangenti alla curva di isteresi passanti per i punti corrispondenti all'ultimo e al primo carico ( valutazione più accurata della linearità);
- 4 Il rapporto percentuale tra i valori della freccia di due cicli consecutivi, a parità di carico ( valutazione più accurata della reperibilità)
- 5 Carico applicabile con qualunque velocità o gradualità e possibilità di rimozione istantanea dello stesso;
- 6 Installazione del sistema di carico semplice e veloce;

Bisogna prestare particolare attenzione a questa prova perché essendo il carico concentrato, se eseguita in maniera superficiale può portare a danneggiare le strutture (es. sfondellamento del solaio).

## 2 PROVA A TIRO

Quando non è possibile contrastare il sistema di spinta, per l'applicazione del carico concentrato si può ricorrere alla prova a tiro.

Valgono le stesse considerazioni teoriche espone per le prove a spinta: l'unica differenza sta nel fatto che il carico viene generato dal tiro della struttura provocato dall'accorciamento di uno o più martinetti ancorati alla struttura inferiore o a normali pesi.



Figura 2.9 : Prova a tiro



Figura 2.10 : Prova a tiro su capriate in legno

### 2.1.2 Prove di carico su pali

Le prove di carico su pali di fondazione, vengono eseguite con l'obiettivo di verificare la corretta esecuzione dei pali di fondazione e il comportamento strutturale sotto le azioni di progetto; sono regolamentate dalle vigenti normative tecniche per le costruzioni: D.M. del 14 gennaio 2008 – NTC 2008 (G.U. n. 29 del 24 febbraio 2008 – Suppl. Ordinario n.30) e dall'aggiornamento D.M. del 17 gennaio 2018 NTC 2018 (G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018- Suppl. Ordinario n. 8 – CAP. 6 – paragrafo 6.4.3)

Si distinguono in prove su pali pilota e prove di collaudo su pali.

Le prove su pali pilota sono dei test finalizzati a verificare sul campo la reale capacità portante dei pali di fondazione che costituiranno la futura palificata; infatti, vengono eseguite nelle medesime condizioni dei pali di fondazione effettivi. La prova si esegue sollecitando i vari elementi della palificata al carico di rottura. La medesima offre inoltre un'interpretazione affidabile, aiutando il progettista attraverso i risultati ottenuti dall'indagine. È opportuno, ove possibile, affiancarvi anche dei sondaggi geotecnici, grazie ai quali si otterranno dei risultati correlabili alla precisa situazione stratigrafica del terreno ospitante.

Le prove di collaudo su pali si eseguono su alcuni elementi della palificata che costituiscono i pali di fondazione. Nello specifico, tali prove hanno il fine di verificare le caratteristiche meccaniche e l'entità dei cedimenti. Il numero delle prove di carico è stabilito da quanto riportato in Normativa (NTC 2008 e NTC 2018) mentre l'ubicazione verrà scelta secondo differenti criteri.

I metodi d'esecuzione delle prove di carico su pali di fondazione differiscono per le modalità d'applicazione del carico. Le difficoltà maggiori si riscontrano nella realizzazione degli opportuni sistemi di contrasto.

Un metodo prevede che la struttura di contrasto sia costituita dai pali adiacenti collegati tra loro attraverso travi d'acciaio opportunamente dimensionate. L'applicazione del carico avverrà tramite cilindri idraulici governati da centralina oleodinamica; la rilevazione degli spostamenti viene eseguita da trasduttori elettronici.

Un altro metodo prevede il sistema di contrasto formato da catoste di blocchi in calcestruzzo disposti in quantità tale da superare l'azione che dovrà essere applicata al palo. I tempi di esecuzione di una prova di carico su pali di fondazione devono essere conformi ai dettami delle Normative vigenti.

Le modalità di esecuzione di una prova di carico su palo sono molteplici e si differenziano per la sequenza e la rapidità di applicazione del carico. Uno dei metodi più frequentemente utilizzato, la prova *maintained load*, prevede che il carico venga applicato al palo in incrementi successivi e ciascun carico progressivamente raggiunto nel corso della prova venga mantenuto costante per un periodo più o meno lungo.

In tutti i casi in cui la qualità dei pali dipende in misura significativa dai procedimenti esecutivi e dalle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione, devono essere effettuati controlli di integrità.

Il controllo dell'integrità, da effettuarsi con prove dirette o indirette di comprovata validità, deve interessare almeno il 5% dei pali della fondazione con un minimo di 2 pali. Nel caso di gruppi di pali di grande diametro ( $d > 80$  cm), il controllo dell'integrità deve essere effettuato su tutti i pali di ciascun gruppo se i pali del gruppo sono in numero inferiore o uguale a 4.

La scelta tempistica di inizio della prova:

- Per pali battuti prefabbricati installati in terreni granulari e saturi, eseguire la prova almeno tre giorni dopo l'installazione.
- Per pali battuti prefabbricati installati in terreni argillosi prevalentemente saturi la prova di carico (di progetto o di collaudo) dovrà essere eseguita solo quando le sovrappressioni neutre indotte nel terreno dalla costruzione del palo possono ritenersi esaurite (almeno quattro settimane).
- Per pali trivellati in cui il palo è realizzato con calcestruzzo gettato in opera, indipendentemente dal tipo di terreno, la prova dovrà essere eseguita solo a completa maturazione del calcestruzzo (28 giorni), o comunque quando la resistenza a compressione del calcestruzzo abbia raggiunto almeno il doppio di quella prevista sotto il massimo carico di prova.

I procedimenti di seguito descritti sono applicabili ad ogni tipologia di palo, indipendentemente dalla finalità della prova. E responsabilità del progettista della prova stabilire adeguati margini di sicurezza per le opere e per le persone che intervengono nella sperimentazione.

Le prove di carico su palo si suddividono in due tipi in relazione al loro scopo:

- 1) prove di progetto o su palo pilota;
- 2) prove di collaudo o su palo di esercizio.

Le prove devono essere eseguite da personale specializzato, nel rispetto delle vigenti normative.

La prova di progetto è una prova eseguita con la finalità di confermare o precisare le ipotesi poste alla base del progetto; perciò, le prove di progetto dovranno essere spinte fino a rottura e dovranno consentire il rilievo della curva carico-cedimento del palo e la determinazione del carico limite.

Indicando con  $Q_m$  il carico agente sul palo nelle condizioni più gravose di esercizio e con  $F_s$  il coefficiente di sicurezza prefissato, la prova deve essere spinta ad un carico massimo  $Q_{max} \geq F_s * Q_m$

La prova è distruttiva; essa deve essere eseguita su un palo appositamente realizzato non appartenente alla palificata in progetto.

Per valori  $Q_m$  particolarmente elevati è consentito eseguire prove di progetto su pali di diametro inferiore di quello previsto (e comunque non inferiore al 50%).

Affinché i risultati delle prove siano significativi, è necessario che il palo pilota:

- sia eseguito con le stesse modalità previste per i pali della Palificata
- sia ubicato nell'ambito o nelle immediate adiacenze della palificata
- sia ubicato in prossimità di sondaggi e/o prove in sito

Poiché il comportamento dei pali può dipendere notevolmente anche da dettagli del procedimento costruttivo, è opportuno che il palo pilota sia costruito con le stesse modalità dei pali della palificata. I risultati delle prove su palo campione, congiuntamente a

quelli rilevati dalle prove geotecniche, forniscono i dati per la corretta progettazione della fondazione. Per prova di collaudo si intende una prova eseguita su un palo scelto a caso nell'ambito della palificata, durante o dopo la costruzione di quest'ultima; la prova deve essere spinta fino ad un carico massimo di prova  $Q_{max} \geq 1,5Q_{es}$



La finalità della prova di collaudo è essenzialmente il controllo della corretta esecuzione e quindi della buona riuscita del palo, e la verifica della uniformità di comportamento dei vari pali di una palificata. Il numero di prove di progetto deve stabilirsi sulla base della quantità e della qualità delle conoscenze disponibili di carattere geotecnico, sull'affidabilità dei metodi di progetto utilizzati. In terreni con trascurabili variazioni in direzione orizzontale, una o due prove di progetto sono sufficienti.

Qualora tale condizione di omogeneità non sia verificata, il numero di prove di progetto dovrà crescere in ragione del grado di eterogeneità definito sulla base delle indagini in sito e/o di laboratorio disponibili.

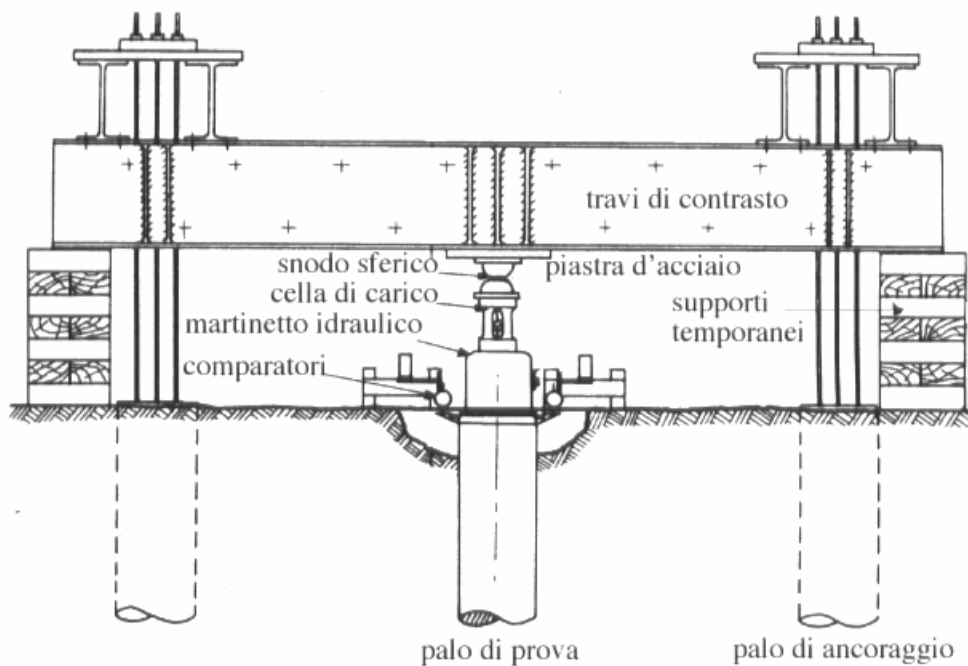


Figura 2.11 : Schema della prova di carico

## Strumenti

Nelle prove di carico si ha come obiettivo quello di misurare lo spostamento.

La misura degli spostamenti durante l'esecuzione delle prove di carico può essere eseguita con la tecnologia e le metodiche più coerenti con gli obiettivi della prova.

Le attrezzature di tipo meccanico (flessimetri, comparatori, deformometri, calibri ecc.) e la livellazione di precisione, con autolivelli (precisione 0.1 mm) ed autolivelli di precisione elettronici ovvero a lamine pian parallele (precisione 0.01 mm), che grande diffusione hanno avuto in passato e contrappongono alla semplicità d'uso, alla affidabilità, alla precisione ed alla riproducibilità delle misure, l'impossibilità di acquisire le letture in continuo, ed in condizione remota, e richiedono la presenza continua degli operatori durante la prova.

Nelle prove di carico sulle strutture le misure possono variare dal decimo di millimetro per i solai in edifici di civile abitazione ad alcuni centimetri nel caso di impalcati in acciaio di grande luce. La registrazione in continuo delle misure può essere eseguita mediante trasduttori di spostamento interfacciati ad una, o più, centraline di acquisizione collegate ad un computer che consente l'elaborazione in sito e la rappresentazione in tempo reale della risposta strutturale. La misura degli spostamenti può essere eseguita con:

- trasduttori di spostamento induttivi (LVDT);
- trasduttori resistivi;
- comparatori meccanici con corsa da 30, 50 mm e 100 mm e risoluzione 0.01 mm;

L'attrezzatura di misura può essere alloggiata su:

- supporti e basi magnetiche a 3 braccia;
- aste telescopiche estensibili fino a circa 8 m.

## 2.2 Comparatori Mitutoyo

Il comparatore è uno strumento di misura utilizzato per misure di spostamento lineare. Basa il suo funzionamento sulla lettura dello spostamento di un'asta cilindrica mobile che scorre all'interno di una guida tubolare. L'estremità dell'asta (chiamata tastatore o palpatores) è a contatto con la superficie dell'oggetto sottoposto a misura. L'asta del tastatore può portare una filettatura o una cremagliera; i suoi spostamenti vengono amplificati da un cinematismo di ruote dentate ingrananti con la vite micrometrica. Sull'asta del tastatore è calettato un perno scorrevole sull'involucro del comparatore che ne impedisce la rotazione. La pressione di misura, stabilita in 140 grammi, è data da una molla elicoidale fissata con una estremità all'asta del tastatore e con l'altra estremità all'involucro. Per mantenere costante la pressione di misura, al variare della tensione della molla sono stati studiati vari dispositivi. L'estremità del tastatore è di solito arrotondata, ma può essere sostituita con altre di forma diversa (conica, piatta, ecc.)

I comparatori normalmente vengono realizzati con corse utili comprese tra 1 e 100 mm, mentre la risoluzione è normalmente centesimale (0,01 mm), anche se vengono realizzati comparatori di precisione bimillesimali (risoluzione 0,002 mm).

Il comparatore digitale funziona sullo stesso principio del comparatore a quadrante, con la differenza che gli ingranaggi movimentano un piccolo encoder collegato ad un contatore elettronico. Minimi spostamenti dell'asta si traducono così in impulsi elettrici conteggiabili da un indicatore elettronico.

L'evoluzione dell'elettronica ha permesso la realizzazione di indicatori miniaturizzati e dal consumo molto basso, tanto da poter essere facilmente alimentati da una comune batteria a bottone. I display dei comparatori sono normalmente realizzati con una risoluzione di 0,01 mm.

Gli indicatori possono disporre di numerose funzioni:

- visualizzazione sia di letture metriche, che inglesi;
- azzeramento della lettura in un punto arbitrario;
- settaggio arbitrario di una quota;
- inversione del verso di lettura;
- settaggio e allarme quando la misura è fuori tolleranza;
- collegamento seriale con un PC, per poter automatizzare le misure (tramite apposito software)

Comparatore digitale Mitutoyo, con ottimo rapporto qualità prezzo. Il corpo sottile e la durata eccellente della batteria lo rendono adatto all'installazione supporti o maschere di misura con spazi ristretti. Sistema ABSOLUTE, per misure senza errori ad alta velocità. Uscita dati Digimatic. I comparatori Mitutoyo Absolute sono strumenti di misura precisi e affidabili utilizzati per la misurazione di dimensioni di oggetti in modo preciso. Questi comparatori utilizzano tecnologia ABSOLUTE, che significa che il loro valore di misura viene memorizzato all'interno del dispositivo, anche dopo la rimozione della corrente. Ciò consente di riprendere la misurazione da dove si era interrotta, senza dover reinserire le impostazioni o ricalibrare lo strumento.

Digitale / Analogico:	<b>Digitale</b>
Pollici - Metrici:	<b>Metrico</b>
Campo:	<b>25,4 mm</b>
Risoluzione:	<b>0.01 mm</b>
Max Permissible Error E MPE (Total Range):	<b>0.02 mm</b>
H MPE (Errore di Isteresi):	<b>0,02 mm mm</b>
R MPE (Ripetibilità):	<b>0,01 mm</b>
F. di misura:	<b>≤ 1,8 N</b>
Protezione:	<b>IP42</b>
Tipo:	<b>EN ISO Standard</b>
Scala:	<b>Electrostatic capacitance type absolute linear encoder</b>
Display:	<b>LCD, altezza caratteri: 8,5 mm</b>
Max. Velocità di risposta:	<b>Illimitata</b>
Allarme:	<b>Basso voltaggio, errore valore di conteggio</b>
Ø Gambo:	<b>3/8" /9.52 mm</b>
Punto di contatto :	<b>Sfera met duro filetto M 2,5 x 0,45 mm</b>
Alimentazione:	<b>1 Batteria SR-44</b>
Durata batteria:	<b>circa 20000 ore</b>
Note:	<b>Comparatore digitale senza pulsante invio dati. Per l'utilizzo del cavo USB Input Tool Direct Cable (accessorio opzionale) è richiesto il software USB-ITPAK.</b>
Completo di:	<b>Including SR44 battery, certificate of inspection</b>
Uscita dati DIGIMATIC :	<b>Si</b>
ON/OFF:	<b>Si</b>
ORIGINE:	<b>Si</b>
Direzione conteggio selezionabile:	<b>Si</b>
Massa:	<b>140 g</b>



Figura 2.12 : Foto Comparatori Mitutoyo Absolut

### 3.1 Introduzione alla tecnologia Wireless

In questo capitolo, verrà introdotta la tecnologia attraverso la quale le attrezzature utilizzate nel caso studio riescono a comunicare.

E' importante partire definendo come il progresso tecnologico dell'era digitale investe ormai tutti i campi dell'industria coprendo vasti settori nel mercato mondiale. In questa realtà evolutiva, riveste una particolare importanza il ruolo della strumentazione di misura che deve tenersi al passo del progresso tecnologico digitale dei dispositivi utilizzati nel mondo moderno. La trasmissione wireless sta attualmente diventando sempre più importante, con una crescente attenzione verso la comunicazione senza fili. I vantaggi delle comunicazioni wireless includono la portabilità, i costi ridotti e la semplicità d'uso. Le tecnologie senza fili sono progettate per una base di utenti molto più ampia rispetto alle vecchie tecnologie via cavo e sono sempre più intelligenti e auto-organizzanti. Nel mondo delle comunicazioni wireless, le reti di sensori wireless stanno diventando sempre più importanti. Queste reti sono costituite da dispositivi dotati di sensori e di un'unità di elaborazione e trasmissione.

L' importante trasformazione degli strumenti di misura consente all'utilizzatore un grande salto di qualità nel ruolo di controllo in quanto, da passivo interprete delle misure, può essere promosso ad uno più attivo elemento di interfaccia verso i sistemi elettronici. Il panorama delle tecnologie wireless diventa sempre più vasto, tanto che anche gli organi di standardizzazione (come l'IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) hanno suddiviso il ramo delle comunicazioni wireless in molteplici gruppi di studio. Prima di descriverli più in dettaglio è opportuno suddividere le reti di comunicazione (cablate e wireless) in base alla loro estensione.

- **BAN:** *Body Area Network*, ossia reti limitate ad una decina di metri dal corpo dell'utente. Sono essenzialmente concepite come reti wireless caratterizzate da bassissimi livelli di emissione di potenza (inferiori ad 1 mW). Si prevede per esse un futuro soprattutto nell'ambito biomedicale (monitoraggio mediante sensori del battito cardiaco), in combinazione con dispositivi che possano interfacciarsi a reti più vaste (cellulari, ad esempio).

- **PAN:** *Personal Area Network*, reti personali. Anche in questo caso si parla quasi esclusivamente di reti wireless a bassa potenza (lo stesso ordine di grandezza delle BAN). Il raggio di copertura è di una decina di metri o poco più. Rientrano in queste reti le tecnologie (come Bluetooth) per collegare computer portatili, cellulari e PDA (Personal Digital Assistant). Fa parte di questa categoria anche l'insieme di tecnologie che verranno descritte nel corso della tesi.
- **LAN:** *Local Area Network* Reti locali, inizialmente nate in ambito cablato (con Ethernet principalmente) e poi sviluppatasi anche in ambiente wireless. Forse la tecnologia più diffusa o conosciuta è WiFi (Wireless Fidelity). La copertura di queste reti è di qualche centinaio di metri e rispetto alle precedenti comincia a diventare molto importante la banda fornita. A questo livello si parla di connessioni Internet e di servizi di streaming audio o video. Le prestazioni fornite dalla tecnologia wireless sono spinte al limite.
- **MAN:** *Metropolitan Area Network* Si parla quasi esclusivamente di reti cablate, per il trasporto di grandi flussi di dati. Come suggerito dal nome si tratta di reti a livello cittadino con estensione di qualche chilometro.
- **WAN:** *Wide Area Network* Macro reti a livello mondiale, via cavo o su link satellitari. Rappresentano il cuore della rete Internet.

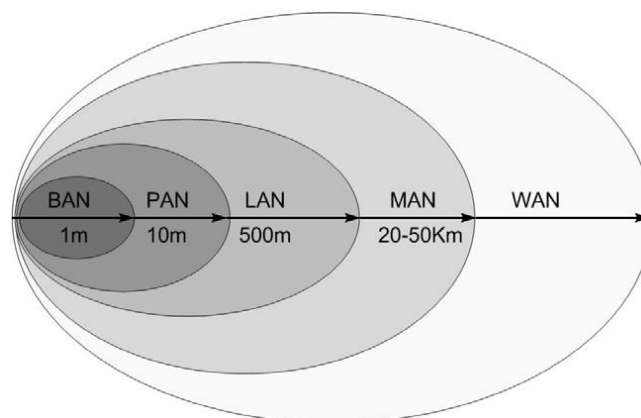


Figura 3.1: Suddivisione delle reti in base all'estensione geografica

### 3.1.1 Banda ISM

In telecomunicazioni la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) è il nome assegnato dall'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU) ad un insieme di porzioni dello spettro elettromagnetico riservate alle applicazioni di radiocomunicazioni non commerciali, ma per uso industriale, scientifico e medico.

Le bande ISM (Industrial, Scientific and Medical) rappresentano una delle scelte migliori se si utilizza una comunicazione a radiofrequenza, visto che sono libere da obblighi di concessione in molti stati. Le frequenze ISM sono state regolamentate dagli standard ETSI EN 301 498-1, ETSI EN 300 328-1 V1.3.1 per l'Europa, FCC CFR 47 per Usa e Canada e ARIB STD-T66 per il Giappone; altri stati hanno delle normative locali che però consentono l'utilizzo di dispositivi che rispettino gli standard ETSI e/o FCC.

Si ricorda che per lo sviluppo di una rete di sensori wireless si vogliono realizzare dispositivi dai costi e dalle dimensioni contenute. Ciò porta a considerare solo alcune delle bande ISM: a causa di alcune limitazioni hardware in termini di efficienza delle antenne e limitazione dei consumi, negli ultimi anni si sta utilizzando sempre più la banda dei 2,4 GHz. Le bande ISM sono svincolate dall'utilizzo di un particolare standard di comunicazione, consentendo quindi al progettista ampia libertà nell'implementazione di tecniche di power saving, fondamentali nelle reti di sensori. D'altro canto, vi sono diverse limitazioni inerenti la potenza di uscita delle trasmissioni radio, dovute a ragioni legislative. Per minimizzare l'inquinamento elettromagnetico le potenze tipicamente consentite all'interno delle ISM coprono un range compreso fra gli 0 dBm ed i 20 dBm: la potenza limitata si traduce in coperture limitate del segnale.

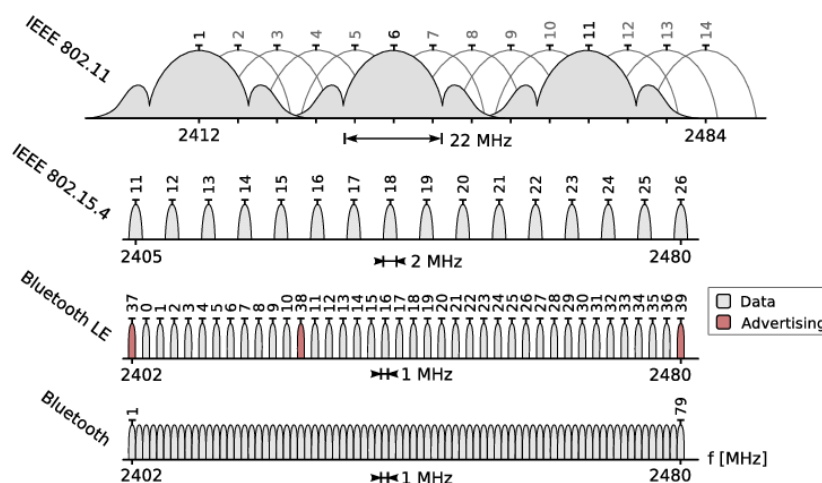


Figura 3.2 : Frequenze dei diversi standard



### 3.1.2 Lo standard IEEE 802.15.4

Lo standard IEEE 802.15.4 è stato concepito per regolamentare il livello fisico e il livello MAC (Media Access Control) di reti in area personale (ovvero a corto raggio, tipicamente inferiore a 30 m) che lavorano con basse velocità di trasferimento dati (LR-WPAN, Low-Rate Wireless Personal Area Networks). Questo standard è gestito dal gruppo IEEE 802.15. Le specifiche ZigBee, WirelessHART, e MiWi sono basate su questo standard: esse sviluppano i livelli superiori del modello ISO/OSI, non coperti dallo standard, per offrire una soluzione completa di rete di trasmissione dati.

È importante segnalare che è stato pubblicato nel 2012 un importante emendamento allo standard, denominato IEEE 802.15.4e, che introduce, tra le altre cose, un meccanismo di accesso multiplo di tipo Time Slotted Channel Hopping (TSCH), in grado di garantire una maggiore robustezza alle interferenze elettromagnetiche esterne e ridotte probabilità di collisione. Questo tipo di meccanismo è particolarmente utile in applicazioni industriali. Lo standard IEEE 802.15.4 prevede due distinte tipologie di dispositivi, denominati rispettivamente Full Function Device (FFD) e Reduced Function Device (RFD). Gli RFD sono stati concepiti come nodi a ridotta complessità e pertanto essi possono comunicare soltanto con gli FFD. Gli FFD invece, oltre a poter operare come coordinatori nella WPAN (PAN Coordinator), possono interagire con qualsiasi altro nodo in visibilità radio, a prescindere dalla modalità di funzionamento di quest'ultimo. Sono inoltre previste due possibili topologie di rete: a stella e peer-to-peer. La prima è stata concepita a supporto di contesti operativi semplici in cui il centro-stella (ovvero il PAN Coordinator) è in visibilità radio con tutti gli altri nodi della rete.

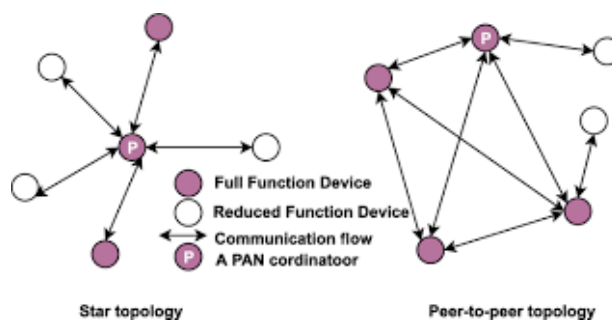
La procedura per la formazione di una topologia a stella è molto semplice: il primo FFD che viene attivato stabilisce una WPAN nella sua area di influenza e ne diviene coordinatore; successivamente, gli altri nodi possono associarsi alla WPAN così costituita mediante opportuni messaggi di segnalazione scambiati con il PAN Coordinator. Spesso il coordinatore viene alimentato da rete elettrica mentre i gli altri dispositivi sono alimentati a batterie. Un FFD viene eletto a coordinatore della rete e fornisce il controllo di quell'insieme di dispositivi, rendendo la rete indipendente dalle altre potenzialmente esistenti. Ogni device vede solo il coordinatore e per dialogare con altri device deve passare attraverso di esso. Questa topologia `e quella più vicina all'applicazione che viene implementata in questa tesi.

La tipologia peer-to-peer è stata invece pensata per scenari più complessi (come, ad esempio, le reti wireless di sensori) in cui la comunicazione multi-hop rappresenta un requisito imprescindibile. Nella formazione di topologie peer-to-peer, continua ad esistere il PAN Coordinator ma è consentito anche agli altri FFD di operare come coordinatori secondari, fornendo funzionalità di accesso alla rete e di sincronizzazione agli altri dispositivi interconnessi. Anche in questo caso esiste un solo coordinatore, ma ogni dispositivo può comunicare con gli altri senza dover passare dal coordinatore: la rete assume una tipologia magliata. Questo tipo di topologia è meno gerarchica e rigida e ben si adatta a situazioni auto-configuranti o a reti Ad-Hoc. Questo tipo di rete permette anche la comunicazione multi-salto (multi-hop) e fornisce una maggiore affidabilità della rete mediante percorsi multipli tra sorgente e destinazione.

Una rete LR-WPAN, secondo lo standard IEEE 802.15.4, può opzionalmente operare in modalità beacon-enabled. In questo caso, l'asse temporale viene suddiviso in una sequenza di super-frame, ciascuno dei quali è delimitato da appositi pacchetti di segnalazione (definiti beacon). I beacon sono trasmessi dai nodi coordinator e sono responsabili della sincronizzazione di tutti i dispositivi della rete. Per quanto riguarda, invece, le modalità secondo cui i nodi della WPAN si scambiano reciprocamente i messaggi, si devono considerare tre distinte possibili interazioni:

- comunicazione **dispositivo** → **coordinator**: Un generico nodo della WPAN può in ogni momento inviare i propri dati al coordinatore
- comunicazione **coordinator** → **dispositivo**: quando un dispositivo vuole ricevere i dati dal proprio coordinatore, esso invia una richiesta al coordinatore e rimane in attesa dei dati. Nella modalità *beacon enabled* il coordinatore esplicitamente dichiara nel messaggio di *beacon* quali sono i nodi figli per cui dispone di dati pendenti.
- comunicazione **dispositivo** → **dispositivo**: è utilizzata in topologie *peer-to-peer* e richiede che i nodi siano tra loro sincronizzati.

Figura 3.3 : Tipologie di rete



### Zigbee e IEE 802.15.4

La ZigBee Alliance (alleanza commerciale simile a Bluetooth) `e nata come alleanza tra vari enti commerciali e accademici mirata allo sviluppo di uno stack di protocolli per automazione e applicazioni di controllo remoto. Dopo poco tempo anche un comitato dell'IEEE, l'802.15.4, si `e interessato a questi argomenti cosicché dalla loro unione `e nato il prodotto commerciale ZigBee. Le finalità di questo prodotto possono così essere riassunte:

- Bassi bit-rate.
- Bassi consumi di energia.
- Bassi costi.

Solitamente i due nomi vengono erroneamente utilizzati come sinonimi: infatti Zig- Bee e 802.15.4 sono complementari. Analizzando lo stack ISO-OSI di questo sistema, IEEE 802.15.4 si occupa di fornire i primi due livelli, fisico e accesso al mezzo (MAC: medium access control), mentre ZigBee specifica i livelli superiori, a partire dal livello di rete fino al livello di applicazione.

ZigBee `e una tecnologia per reti wireless a basso bit-rate, potenzialmente molto estese e costituite da nodi che abbiano un'autonomia energetica di mesi o anni. Le tipologie di rete permesse sono molteplici e i dispositivi hanno un raggio di copertura di 10-75 m (distanze maggiori vengono coperte mediante tecniche di multi-hop, saltando di nodo in nodo).

Un sistema di tipo ZigBee consiste di alcuni componenti. Esistono due tipi di dispositivi (denominati *device* in inglese): *full-function device (FFD)*, dispositivi con funzionalità completa, e *reduced-function device (RFD)*, con funzionalità ridotta. Ogni rete deve includere almeno un FFD operante come coordinatore della WPAN (Wireless Personal Area Network).

I dispositivi FFD possono operare in tre modi: come coordinatori della PAN, come coordinatori semplici o come device normali.

Gli RFD sono pensati per applicazioni molto semplici che non debbano spedire grandi quantità di dati. Un FFD può dialogare sia con gli RFD che con gli FFD, mentre un RFD può comunicare solo con un FFD.

## 4.1 Introduzione al Labview

In questo capitolo della tesi verrà presentato il codice LabVIEW utilizzato per l'acquisizione dati nel caso studio. Verrà fornita una introduzione al software, descrivendo l'ambiente di programmazione e le sue principali caratteristiche. In particolare, verrà prestata particolare attenzione ai metodi di comunicazione tra le diverse parti del programma, che sono fondamentali per la corretta realizzazione del codice. Si precisa che, dato che LabVIEW è un software molto ampio e adatto a molteplici scopi e dispositivi, verranno descritte solo le funzionalità effettivamente utilizzate durante la realizzazione del programma. LabVIEW ("Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench") è un ambiente di sviluppo di applicazioni, principalmente orientate all'acquisizione dei dati, alla gestione di strumentazione elettronica e all'analisi ed elaborazione dei segnali. Esso fornisce un ambiente di programmazione di tipo grafico ad oggetti, denominato "G-Language", il quale consente di realizzare programmi in forma di diagrammi a blocchi. LabVIEW conserva comunque molte similitudini con gli ambienti di programmazione tradizionali:

- contiene tutti i tipi di dati, permettendo di crearne di nuovi attraverso la loro combinazione, e gli operatori di uso comune;
- permette di controllare l'esecuzione dei programmi, ricorrendo a strutture di controllo di flusso come, ad esempio, cicli e costrutti per l'esecuzione condizionale del codice.

LabVIEW mette a disposizione del programmatore una serie di librerie, richiamabili ed utilizzabili all'interno dei programmi; queste contengono funzioni di uso comune (aritmetiche e statistiche, per la manipolazione di stringhe etc.) e funzioni specializzate nell'acquisizione ed elaborazione dei segnali. Per specifiche applicazioni, può essere necessaria l'implementazione di nuovi driver e librerie. Nuove funzioni e librerie possono essere realizzate dagli stessi utenti. La gestione dei pacchetti installati avviene tramite il tool NI Package Manager e la gestione degli hardware tramite NI MAX.

Infine, il programma consente il debug delle applicazioni realizzate in G-Language e fornisce un sistema di error-handling molto efficiente.

## Virtual – Instrument (VI)

Il Virtual Instrument, o VI, è l'elemento fondamentale dei programmi scritti in G-Language.

I VI permettono l'interazione tra PC e strumentazione, fornendo allo stesso tempo all'utente una GUI per poter interagire con gli stessi VI. Tentando un'analogia con altri linguaggi di programmazione, un VI è paragonabile a una funzione o a una subroutine. Il funzionamento di LabVIEW si basa proprio sull'interazione tra i diversi VI contenuti nel progetto. Il nome "Virtual Instrument" deriva dal fatto che le applicazioni LabVIEW sono progettate per simulare degli strumenti reali: al posto di essere strumenti fisici montati su un banco, essi sono virtuali che esistono solamente all'interno del software. I VI sono salvati come file "\*.vi", formato proprietario della National Instruments (file binario)

L'organizzazione dei programmi tramite VI permette di dare al codice una struttura modulare, ovvero la suddivisione di programmi complessi in sottoprogrammi più e semplici e riutilizzabili. Essi prendono il nome di "subVI" e sono VI a tutti gli effetti (mantengono pure lo stesso formato); una subVI viene semplicemente inserita all'interno di una VI di livello gerarchicamente superiore. L'insieme delle VI, ma anche i componenti hardware reali, gli elementi di memoria, i controlli etc., vengono gestiti tramite il Project Explorer, nonché l'albero di progetto (Figura 1.2).

Un VI è costituito principalmente da quattro elementi:

pannello frontale (Front Panel), diagramma funzionale a blocchi (Block Diagram) insieme di icona e connector pane.

**Front Panel** - Il Front Panel è la finestra che rappresenta l'interfaccia tra il programma e l'utilizzatore (GUI). Nel pannello frontale sono posizionati tutti i controlli e gli indicatori dello strumento virtuale. Con "controllo", ci si riferisce a una variabile in ingresso, che può essere modificata agendo sugli opportuni elementi del pannello frontale. L'utente può agire sui controlli in maniera diversa: tramite i più semplici menù a tendina e caselle in cui inserire il valore della variabile, ai pomelli e gli slider. Con "indicatore", invece, si intende una variabile in uscita, il cui valore può essere modificato dal programma e non direttamente dall'utente. Analogamente ai controlli, gli indicatori possono rappresentare le variabili in diversi modi: indicatori a lancetta, semplici indicatori numerici/a stringa e così via. Un esempio di controlli e indicatori disponibili è riportato in Figura 4.1.

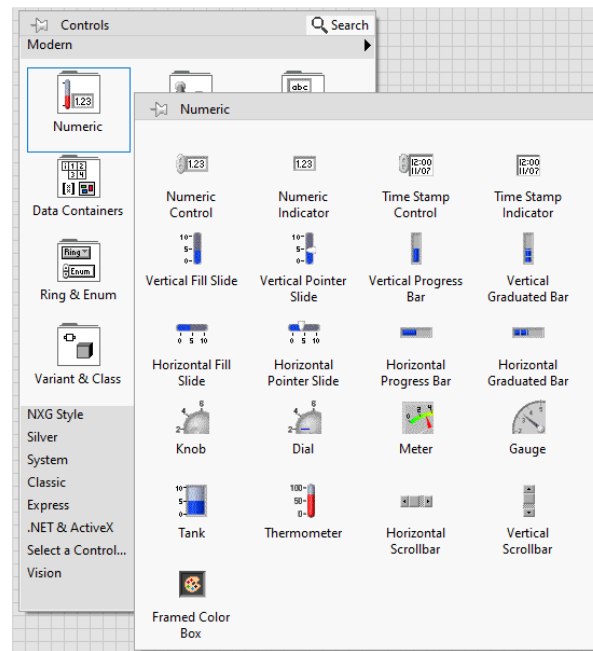


Figura 4.1: Immagine esemplificativa che riporta la palette con i controlli e gli indicatori di tipo numerico, utilizzabili nel Front Panel

**Block Diagram** - Il Block Diagram contiene il codice vero e proprio del programma. Gli elementi più importanti che lo compongono sono i blocchi delle funzioni, i quali svolgono tutte le operazioni richieste al programma. I blocchi possono essere analoghi a delle black box (si ha accesso agli input e agli output ma non alle operazioni interne ad essi) oppure essere usate come delle vere e proprie subVI. Queste possono essere presenti di default nel programma oppure essere realizzate dal programmatore; in entrambi i casi, è possibile modificarle. Oltre ai blocchi, sono presenti nel diagramma anche i terminali di input e output, ciascuno dei quali ha il suo corrispettivo controllo o indicatore nel Front Panel. Blocchi e terminali sono connessi tra di loro tramite i fili.

Il colore di fili e terminali varia in base alla tipologia di dato che essi trasportano.

**Connector Pane e Icona** - L'insieme formato dall'icona e dal Connector Pane ("pannello dei collegamenti") si trova in alto a destra del Front Panel ed è presente in tutte le VI.

L'icona è completamente personalizzabile dall'utente: tramite doppio click sull'icona stessa, è possibile accedere all'apposita finestra. Quando una VI viene utilizzata come subVI l'icona del suo blocco, nel Block Diagram della VI in cui viene inserita, è esattamente quella riportata nel Front Panel.

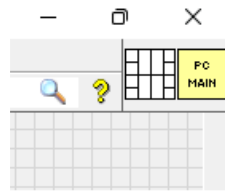


Figura 4.2: Insieme di icona e Connector Pane della VI.

Il Connector Pane riporta i collegamenti dei terminali della VI con l'esterno. Essendo i terminali delle variabili in ingresso o in uscita, i collegamenti non sono altro che gli ingressi o le uscite delle variabili della funzione realizzata all'interno del blocco. Il numero e la disposizione dei collegamenti possono essere scelti dall'apposito menù a tendina, all'interno del quale sono riportati tutti i pattern disponibili di default nel software. I collegamenti con i diversi terminali sono impostati manualmente dall'utente. I pattern disponibili sono riportati in Figura 4.3.

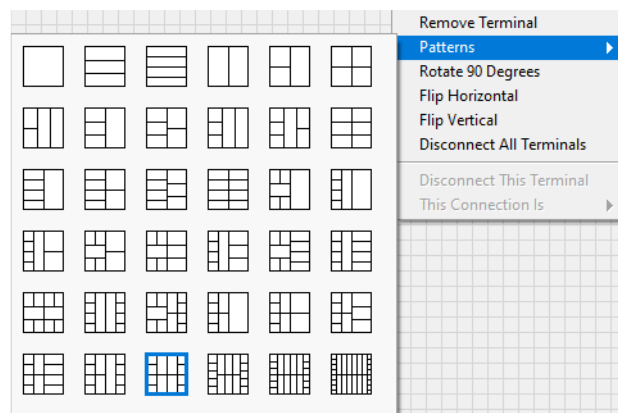


Figura 4.3 : Pattern disponibili per il collegamento della subVI con gli altri elementi del Block Diagram.

I tipi di dati che Labview riconosce sono numerici senza segno, numeri con virgola mobile, stringhe e booleani. Alcuni VI prevedono la generazione di errori. Gli errori sono un tipo di dati che raggruppano un booleano (errore sì o no), un numero senza segno (codice errore) e una stringa (messaggio di errore).

La generazione di errori può dipendere da un errore prevedibile, e quindi gestibile, dal programmatore, come un valore sbagliato inserito dall'utente, oppure un errore non gestibile come la rottura di un dispositivo connesso a labview.

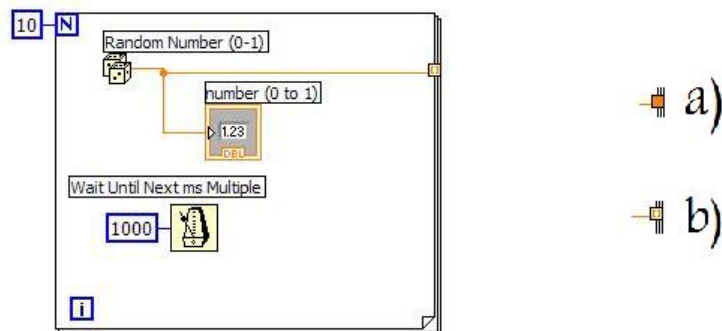
Labview offre Context Help agli sviluppatori. Premendo Ctrl+H su un qualsiasi elemento presente sullo schema a blocchi o sul pannello frontale, si apre una piccola finestra che definisce e descrive l'elemento selezionato. Spostando il cursore del mouse sopra altri elementi, Context Help aggiorna il riferimento e fornisce le veloci istruzioni di base del nuovo elemento al di sotto del cursore. Questa strategia permette al programmatore di vedere quali parametri sono fondamentali e una breve spiegazione sullo strumento selezionato. Context Help offre anche un link diretto a Detailed Help che è l'help di Labview che definisce dettagliatamente tutti i VI delle librerie fornendo informazioni dettagliate sulla struttura, parametri minimi di cui necessita il VI e le funzionalità. In entrambi gli elementi sono presenti dei pulsanti importanti per l'esecuzione di un VI. Questi sono: Run, rappresentato da una freccia bianca che punta verso destra ed ha la funzione di eseguire il VI; Run Continuously, rappresentato da una freccia bianca ciclica e tonda che ha la funzione di avviare il VI ripetutamente fino a che non viene ripremuto il pulsante; Abort Execution, rappresentato da un pallino rosso che ferma l'esecuzione istantaneamente; Pause, che mette in pausa la simulazione e la ripristina al secondo click. Nel diagramma a blocchi sono presenti altri pulsanti molto utili nell'individuazione di errori logici, come: HighLight Execution, rappresentato da una piccola lampadina che avvia l'esecuzione del VI rallentata mostrando al programmatore il percorso del flusso di dati istante per istante, rappresentandolo con dei pallini che scorrono lungo i collegamenti; Start Single Step, che avvia l'esecuzione del VI passo passo mostrando al programmatore l'evoluzione logica della struttura creata. Questi pulsanti sono molto utili per individuare errori logici.



Labview è un linguaggio di programmazione grafica che implementa molte delle strutture tipiche di linguaggi più comuni come Java e C. Labview ha i più classici cicli For e While o strutture decisionali tipo Case o Timed Structures o Events Structures oppure Flat Sequence. Queste strutture permettono l'evoluzione logica dell'algoritmo. In seguito ne verranno ricordate alcune.

**Ciclo FOR:** si usa quando si deve rispettare una sequenza di operazioni per un numero N di volte, conosciuto dall'utente o generato da elaborazioni precedenti del VI. Si accede a questa struttura dal percorso All Functions → Structures → For loop e la si dispone sul diagramma a blocchi trascinandola. Nel punto indicato da N, si collega una costante (o il risultato di qualsiasi elaborazione che restituisce un numero) che rappresenta il numero di iterazioni che il ciclo eseguirà. Il quadratino in basso a sinistra invece restituisce l'indicazione sull'iterazione corrente. Tutto il codice inserito all'interno sarà eseguito quindi N volte. Il passaggio di valori all'interno del ciclo avviene semplicemente collegando due punti come si è fatto sinora. Il passaggio di valori all'esterno è invece più complesso. E' possibile scegliere di trasferire solo un valore generato nell'ultima iterazione o tutta la raccolta di valori generati nel corso delle N iterazioni. Nell'immagine di figura 4.4 vengono generati 10 valori casuali, uno ogni secondo. Se il quadratino è pieno vuol dire che verrà passato all'esterno solo l'ultimo valore, se il quadratino contiene all'interno le parentesi quadre vuol dire che passerà un array i cui elementi saranno i valori casuali generati.

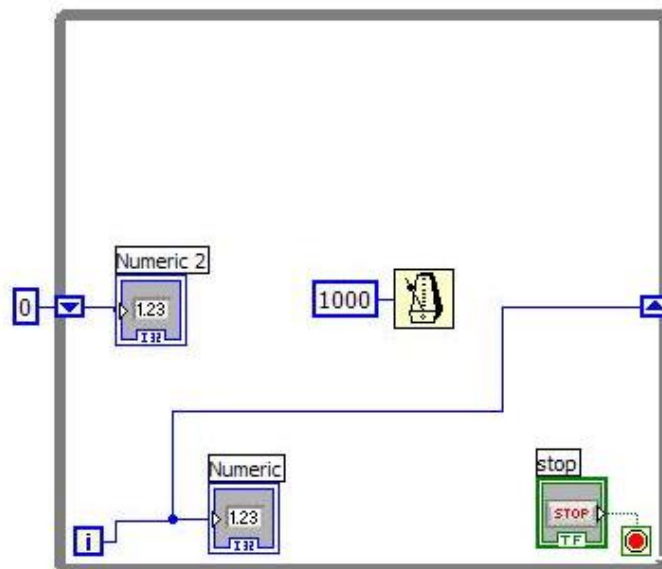
Figura 4.4 :Esempio di ciclo For



**Ciclo WHILE:** come per il Ciclo For, tutto quello che si trova all'interno del riquadro while verrà ripetuto ma questa volta finché non si avvera una condizione booleana. Si procede subito con un esempio: si accede a questa struttura dal percorso All Functions → Structures → While loop e la si dispone sul diagramma a blocchi trascinandola. Labview collegherà da solo un controllo sul valore booleano che determina la fine del ciclo. Il ciclo viene eseguito una volta al secondo sino a quando non verrà premuto il pulsante di STOP. Il passaggio di valori all'interno del ciclo funziona esattamente come il Ciclo For. Anche nel passaggio dei valori in uscita si possono scegliere le stesse opzioni per il Ciclo For con in più la modalità Shift Register, come mostrato in figura 4.5. Questa modalità permette di memorizzare l'ultimo valore di uscita e riportarlo in ingresso. Nell'esempio di figura i dati in uscita saranno rispettivamente numeric 2 e numeric (00;10;21;32;43;...).

Questo ciclo permette di strutturare l'esecuzione del VI come macchina a stati utilizzata in TASC, che verrà spiegata tra breve.

Figura 4.5 : Esempio di utilizzo del ciclo While



**Struttura CASE:** la struttura Case permette l'elaborazione condizionata dei sub-diagrammi a seconda del valore assunto da una variabile di controllo. La variabile di controllo può essere un numero intero, un booleano, una stringa, un dato di tipo enumerato o un errore. In numero di sub-diagrammi dipende dal tipo di variabile di controllo e un solo sub-diagramma alla volta è visibile. Se la variabile è di tipo booleano ci possono essere solo due sub-diagrammi. In questo caso la struttura Case è identica alla struttura if... then... else.. di linguaggi di programmazione testuale.

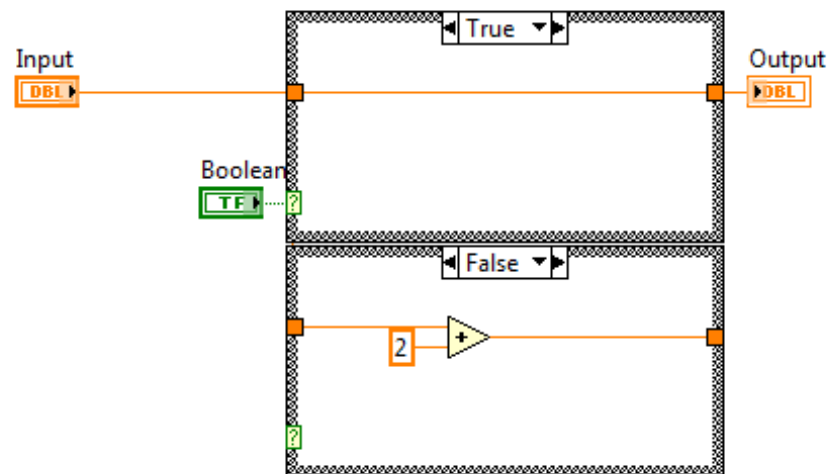


Figura 4.6 : Esempio di struttura Case

**Macchine a stati:** la macchina a stati è una struttura logica che sfrutta il ciclo While e la struttura Case e che permette una programmazione leggera e facilmente leggibile da qualsiasi programmatore. In figura 4.7 è mostrato l'utilizzo degli shift register come pilota degli stati della macchina. Il valore 0 a sinistra è il caso di default da dove parte la macchina. La struttura case entra in zero ed esegue l'istruzione del sub-diagramma di 0 dove viene anche deciso lo stato successivo che viene indicato dallo shift register di destra. A questo punto il primo ciclo While termina, lo shift register di destra copia il suo valore sullo shift di sinistra e comincia il secondo ciclo While. La struttura Case legge il nuovo valore numerico (che è quello deciso nel caso 0), entra in quel caso, svolge le istruzioni di quel sub-diagramma dove viene deciso il valore che dovrà essere disponibile

alla struttura Case nel ciclo successivo. Questo avviene ininterrottamente fino a quando non viene premuto il pulsante di stop. Nell'esempio di figura 4.7 la macchina parte dallo stato 0 in cui viene solo settata annulla una stringa indicizzata a 1 lo shift register. Termina il primo ciclo e comincia il secondo. A questo punto lo shift register è di valore uguale a 1 e la struttura Case entra nel case 1.

In questo Case è stata inserita una struttura Event che si comporta come una Case ma la decisione sul caso da eseguire non viene decisa dalla variabile di controllo, ma da un evento come la pressione di un tasto, il cambiamento di una valore numerico e l'arrivo di un errore. In questi casi gestiti il software entrerà nel case specifico pensato dal programmatore e farà in modo che la macchina si comporti come previsto potendo gestire anche eventuali errori.

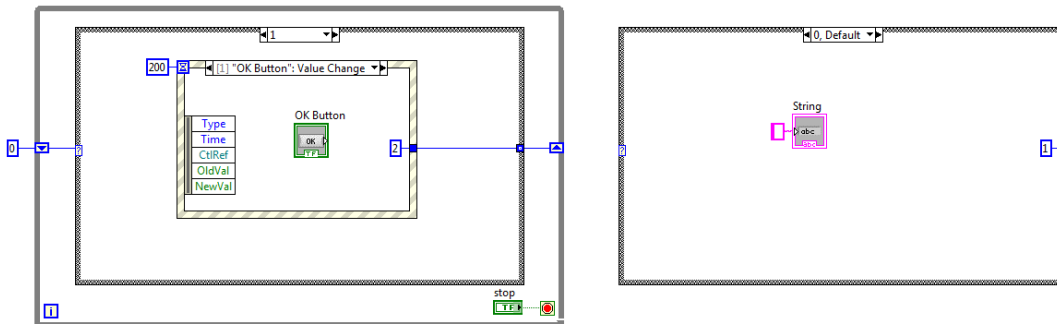


Figura 4.7 : Esempio di macchina a stati

#### 4.1.1 VISA VI e funzioni

LabVIEW supporta VISA come interfaccia software per la comunicazione con strumenti elettronici, permettendo agli sviluppatori di creare facilmente applicazioni che interagiscono con questi strumenti.

LabVIEW offre una vasta gamma di funzioni per la comunicazione con strumenti che utilizzano VISA, come la configurazione dei parametri di comunicazione, la gestione degli errori, la gestione dei buffer di comunicazione, la sincronizzazione tra il computer e lo strumento, e molto altro ancora. Inoltre, LabVIEW fornisce anche una interfaccia grafica intuitiva che rende più facile per gli sviluppatori creare applicazioni che interagiscono con strumenti elettronici.

In sintesi, LabVIEW e VISA lavorano insieme per fornire un'architettura software potente e flessibile per la comunicazione con strumenti elettronici, rendendo più semplice per gli ingegneri e i ricercatori effettuare misure e test con questi strumenti.

VISA è un acronimo che sta per Virtual Instrument Software Architecture, un'architettura software standard per la comunicazione con strumenti elettronici come oscilloscopi, multimetri, generatore di forme d'onda, ecc. attraverso un computer.

VISA include diverse funzionalità per la gestione delle comunicazioni, come la configurazione dei parametri di comunicazione (come la velocità di trasmissione dei dati), la gestione degli errori, la gestione dei buffer di comunicazione, la sincronizzazione tra il computer e lo strumento, e altro.

VISA è supportato da molte società che producono strumenti elettronici e da molti sviluppatori di software che creano programmi per interagire con questi strumenti. Ciò garantisce una interoperabilità tra strumenti e software, rendendo più semplice per gli ingegneri e i ricercatori la comunicazione con questi strumenti.

<b>Oggetto tavolozza</b>	<b>Descrizione</b>
<u>VISA</u> <u>Assert</u> <u>Trigger</u>	Asserisce un trigger software o hardware, a seconda del tipo di interfaccia. Per i trigger software, Default (0) è l'unico protocollo valido. Per i trigger hardware VXI, Default (0) equivale a Sync (5). Per i trigger PXI, PXI: Reserve (6) e PXI: Unreserve (7) sono gli unici protocolli validi.
<u>VISA</u> <u>Clear</u>	Cancella i buffer di input e output del dispositivo.
<u>VISA</u> <u>Leggi</u>	Legge il numero specificato di byte dal dispositivo o dall'interfaccia specificata dal <b>nome della risorsa VISA</b> e restituisce i dati nel <b>buffer di lettura</b> .
<u>VISA</u> <u>Leggi</u> <u>STB</u>	Legge un byte di stato della richiesta di servizio dal dispositivo basato su messaggi specificato dal <b>nome della risorsa VISA</b> .
<u>VISA</u> <u>Scrivi</u>	Scrive i dati dal buffer di <b>scrittura</b> nel dispositivo o nell'interfaccia specificata dal <b>nome della risorsa VISA</b> .

Tabella 4.1 : Tabella fornita da NI Instrument

## 5.1 Introduzione al progetto

Lo scopo del progetto è stato quello di dimostrare come le tecnologie wireless in combinazione con software di programmazione versatili come il Labview permettano di semplificare il processo di acquisizione dei dati.

In particolare, l'azienda dove ho svolto il tirocinio ha messo a disposizione tutte le attrezzature e i dispositivi necessari per poter sviluppare un'interfaccia nell'ambiente di sviluppo Labview, orientato all'acquisizione dei dati, alla gestione della strumentazione elettronica e all'analisi ed elaborazione dei segnali.

A causa delle politiche aziendali non ho potuto testare il mio lavoro al di fuori del laboratorio, dove ho eseguito semplicemente una simulazione collegando i dispositivi al pc. Quindi in questo capitolo mi limiterò a descrivere le metodologie con le quali ho operato e le modalità con cui il sistema può essere utilizzato in cantiere nelle applicazioni pratiche.

Il mio scopo è stato quello di collegare 4 comparatori Mitutoyo attraverso i dispositivi di comunicazione ( U-wave R e U-wave T) descritti nel capitolo 3, in modo tale da poter inviare delle richieste di pacchetto allo strumento.

Il "VI" realizzato può essere utilizzato con le opportune modifiche dei codici di comunicazione con tutti gli strumenti Mitutoyo che hanno la possibilità di essere collegati all' U-wave.

### 5.1.1 Metodologia di sviluppo

Nei capitoli precedenti abbiamo gettato tutte le basi, per poter comprendere al meglio le varie fasi di lavoro.

Entrando nel merito della prova, la prima fase è stata quella di installare tutti i driver e i software, relativi ai vari dispositivi che sono stati forniti direttamente dalla casa produttrice Mitutoyo.

Tale procedura, ci ha permesso di connettere, tramite cavo con ingresso usb, il dispositivo U-wave R (ricevitore). Tale dispositivo comunica con gli U-wave T (trasmettitore), attraverso un sistema di comunicazione che abbiamo descritto nel capitolo 3. Il trasmettitore può essere collegato allo strumento che esegue la misurazione che vogliamo acquisire.



Figura 5.1 : Dispositivi  
Mitutoyo





L'U-wave T presenta:

- Circa. 20 m (in campo aperto)
- Specifica ZigBee: sistema wireless 2,4GHz per la trasmissione di dati affidabile
- Esportazione dei dati verso Microsoft® Excel® o altro software SPC professionale
- Il trasmettitore conferma il trasferimento di dati con un segnale acustico o un segnale LED rosso / verde.
- Disponibile un trasmettitore IP67
- Basso consumo energetico: 400.000 trasmissioni dati con una batteria
- Con l'utilizzo del software opzionale (U-WAVE Event) il sistema accetta la richiesta dati da un PC. Ideale quando il sistema è installato in luoghi non accessibili.

Gli strumenti Mitutoyo utilizzano il protocollo Digimatic, che è un protocollo di comunicazione utilizzato nella misura elettronica. Viene impiegato principalmente per la trasmissione di dati da strumenti di misura come micrometri digitali, calibri a lucchetto e altri strumenti di precisione. Questo protocollo è stato sviluppato da Mitutoyo Corporation, un'azienda leader nella produzione di strumenti di misura di alta precisione. Il protocollo Digimatic specifica come i dati vengano codificati e trasmessi tra lo strumento di misura e un dispositivo esterno, come un computer o un registratore di dati. Quest'ultimo utilizza una serie di comandi standard per la trasmissione dei dati, che possono essere adoperati per controllare lo strumento di misura e recuperare i dati misurati. Questo rende possibile la raccolta automatizzata dei dati di misura e la loro analisi in un secondo momento. Il sistema Mitutoyo U-WAVE consente una facile comunicazione wireless dei dati da uno strumento di misura ad un PC, utilizzando il protocollo Digimatic.

Protocollo di comunicazione wireless:	<b>Proprietario (2,4 GHz da specifiche originali basate su IEEE 802.15.4)</b>
Funzioni:	<b>Ricezione dei dati di misurazione (comando di annullamento, comando di errore) Scansione ID di tutte le bande (analisi del livello di rumore) Avviso di caduta del livello di tensione in ingresso da USB</b>
Metodo di modulazione:	<b>DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum)</b>
Note:	<b>U-WAVE-R + Software (U-WAVEPAK)</b>
Distanza di comunicazione:	<b>Circa 20 m (in campo aperto)</b>
U-WAVE-R collegabili a PC:	<b>fino a 16</b>
Velocità di comunicazione kbps:	<b>250</b>
Alimentazione:	<b>USB</b>
U-Wave-T collegabili a PC:	<b>fino a 100</b>
:	
Comunicazione con gli strumenti di misura:	<b>Digimatic (6 cifre), digimatic 2 (8 cifre) identificazione automatica</b>
Frequenza di comunicazione:	<b>Banda 2,4 GHz (2,405-2,475 GHz, 15 canali (intervalli di 5 MHz)</b>
Trasmissione in uscita:	<b>1 mW (0 dBm) o inferiore</b>
Compatibilità O.S.:	<b>Windows® 2000 Professional (≥SP4), Windows® XP Professional (≥SP2), Windows® XP Home Edition (≥SP2), Windows Vista®, Windows® 7 (32bit, 64bit), Windows® 8, 8.1, 10 (32bit, 64bit), "Data Collection Macro" for MS Excel (to be used in U-WAVEPAK) does not support MS Excel of 64bit edition.</b>

Tabella 5.1 : Caratteristiche dell'U-wave R

La seconda fase del percorso è stata quella di collegare attraverso il software fornito i 4 trasmettitori (è possibile collegarne fino a 100 per ogni ricevitore) a loro volta collegati attraverso un cavetto agli strumenti. I vari dispositivi creano una configurazione di comunicazione a stella descritta nel capitolo 3.

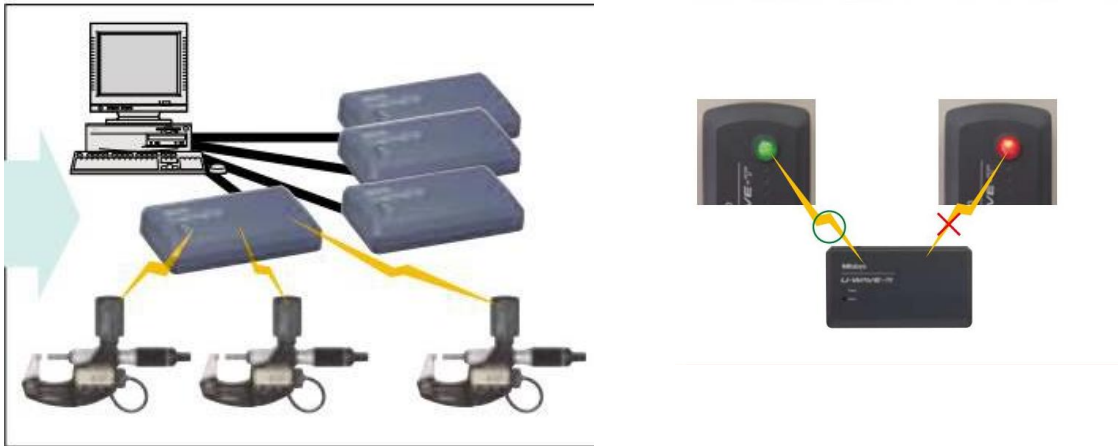


Figura 5.2 : Schema di montaggio dei dispositivi

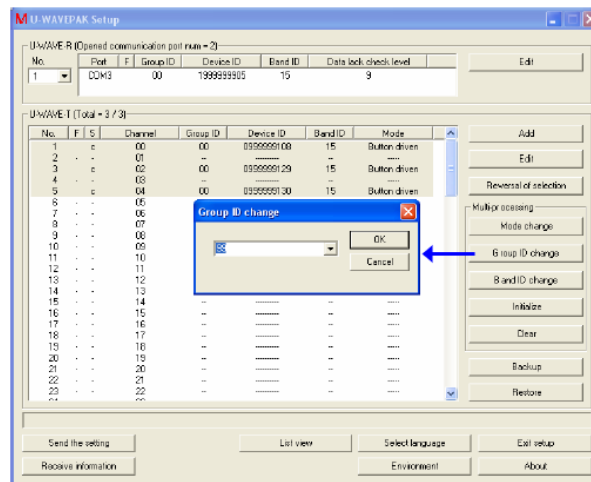


Figura 5.3 : Interfaccia del programma di installazione della comunicazione tra i due dispositivi

Arrivati a questo punto il lavoro si è orientato sul software di programmazione Labview che abbiamo descritto nel capitolo 4 . In particolare, siamo andati ad utilizzare il pacchetto di comunicazione VISA VI. Abbiamo aperto una comunicazione con U-wave R selezionando la relativa porta COM. Per determinare i parametri di configurazione della porta, il tecnico Mitutoyo mi ha consigliato di scaricare un programma di configurazione delle porte COM .

Così sono riuscito a determinare i seguenti dati:

- Baud Rate
- Data bits
- Stop Bits
- Parity
- Flow Control

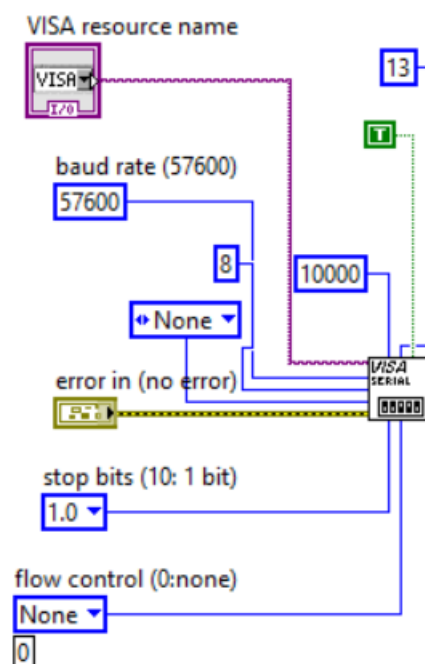


Figura 5.4 : Immagine catturata nel  
Block diagram

Nel sistema inserisco, a seguire, il Visa Write che mi permette di inviare il pacchetto di richiesta sotto forma di stringa in linguaggio ASCII. Una difficoltà è stata quella di creare un sistema che permettesse di inviare in sequenza la richiesta per ognuno dei comparatori presenti.

### 7.1.3.2 Request of measurement data packet

When receiving this packet, the U-WAVE-R returns the 'Measurement data packets' of the U-WAVE-T which is event driven mode, or returns the 'Status packet'.

Item	Value	Bytes	Description
Packet code	DR	2	Request of measurement data packet
Version number	1	1	U-WAVE API version number
Channel	00-99,FF	2	Channel of the U-WAVE-T 00-99=Return the measurement data which corresponding the specific 'Channel'. FF=Return the measurement data of all U-WAVE-T which have data.
Group ID	00-99	2	Group ID of the U-WAVE-R
Clear the measurement data	0/1	1	Indicate whether clear or not the measurement data in U-WAVE-R after output it. 0=Not clear 1=Clear
Method of search for Channel	0/1/2	1	(1) In case of 'Channel' = 00-99: 0=Return the measurement data which corresponding the specific 'Channel'. 1=Search U-WAVE-T from the specific 'Channel' to upper direction, and return the founded measurement data. 2=Search U-WAVE-T from the specific 'Channel' to lower direction, and return the founded measurement data. (2) In case of 'Channel' = FF: 0/1=Return the measurement data of all U-WAVE-T which have data in ascending order. 2=Return the measurement data of all U-WAVE-T which have data in descending order.
Terminator	0Dh	1	CR(Carriage return)
Total		10	

Tabella 5.1: Pacchetto di richiesta dati da PC a U-wave R

Si noti come alla fine del codice di richiesta sia presente il CR che è un carattere di controllo nel codice ASCII che sta ad indicare un ritorno a capo .

Il ricevitore invia la richiesta al trasmettitore e riceve indietro un pacchetto di misura che può essere letto attraverso un VISA READ e il dato può essere immagazzinato.

A questo punto, durante le sedute di prova, discutendo con il personale del laboratorio abbiamo notato come lo strumento avesse un limite che poteva comportare una situazione di scomodo nell'applicativo. In particolare, nel momento in cui non ci fosse stata una variazione della grandezza da monitorare, il trasmettitore restituiva come pacchetto di misura un errore. Sono riuscito, grazie anche alle indicazioni del Forum Ni Instrument che mi ha sempre accompagnato nel percorso, a risolvere questo problema, andando ad imporre delle condizioni sul dato di ritorno. Ho imposto al sistema di confrontare il codice di ritorno con il codice di errore ST1000%d00000 (che a sua volta anche questo come il codice di richiesta varia in relazione al sensore con cui si sta dialogando) e nel caso in cui questi coincidessero ho imposto di portare avanti, anziché l'errore, l'ultima misura immagazzinata.

Questa eventualità che si è presentata mi ha fatto ancora di più capire quanto sia importante investire nell'ambito dei sensori e nella loro collaborazione con un sistema di programmazione così versatile e pratico.

Ho realizzato due differenti pacchetti labview: un primo che permettesse di interpellare i vari dispositivi collegati uno per volta alla pressione di un tasto sul display del pc; un secondo, sviluppato sulla base delle necessità che ho riscontrato parlando con i colleghi dell'ufficio. Il sistema richiede in automatico, sequenzialmente (poiché il ricevitore deve chiudere una richiesta, per aprire la seguente) e ad intervalli di tempo regolabili, le misure che vengono poi direzionate verso un sistema di elaborazione dati dal quale riesco ad ottenere un file excel .

Come struttura ho utilizzato un ciclo for con il quale riesco ad iterare la richiesta per il numero di comparatori presenti, questo è posizionato all'interno di un ciclo while che permette di ripetere la misura per il numero di volte necessario.

Il sistema può essere ulteriormente aggiornato ed esteso nelle funzionalità. Per esempio, si potrebbe implementare andando a collegare un sistema di lettura del carico di esercizio applicato e costruire i diagrammi carico – spostamento.

Snappet VI del Diagram

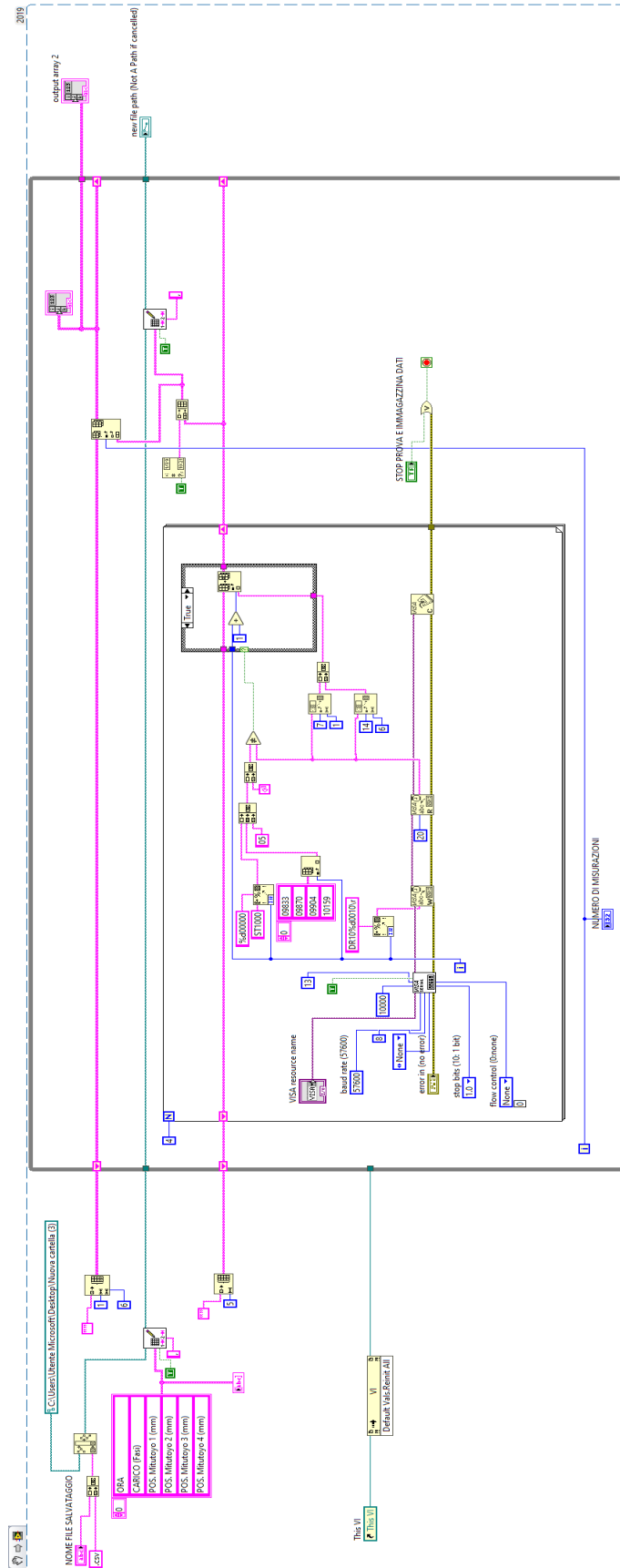


Figura 5.5 : Block

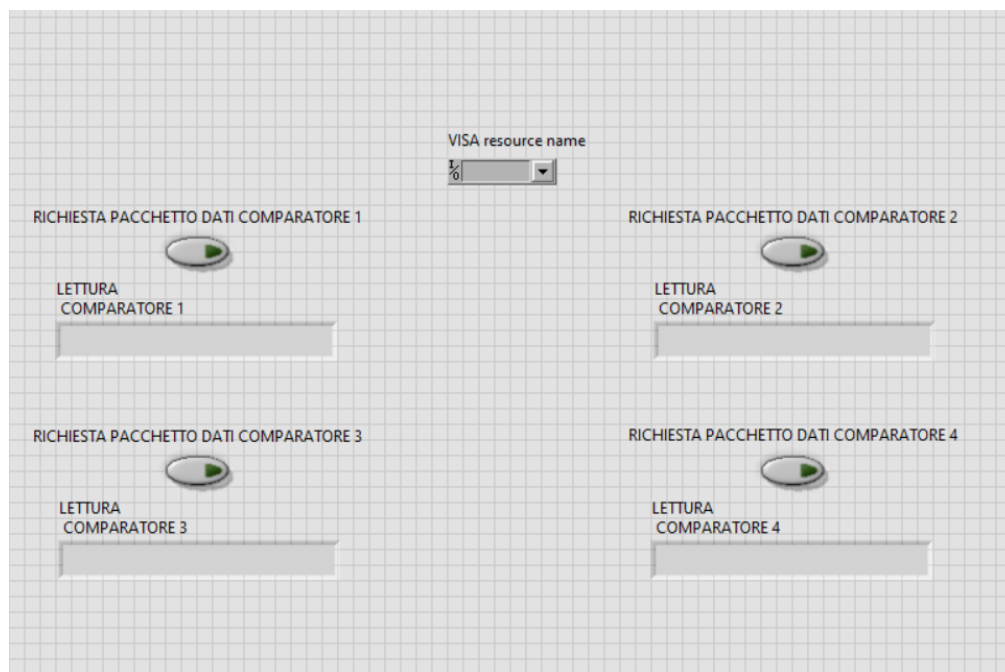
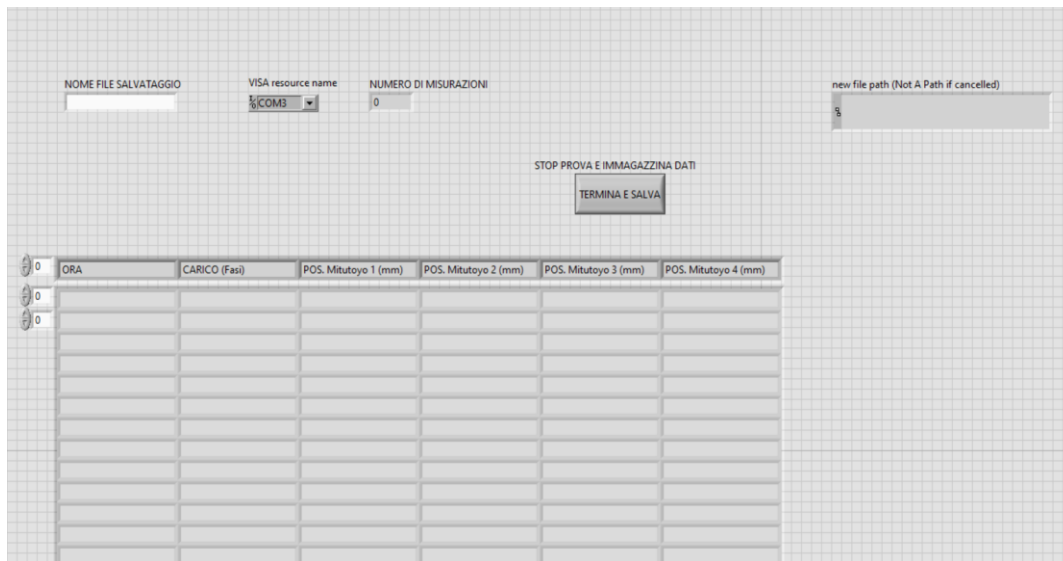


Figura 5.6 : rappresentano il block panel e il front panel delle situazioni descritte



### 5.1.2 Applicazioni nelle prove di cantiere

Come abbiamo visto nei capitoli 1 e 2 sono molte le prove che ci aiutano a dare una stima del livello di salute di una struttura e in particolar modo una stima della vulnerabilità sismica di un edificio. Tra queste abbiamo distinto le prove di carico su solaio o su palo da fondazione perché nelle suddette viene utilizzato il comparatore Mitutoyo che abbiamo preso in esame.



Figura 5.7 : Prova di carico su solaio realizzato in legno

Nella prova di carico su solaio i comparatori vengono collegati attraverso degli opportuni supporti a dei fili di acciaio tenuti in tensione da un piombo.

Quando il solaio viene caricato il filo tende a scendere e quindi a variare la posizione del gambo del comparatore.

Il collaudatore attraverso un sopralluogo può definire il modo più opportuno per la costruzione del supporto.



Figura 5.8 : particolare del montaggio



Figura 5.9 : Particolare del montaggio dei comparatori a 120°



Figura 5.10 : Prova di carico su palo

Nelle prove di carico su palo a spinta verticale la procedura più impiegata nell'esecuzione è quella ad incremento di carico controllato (o ad incrementi di carico costante) e consiste in incrementi prefissati di carico applicati alla testa del palo e mantenuti costanti per un determinato intervallo di tempo (per esempio 15', 30', 60', 120') e comunque sempre fino allo stabilizzarsi dei cedimenti.

Il rilievo dei cedimenti in funzione del tempo e dei carichi è eseguito, ad esempio, ogni 5', 10', 30'. Ogni incremento di carico oscilla intorno al 25% del carico di esercizio, in una prova di collaudo si effettuano mediamente 6 incrementi di carico.

Le prove di carico, in presenza di strutture di fondazione soggette a carichi ciclici, vengono eseguite con cicli di scarico e carico per misurare le aliquote reversibili e irreversibili dell'abbassamento della testa del palo in base ai vari livelli di carico e per studiare il comportamento statico del palo quanto entrano in gioco le forze di attrito laterale nelle zone più profonde del palo.

La misura degli abbassamenti verticali della testa del palo viene eseguita mediante: comparatori centesimali, trasduttori di spostamento, livellazione di precisione, etc. I comparatori devono avere una corsa coerente con i cedimenti attesi (30 mm, 50 mm, 100 mm, etc... ) ed una risoluzione non minore di 0,01 mm .

Tali strumenti devono essere fissati alle travi di supporto di idonea rigidità flessionale, composte solitamente da due travi disposte in prossimità del palo e ortogonalmente alle travi di contrasto ed appoggiati su sostegni laterali posti ad una distanza non minore di tre volte il diametro del palo, in maniera da non risentire dei movimenti del terreno dovuti al palo di prova o alla struttura di contrasto. Un estremo della trave di supporto deve essere libero di scorrere per consentire la dilatazione termica; tali inconvenienti possono essere attenuati prevedendo una opportuna protezione dai raggi solari.

Un'efficace procedura per minimizzare gli errori strumentali è il ricorso ad un doppio sistema di controllo che, generalmente, consiste nel rilievo degli spostamenti eseguito mediante tre comparatori centesimali (disposti sulla testa del palo a 120°).

### 5.1.3 Fasi esecutive della prova

Le fasi esecutive di una prova di carico sono:

- acquisizione del programma di prova redatto dal collaudatore, comunicato al direttore dei lavori, approvato dal progettista ed accettato dal costruttore;
- effettuazione di sopralluogo preliminare al fine di prendere diretta visione della struttura da collaudare ed eseguire i rilievi necessari;
- scelta del tipo di zavorra da utilizzare per materializzare i carichi;
- individuazione della zona di carico;
- posizionamento del carico nella zona prestabilita;
- individuazione dei punti nei quali posizionare i trasduttori di spostamento e installazione in opera a mezzo di stativi
- collegamento dei trasduttori con l'U-wave T e collegamento dell'U-wave R al pc; verifica del corretto funzionamento della comunicazione.
- effettuazione della prova caricando per step il carico, che dovrà essere mantenuto sino allo stabilizzarsi dei cedimenti della struttura
- misurazione degli abbassamenti nei singoli punti monitorati e determinazione in tempo reale dell'andamento carichi cedimenti
- esecuzione del rilievo fotografico di tutte le fasi della prova di carico

Dalla prova di carico lo sperimentatore dovrà redigere un report; in questo dovrà riportare almeno i seguenti dati:

- ✓ gli estremi dell'incarico
- ✓ le istruzioni impartite dal collaudatore
- ✓ i disegni dell'area di prova con il posizionamento della zavorra e dei punti monitorati
- ✓ la tabella dei dati della prova: step di carico, ora, temperatura, carico, misure ai trasduttori
- ✓ I grafici della prova ( es. andamento carico- tempo, andamento carico-cedimenti, etc...).

Di seguito è riportato un esempio di alcune degli elementi che compongono il report

## 6.1 Considerazioni principali sulla sperimentazione

Vengono qui riportate le principali considerazioni emerse sul setup di misurazione adottato.

Riferendoci al caso studio possiamo dire come l'utilizzo della tecnologia wireless in combinazione con il sistema di programmazione Labview permettano di soddisfare le necessità del tecnico e di facilitarne l'esecuzione della prova.

Il tecnico, in primis risulta avvantaggiato nell'installazione dei dispositivi, poiché, il cablaggio tramite cavi comporta un maggiore dispendio di tempo. Inoltre, i cavi di cui stiamo parlando sono cavi schermati con un costo non indifferente, che sono soggetti anche a cicli di manutenzione poiché gli ambienti di lavoro portano ad usura e intasamento da polvere dei connettori di cablaggio. D'altro canto, la prova potrebbe anche essere eseguita andando a rilevare direttamente le misure sui vari dispositivi e riportandole su un foglio manualmente, tuttavia si può facilmente intuire come questa metodologia risulti essere troppo macchinosa e pericolosa considerando che le prove vengono effettuate applicando un carico di prova. L'operatore quindi dopo aver disposto i sensori, può monitorare i vari dispositivi da un'unica stazione; Dopodiché, dovrà interfacciarsi con il labview il quale presenta un Front Panel molto intuitivo che può essere configurato in base alle proprie preferenze e un Block Diagram nel quale è possibile qualora ci fosse una particolare necessità andare ad apportare delle modifiche e delle migliorie al sistema.

Nelle due applicazioni per la gestione del comparatore che ho realizzato, nella prima è possibile andare ad interpellare lo strumento premendo il tasto relativo a quella precisa posizione, i dati vengono immagazzinati all'interno di un file Excel; nella seconda applicazione è possibile andare invece ad impostare dei tempi di acquisizione dei dati e di conseguenza il sistema in automatico sequenzialmente andrà ad interpellare i 4 comparatori e riporterà i dati incasellati all'interno di un file Excel in prossimità dell'intervallo di tempo relativo.

### 6.1.1 Considerazioni su eventuali limiti

Tra i possibili limiti che vale la pena considerare quando si sceglie di utilizzare dei sensori wireless in un progetto ci sono:

- Interferenze wireless: presentano molte fonti di interferenze wireless che possono interferire con il segnale dei sensori, causando errori di trasmissione dei dati o interruzioni del segnale.
- Copertura limitata: la copertura wireless è limitata a una certa distanza, il che significa che i sensori possono essere utilizzati solo in un'area limitata, ma questa condizione non risulta essere un problema per le applicazioni che ci riguardano.
- Requisiti di energia: i sensori wireless hanno bisogno di energia elettrica per funzionare, il che significa che è necessario preoccuparsi della durata della batteria o della fonte di alimentazione.
- Degrado del segnale: il segnale wireless può essere influenzato da ostacoli fisici o interferenze elettromagnetiche, causando una perdita di segnale e quindi errori di misura. ( es. nelle prove su solaio la presenza di tramezzi disposti in mezzeraia possono rappresentare un ostacolo)

Nonostante questi limiti, i sensori wireless sono una scelta popolare a causa della loro flessibilità e facilità d'uso.

### 6.1.2 Possibili miglioramenti

Vengono ora esposti alcuni possibili miglioramenti da applicare al sistema di misura allo scopo di rendere ancora più vantaggioso il suo utilizzo.

Discutendo con i tecnici della Labortec siamo riusciti ad individuare una miglioria interessante per implementare il sistema, attraverso il controllo di una cella di carico (nel caso della prova su palo) o della portata del materassino di acqua (utilizzato per materializzare il carico nella prova di carico su solaio). Sarebbe pertanto interessante andare a sfruttare la tecnologia wireless anche per questi altri sensori, in

modo tale da riuscire a creare un collegamento che permetta il controllo e l'acquisizione del dato in labview.

Questo ulteriore lavoro permetterebbe di ottenere una più precisa e affidabile relazione tra i carichi e gli spostamenti.

Inoltre, un'altra osservazione che ci è scaturita dai test eseguiti è quella di poter inserire durante l'esecuzione della prova un sensore che permetta di rilevare la temperatura con una risoluzione non inferiore a 0,5 °C.

Il sensore può essere posizionamento in prossimità degli strumenti di misura dello spostamento al fine di misurare, durante l'esecuzione della prova, la variazione della temperatura ambientale, così da poter effettuare eventuali correzioni alle misure rilevate dai trasduttori. Quest'ultime potrebbero essere poi facilmente gestite attraverso delle condizioni imposte con la programmazione Labview.

Durante le fasi di montaggio dei sensori, un problema che si riscontra frequentemente, sta nel fatto che l'azzeramento, eseguito su ogni sensore, non viene mantenuto dagli stessi fino all'inizio delle prove. Questo può influire sulla precisione delle misure. Per ovviare a questo problema, sarebbe utile creare un processo di compensazione in LabVIEW che possa correggere le varie misure sulla base di quella di partenza, garantendo così maggiore precisione nelle rilevazioni.

## CONCLUSIONI

In conclusione, questo lavoro ha dimostrato che l'utilizzo delle tecnologie wireless in combinazione con un sistema di programmazione Labview sono molto efficienti per acquisire e controllare i sensori utilizzati nelle prove di indagine. Tuttavia, nonostante i molti vantaggi di cui abbiamo discusso nel capitolo precedente, questa tecnologia presenta anche alcuni limiti che devono essere gestiti. L'azienda Labortec mi ha messo a disposizione tutti i vari sensori e dispositivi di comunicazione necessari per poter analizzare e sviluppare l'ambiente Labview, e anche se non ci è stato possibile eseguire la prova in cantiere a causa delle politiche dell'azienda in merito alla sicurezza, sono riuscito comunque a simulare il funzionamento in laboratorio.

Per concludere, siamo riusciti a mostrare come il contributo dell'evoluzione delle tecnologie per il controllo e l'acquisizione dei sensori rappresenti, in combinazione con un software di programmazione, una soluzione molto efficiente e versatile. Ciò rappresenta sicuramente un passo importante verso l'espansione futura nei vari ambiti di lavoro.



## BIBLIOGRAFIA

- "Terremoti in Italia: rischi e prevenzione" di A. Amato  
"La vulnerabilità sismica delle strutture in muratura in Italia" di F. Guadagnini  
<https://www.chiesaoggi.com/arch-indagini-diagnostiche-edifici/>
- D.M. 14 gennaio 2008 – Norme tecniche per le costruzioni  
S. Lombardo, V. Venturi – Collaudo statico delle strutture – Dario Flaccovio Editore  
S. Martinello – Prove in sito – Pubblicato da 4Emme Service S.p.a.  
A. Zizzi, S. Mineo, S. Bufarini, V.D’Aria – Controlli e verifiche delle strutture di Alessandrini F., PALI E FONDAZIONI SU PALI SECONDO LE N.T.C. 2008”, STM International ([www.astm.org](http://www.astm.org))  
American Society of Civil Engineers ([www.asce.org](http://www.asce.org))  
Institute of Electrical and Electronics Engineers ([www.ieee.org](http://www.ieee.org))  
Zigbee Alliance ([www.zigbee.org](http://www.zigbee.org))  
National Instruments ([www.ni.com](http://www.ni.com))  
ASTM, American Society for Testing and Materials, 'C 1196-91, Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry stimated using flatjack measurements", 1991.  
"Evaluation of Load Capacity of Concrete Floor Slabs" di Y. L. Mo, L. H. Han, pubblicato su "Journal of Testing and Evaluation" ([jte.sagepub.com](http://jte.sagepub.com))  
"Labview in Structural Engineering" di T. V. Reddy, pubblicato su "Journal of Computing in Civil Engineering" ([ascelibrary.org](http://ascelibrary.org))  
IEEE Standards for Wireless Sensors in Structural Monitoring" di Y. C. Hsu, W. J. R. Kirwan, pubblicato su "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement" ([ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org))  
"Tecnologie wireless per il controllo strutturale" di D. Chiappini e F. Boccia  
"Applicazioni della tecnologia wireless in ingegneria strutturale" di R. Longo e M. Crescenzi  
<https://www.indaginistrutturali.it/prove-di-carico/>  
<https://www.ingenio-web.it/articoli/edifici-esistenti-scegliere-la-tecnica-diagnostica-ottimale-a-seconda-della-tipologia-strutturale/>  
<https://www.chiesaoggi.com/arch-indagini-diagnostiche-edifici/>  
[http://www.labortecgroup.it/#aree\\_intervento](http://www.labortecgroup.it/#aree_intervento)  
<https://www.indaginistrutturali.it/prove-con-carichi-concentrati/>  
<https://www.studiogeologicobellucci.it/indagini-sismiche/>  
<https://www.indaginistrutturali.it/>  
<https://www.pcq-srl.it/indagini-diagnostiche-strutturali/>  
<https://www.ingenio-web.it/articoli/prove-su-edifici-esistenti-indagini-strutturali-srl-tra-i-primi-laboratori-autorizzati/#:~:text=Nello%20specifico%2C%20Indagini%20Strutturali%20continuer%20del%20Ministero%20dei%20Lavori>

