AVVISO PUBBLICO PER IL SOSTEGNO ALLE MPMI CAMPANE NELLA REALIZZAZIONE DI PROGETTI DI TRASFERIMENTO TECNOLOGICO E INDUSTRIALIZZAZIONE
PROGETTO – CONSERVAZIONE DI SOLAI ESISTENTI CON SISTEMA HMD- HUMIDITY AND MOVEMENT DETECTION - SOGGETTO PROPONENTE - BRT S.r.l. - CUP B67H22002920007

"CONSERVAZIONE DI SOLAI ESISTENTI CON SISTEMA HMD"

HMD
Humidity and Movement Detection

BRT
ENGINEERING·FIELD·INNOVATION

Sede legale: Viale Maria Cristina di Savoia n. 9 – 80122 Napoli
Sede operativa: Via Antiniana n. 2F – 80078 Pozzuoli (NA)
Partita Iva e Codice Fiscale: 06503661214
+39 081 5703032 | ufficio.tecnico@brtnet.it | www.brtnet.it

1. INTRODUZIONE 5
1.1. Il progetto 5
1.2. L'Azienda 6
1.3. Obiettivi strategici del progetto 8
1.4. Pianificazione e gestione delle attività 12
2. OR-1: RICERCA DEI SENSORI IDONEI ALLA MISURAZIONE DEI DATI DI INTERESSE 14
2.1. Analisi della fenomenologia sfondellamento dei solai 14
2.1.1. Definizione di "sfondellamento" 19
2.1.2. Cause dello sfondellamento 20
2.1.3. Segnali indicatori dello sfondellamento 31
2.1.4. Metodi di indagine dei solai 34
2.1.5. Metodologie non distruttive 38
2.1.6. Metodologia BRT: Quantificazione del rischio sfondellamento 41
2.1.7. Soluzioni anti-sfondellamento 48
2.2. Determinazione dei parametri oggetto di monitoraggio 52
2.2.1.1. Definizione di umidità 54
2.2.1.2. Umidità assoluta (AH) 54
2.2.1.3. Umidità specifica 54
2.2.1.4. Umidità relativa (RH) 55
2.3. Sviluppo del software per l'analisi dei dati 56
2.4. Ricerca industriale dei sensori idonei ai parametri di monitoraggio 56
2.4.1. Sensore di umidità e temperatura 57
2.4.1.1. Funzionamento 57
2.4.1.2. Sensori capacitivi 58
2.4.1.3. Sensori resistivi 59
2.4.1.4. Ricerca industriale sensori di umidità e pressione 61
2.4.2. Sensore di pressione 64
2.4.2.1. Funzionamento 64

2.4.2.2. Tipi di misurazione della pressione 66
2.4.2.3. Ricerca industriale sensori di pressione 67
2.4.3. Sensori di movimento 69
2.4.3.1. Sensori accelerometrici e giroscopici 69
2.4.3.2. Ricerca industriale dei sensori accelerometrici e giroscopici 72
2.4.4. Sensore magnetico 74
2.4.4.1. Funzionamento 75
2.4.4.2. Ricerca industriale sensore magnetico 80
2.4.5. Sensore di misurazione del tempo di volo (TOF) 82
2.4.5.1. Funzionamento 83
2.4.5.2. Ricerca industriale sensori TOF 84
2.5. Stato dell'arte 87
2.5.1. Panoramica delle metodologie di indagine delle strutture 88
3. OR-2: REALIZZAZIONE DEL SISTEMA COMPOSTO (SENSORE E GESTIONE DATI) . 96
3.1. Assemblaggio del sistema HMD 98
3.1.1. Progettazione del PCB e selezione del microcontrollore 98
3.1.2. Sensori e protocollo di comunicazione 98
3.1.3. Sviluppo delle tracce e gestione dell'alimentazione 99
3.2. Hardware per calcolo numerico hpc (high performance computing) 100
4. OR-3: SVILUPPO DI UN APPLICATIVO PER L'ANALISI DEI DATI MISURATI 106
4.1. Sviluppo del software per l'analisi dei dati 106
4.2. Python 108
4.2.1. Caratteristiche 109
4.2.2. Dettagli tecnici - La schell e gli editor per python 111
4.2.3. Gestione degli errori 111
4.2.4. Python nella ricerca scientifica 112
4.3. Software di acquisizione dati e hardware a supporto 121
4.3.1. Il Software di comunicazione 121

4.3.2. Software di post elaborazione dati 122
4.3.3. Software di visualizzazione dati su interfaccia Web 122
4.4. Tecniche di Schermatura e Filtraggio del Segnale 127
5. OR-4: ESECUZIONE DI PROVE SPERIMENTALI 129
5.1. Realizzazione strutture 129
5.1.1. Struttura metallica di sostegno 140
5.1.1.1. Norme di riferimento 140
5.1.1.2. Descrizione 140
5.1.1.3. Materiali 142
5.1.1.4. Modellazione strutturale 143
5.1.1.5. Azioni 145
5.1.1.6. Sollecitazioni 145
5.1.1.7. Verifiche strutturali 147
5.2. Analisi solaio esistente 149
5.3. Ubicazione sensori 154
6. OR-5: VALIDAZIONE DEL SISTEMA IN LABORATORIO 159
6.1. Sperimentazione eseguita 159
6.1.1.1. Monitoraggio ambientale non controllato 164
6.1.1.2. Monitoraggio ambientale controllato (idrobox) 166
6.1.1.3. Risultanze monitoraggio ambientale 170
6.1.2. Monitoraggio vibromeccanico 170
6.1.2.1. Monitoraggio vibromeccanico controllato 171
6.1.2.2. Monitoraggio vibromeccanico non controllato 199
6.2. Sviluppo applicativo di allarmistica automatizzata 202
7. OR-6: VALIDAZIONE DELLA TECNOLOGIA IN AMBIENTE RILEVANTE 204
7.1. Descrizione delle condizioni al contorno 204
7.2. Sperimentazione eseguita 210
8. DIFFUSIONE DEI RISULTATI DI PROGETTO 219

9. CONCLUSIONI 222
9.1. Sviluppi futuri 226
10. BIBLIOGRAFIA 231

BRT

1. INTRODUZIONE

1.1. IL PROGETTO

La società BRT (BRT – Engineering – Field – Innovation S.r.l.) propone lo sviluppo e l'industrializzazione di una tecnologia finalizzata alla conservazione dei solai in latero-cemento esistenti, alla salvaguardia dell'incolumità delle persone e alla tutela dei beni materiali.

Il progetto intende soddisfare i fabbisogni di sicurezza degli utenti delle strutture esistenti, con particolare riguardo agli edifici pubblici. Nella fattispecie, si propone lo sviluppo di una tecnologia atta a prevenire il rischio sfondellamento dei solai esistenti. Si precisa che con il termine **sfondellamento** si intende il distacco e la caduta dei copriferri dei travetti, del fondello inferiore della pignatta e delle finiture.

L'idea alla base del progetto prevede l'utilizzo di sistemi in grado di individuare in tempo utile le cause che innescano lo sfondellamento, quali ad esempio umidità, infiltrazioni ed invetchiamento, al fine di programmare degli specifici interventi di manutenzione e/o ripristino. In questo modo è possibile prevenire i crolli e/o distacchi di copriferri, laterizi e finiture e, quindi preservare la sicurezza delle persone e quella dei beni mobili ed apparecchiature. Nell'edilizia scolastica, ad esempio, il pericolo sfondellamento è di assoluto rilievo in quanto, molti dei fabbricati/edifici esistenti, sono stati costruiti tra gli anni '50 e '70, durante il boom economico ed edilizio, periodo in cui, oltre a non detenere approfondite conoscenze sulla durabilità e prestazionalità dei materiali, si poneva una scarsa attenzione alla qualità costruttiva ed alla effettiva efficienza dei materiali impiegati.

Il pericolo di sfondellamento risulta maggiore nei casi in cui è presente un controsoffitto che non consente la visione dei segnali di allarme che indicano la presenza di criticità nel solaio.

1.2.L'AZIENDA

La BRT ha messo a disposizione un variegato gruppo di professionisti per raggiungere l'obiettivo del presente progetto. In particolare, sono state schierate in campo competenze trasversali e diversificate, che vanno dall'ingegneria edile, metcanica, informatica ed elettrica, per trattare al meglio le diverse problematiche che si sono presentate durante le varie fasi di ricerca.

Inoltre, come società di ingegneria, ci si pone l'obiettivo di promuovere e stimolare lo sviluppo tecnologico, promuovendo ed incentivando la partecipazione ai bandi di ricerca e potenziando le risorse umane a supporto di tali attività.

La BRT è un'azienda che offre servizi di ingegneria edile, civile, strutturale, impiantistica e di telecomunicazioni ed inoltre, è specializzata nella realizzazione di infrastrutture tecnologiche per gli impianti di telecomunicazioni.

La pluriennale esperienza nel campo delle telecomunicazioni e dell'ingegneria integrata (edile, civile, strutturale, impiantistica), nonché l'utilizzo di tecnologie avanzate in grado di garantire qualità e innovazione dei servizi offerti e l'acquisizione di competenze tecniche specialistiche, hanno permesso all'azienda di sviluppare rapporti di collaborazione con partner qualificati (TIM, Fastweb, Inwit, Cellnex, Tangenziale di Napoli) per le attività tecnologiche e con clienti come Esercito Italiano, Rai Way ed enti pubblici (strutture ospedaliere di primaria rilevanza nazionale, quali A.O.R.N Cardarelli e Policlinico "Federico II" di Napoli) per le attività di ingegneria civile e strutturale.

La BRT ha una struttura tale per cui le principali funzioni/divisioni sono:

- Amministrazione e Controllo
- Engineering
- Field Operation
- System Integration

La BRT è un'azienda di *total service* strutturata in differenti divisioni:
ENGINEERING, FIELD OPERATION and INNOVATION.

Offre servizi di:
- progettazione architettonica, strutturale, impiantistica, validazione progetti, direzione lavori, collaudi statici e tecnici-amministrativi, sicurezza in fase di progettazione ed esecuzione, verifiche strutturali;
- progettazione impianti di telecomunicazioni, in ambito FTTH, esecuzione lavori ed interventi di manutenzione.

La BRT possiede i seguenti **Sistemi di Gestione** certificati:
- un sistema di gestione per la qualità (**SGQ**) certificato (ISO 9001);
- un sistema di gestione ambientale (**SGA**) certificato (ISO 14001);
- un sistema di gestione per la salute e la sicurezza sul lavoro (**SSL**) certificato (ISO 45001).

Sistema di Gestione Integrato (SGI)

ISO 9001:2015 ISO 14001:2015 ISO 45001:2018

La funzione/divisione "Amministrazione e Controllo" raggruppa le attività di Gestione Amministrativa, Logistica e Tecnica di tutti i processi aziendali.

La divisione "Engineering" raggruppa le attività relative alla Progettazione, Direzione Lavori, Collaudi, Coordinamento Sicurezza nei settori civile, industriale, terziario e tecnologico, rivolgendosi al mercato delle Pubbliche Amministrazioni, Enti Privati, oltre che agli Operatori Telefonici operanti sul territorio nazionale.

La divisione "Field Operation" raggruppa le attività di Realizzazione e Manutenzione di impianti tecnologici, nonché a quelle di Manutenzione Edile.

La divisione di "System Integration", raggruppa tutte le attività di ingegnerizzazione e realizzazione di nuovi impianti, sperimentazioni ed attività on site.

Oggi la BRT si distingue sul mercato di riferimento soprattutto per l'elevato grado di trasversalità delle competenze e la capacità di rispondere alle diverse esigenze dei propri clienti.

Inoltre, l'azienda negli ultimi anni ha perseguito una politica di differenziazione delle proprie produzioni puntando su:

- qualità dei servizi mediante investimenti in R&S (ricerca e sviluppo) e innovazione di prodotto che le hanno consentito di offrire soluzioni di più alto valore per il mercato di riferimento;
- implementazione di politiche di efficientamento dei costi e innovazioni di processo che hanno consentito di offrire i propri servizi a prezzi vantaggiosi rispetto alla concorrenza.

La BRT ha stipulato un Accordo di collaborazione tecnologica e commerciale sottoscritto in data 19/04/2022 con Campania Digital Innovation Hub costituito il 24 luglio 2017 dalle Associazioni Territoriali Campane di Confindustria (Unione Industriali Napoli, Confindustria Avellino, Confindustria Benevento, Confindustria Caserta, Confindustria Salerno) e dall'ANCE Campania e fa parte della rete nazionale degli Hub di Confindustria, con lo scopo di creare una comunità collaborativa incentrata sulle tecnologie digitali e sui nuovi modelli di business in grado di migliorare la competitività delle imprese, indirizzandole verso i partner che possono aiutarle durante il percorso di trasformazione digitale. Un'attenzione particolare è rivolta alle PMI, che talvolta hanno difficoltà ad identificare le loro criticità o le potenzialità o a raggiungere i provider di innovazione per la realizzazione del nuovo paradigma Industry 4.0.

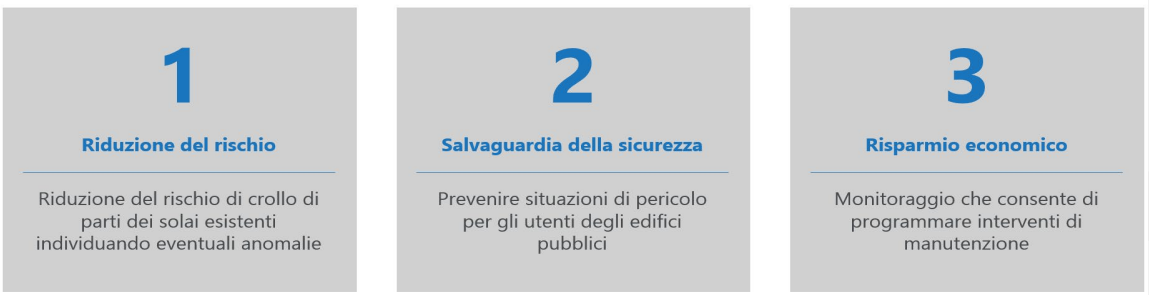
Campania DIH Digital Innovation Hub RETE CONFINDUSTRIA

L'accordo prevede una collaborazione tra Industrie, Centri di Ricerca e altri attori istituzionali sulle tematiche di interesse comune.

1.3. OBIETTIVI STRATEGICI DEL PROGETTO

Con il presente progetto di ricerca e sviluppo si è voluto proporre lo sviluppo e la futura industrializzazione di una tecnologia finalizzata alla conservazione dei solai in latero-cemento esistenti, alla salvaguardia dell'incolumità delle persone e alla tutela dei beni materiali.

Nello specifico con il presente progetto di ricerca e sviluppo ci si pone i seguenti obiettivi:



1. **Riduzione del rischio**

Il primo obiettivo strategico del progetto è la riduzione del rischio di cedimento dei solai latero cementizi. Questo obiettivo si basa sull'adozione di tecnologie di rilevamento avanzate che permetteranno di monitorare costantemente le condizioni di degrado strutturale dei solai, individuando eventuali anomalie in tempo reale. In questo modo, sarà possibile prevenire il rischio di cedimento dei solai, garantendo la salvaguardia degli edifici pubblici.

2. **Salvaguardia della sicurezza**

Il secondo obiettivo strategico del progetto è la salvaguardia della sicurezza e dell'incolumità degli utenti. L'installazione di sensori di rilevamento dell'umidità e del movimento all'intradosso dei solai permetterà di prevenire eventuali situazioni di pericolo per gli utenti degli edifici pubblici. In caso di anomalie strutturali, il sistema di monitoraggio centralizzato permetterà di segnalare tempestivamente eventuali rischi, in modo da consentire di programmare le idonee misure preventive.

3. **Risparmio economico**

Il terzo obiettivo strategico del progetto è il risparmio economico derivante dalla prevenzione di danni strutturali. L'adozione di tecnologie avanzate di rilevamento e il monitoraggio costante delle condizioni strutturali dei solai, permetterà di prevenire eventuali danni strutturali, riducendo i costi di manutenzione e riparazione degli stessi impalcati, nonché degli eventuali danni a carico di altre componenti edilizie degli edifici nella loro globalità.

Per raggiungere tali obiettivi si è previsto l'utilizzo di sistemi in grado di individuare in tempo utile i valori "anomali" delle cause che innescano lo sfondellamento, quali ad esempio l'umidità, infiltrazioni ed eventuale distacco di materiali (intonaco, fondelli pignatte, copriferro c.a.), così da consentire calibrati interventi di manutenzione. In questo modo è possibile evitare di mettere a rischio la sicurezza delle persone, intervenendo prima dello sfondellamento del solaio.

Il pericolo di sfondellamento risulta maggiore in caso di presenza di controsoffitto, perché impedisce un immediato riscontro dei segnali di allarme (macchie di umidità, quadri fessurativi, muffe, efflorescenze etc), premonitori della presenza di criticità nel solaio esistente.

I vari sensori sono stati collegati via cavo ad una centrale di controllo, dotata di software dedicato, in grado di trasformare gli input (dati misurati dai sensori) in output da analizzare per valutare il possibile innesco del metcanismo di sfondellamento. In particolare, sono state impostate delle soglie limite al superamento delle quali scatta un "alert" da parte del sistema. La centrale di controllo è stata collegata, tramite tecnologia GPRS (General Packet Radio Service), ad un dispositivo di controllo (ad esempio un tablet) per la visualizzazione degli output elaborati. La proposta progettuale ha previsto l'utilizzo di tecnologie esistenti e ampiamente commercializzate, costituite per l'appunto da sonde, sensori e centrali di acquisizione dati, ideate per scopi differenti da quello oggetto di studio.

Sul mercato, al momento, non esistono tecnologie simili che consentono di individuare preventivamente il fenomeno dello sfondellamento dei solai con controsoffitto. Pertanto,

l'introduzione di questa nuova tecnologia "composta" contribuisce ad una innovazione nel campo della diagnostica e della prevenzione del rischio sfondellamento.

La sperimentazione prevista nel presente progetto di ricerca e sviluppo ha consentito di portare il prototipo ad un Total Readness Level pari a 5, corrispondente alla validazione in ambiente rilevante.

	TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)
1	Osservati i principi fondamentali
2	Formulato il concetto della tecnologia
3	Prova di concetto sperimentale
4	Tecnologia convalidata in laboratorio
5	Tecnologia convalidata in ambiente (industrialmente) rilevante
6	Tecnologia dimostrata in ambiente (industrialmente) rilevante
7	Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo
8	Sistema completo e qualificato
9	Sistema reale provato in ambiente operativo

	ATTIVITÀ
OR 1	Ricerca di sensori idonei alla misurazione dei dati di interesse
OR 2	Realizzazione del sistema composto (sensori e gestione dati)
OR 3	Sviluppo di un applicativo per l'analisi dei dati misurati
OR 4	Esecuzione di prove sperimentali
OR 5	Validazione della tecnologia in laboratorio
OR 6	Validazione della tecnologia in ambiente rilevante
OR 7	Diffusione dei risultati di progetto (conferenza)

Figura 1 – Livelli di maturità tecnologica e relativi criteri di valutazione (disponibile su https://it.wikipedia.org/)

Il dispositivo realizzato è costituito da una rete di componenti cablati, anche se, in una futura fase di certificazione e commercializzazione del prodotto, si prevede un'implementazione di tipo "WSN" (acronimo dell'inglese Wireless Sensor Network), dal punto di vista della trasmissione dati, atta a:

- rendere la rete sensoriale a basso costo;
- rendere il dispositivo, nel complesso, scalabile;
- rendere l'installazione più immediata e versatile, grazie al minore onere necessario;
- rendere facilmente condivisibile l'informazione.

In generale, una rete di sensori wireless (Wireless Sensor Network, WSN) consiste in una rete formata da dispositivi, normalmente con ridotta complessità e grandezza, chiamati "nodi sensori" che possono raccogliere informazioni dall'ambiente circostante e comunicarle attraverso vari mezzi di comunicazione verso "nodi di calcolo" che possono servirsene localmente o in alternativa trasmetterle attraverso l'uso di un gateway verso altre reti (tipicamente internet).

In riferimento alle traiettorie tecnologiche prioritarie della RIS3 Campania, il progetto si colloca perfettamente nel *Dominio Tecnologico-produttivo* dei *Beni culturali turismo edilizia sostenibile*, con particolare riferimento alla *Traiettoria Tecnologica* delle *Tecnologie e sistemi di diagnostica per la conservazione*, inerente *all'Ambito di Intervento* delle *Tecnologie per la conservazione delle opere e degli edifici.*

In sintesi, l'iter di ricerca ha avuto come aspirazione, la creazione di un **sistema di monitoraggio** composto da una fitta rete di sensori (sensori di umidità, sensori di movimento, sensori di temperatura, giroscopi, magnetometri, etc.), installati nei controsoffitti degli edifici. L'acquisizione dati "*in continuo*" per mezzo di un dispositivo (centrale di controllo) e la fase immediata di "*post-proccessing*" hanno consentito di monitorare i dati dei sensori ambientali di pressione, umidità e temperatura, nonché quelli di movimento (misura vibrazioni tramite accelerometro, giroscopio, magnetometro e tof) con la finalità di individuare delle soglie di "alert", il cui superamento segnali condizioni ambientali e non, favorevoli all'innesco del fenomeno dello sfondellamento.

1.4. PIANIFICAZIONE E GESTIONE DELLE ATTIVITÀ

Il Team di progetto è composto da ingegneri civili/edili, architetti, geometri ed ingegneri delle telecomunicazioni con pluriennale esperienza nei rispettivi settori di intervento, da tecnici IT e TLC esperti nell'integrazione e nell'installazione di sistemi complessi, oltre a giovani ingegneri a supporto delle attività proposte.

La squadra ha maturato, complessivamente, numerose esperienze in ambito strutturale ed in particolare sulla risoluzione delle criticità individuate negli edifici esistenti. Un'esperienza di rilievo ha riguardato l'analisi e la progettazione degli interventi anti-sfondellamento per i solai dell'Azienda Ospedaliera di Rilievo Nazionale "Antonio Cardarelli" di Napoli; durante il corso di tale attività è

stato possibile appurare le effettive problematiche, nonché i disagi per le utenze ed il personale ospedaliero a causa dello sfondellamento dei solai esistenti nei vari padiglioni ospedalieri.

Nella prima fase si è proceduto alla ricerca e selezione dei sensori idonei all'utilizzo previsto nel progetto. Successivamente, è stata eseguita una analisi di fattibilità sia tecnica sia economica, affinché i prodotti scelti potessero essere tecnicamente validi ed avere un costo limitato.

Nella seconda fase sono state unite le funzionalità dei sensori, della centrale e del dispositivo di controllo per creare un sistema composto, in grado di misurare i dati di input ed avviare le elaborazioni necessarie per la definizione e la visualizzazione dell'output.

Nella terza fase è stato sviluppato un applicativo per la gestione e l'elaborazione dei dati misurati dai sensori.

Nelle fasi quarta e quinta sono state eseguite prove sperimentali ed è stata effettuata la validazione del sistema in laboratorio, per accertare il corretto funzionamento del prodotto ed il soddisfacimento degli standard previsti.

Nella sesta ed ultima fase è stata effettuata la validazione della tecnologia in ambiente rilevante.

Il presente lavoro di ricerca e sviluppo è stato suddiviso nei seguenti Obiettivi Realizzativi (OR):

OBIETTIVI REALIZZATIVI	SISTEMA HMD *Humidity and Movement Detection*
	ATTIVITA'
OR 1	Ricerca di sensori idonei alla misurazione dei dati di interesse
OR 2	Realizzazione del sistema composto (sensori e gestione dati)
OR 3	Sviluppo di un applicativo per l'analisi dei dati misurati
OR 4	Esecuzione di prove sperimentali
OR 5	Validazione del sistema in laboratorio
OR 6	Validazione della tecnologia nell'ambiente rilevante
OR 7	Diffusione dei risultati di progetto (conferenza)

Figura 2 – Obiettivi realizzativi progetto HMD

2. OR-1: RICERCA DEI SENSORI IDONEI ALLA MISURAZIONE DEI DATI DI INTERESSE

Il primo Obiettivo Realizzativo, denominato "Ricerca di sensori idonei alla misurazione dei dati di interesse", ha riguardato l'attività di ricerca che ha interessato, trasversalmente, tutte le fasi del progetto, a partire dallo studio della fenomenologia tecnica dello sfondellamento dei solai, all'HardWare (HW) del sistema composto ed alla progettazione e definizione dell'architettura hardware e software del sistema HMD. In particolare, l'attività di ricerca industriale si è incentrata sull'individuazione dei sensori più idonei agli scopi della sperimentazione.

La Ricerca Industriale, infatti, è una ricerca pianificata con indagini miranti ad acquisire nuove conoscenze, da utilizzare per mettere a punto nuovi prodotti, processi o servizi o per consentire un miglioramento degli stessi. Comprende, inoltre, la creazione di componenti di sistemi complessi.

Pertanto, l'OR-1 è stato a sua volta suddiviso nelle seguenti attività:

- Determinazione cause del fenomeno sfondellamento;
- Individuazione dei parametri fisici da monitorare;
- Determinazione del sistema composto monitoraggio e acquisizione dati;
- Individuazione dei sensori idonei agli scopi di progetto.

2.1. ANALISI DELLA FENOMENOLOGIA SFONDELLAMENTO DEI SOLAI

Nella prassi comune il progettista, durante le fasi di realizzazione di un solaio, è solito interrogarsi su come la struttura dovrà sostenere i "carichi" (pesi propri e di esercizio) e su come le varie sollecitazioni indotte potranno o meno causarne deformazioni, vibrazioni ed eventuali danneggiamenti (perlopiù delle finiture estradossali: pavimenti, rivestimenti, murature...); non sempre lo stesso peso viene invece dato ad alcuni aspetti (sia sul piano prettamente normativo che

della prassi progettuale) relativi alle conseguenze che una o l'altra scelta tecnologica e realizzativa possa avere, al trascorrere del tempo, oppure su come le differenti modalità di finitura degli intradossi possano o meno sposarsi con l'utilizzo degli ambienti. Tali riflessioni divengono ancor più indispensabili nell'ambito delle strutture esistenti, in quanto può non essere sufficiente indagare sulla resistenza, robustezza, deformazione, rigidezza, etc… dei solai, ma risulta necessario porsi (anche) altri interrogativi riguardo al materiale costituente il solaio ed agli elementi accessori presenti su di esso, e specificamente:

- sui materiali costituenti l'intradosso: pignatte, tavelle, calcestruzzo, etc…;
- sulle tipologie di finiture presenti: intonaco, controsoffitto, etc…;
- sulla presenza o meno di parti appese: impianti di illuminazione, riscaldamento, scarichi;
- su come i componenti eventualmente appesi siano ancorati al solaio: se cioè i fissaggi (pendinature) sono stati opportunamente dimensionati e progettati;
- se è stata valutata l'adeguatezza del materiale impiegato alla destinazione degli ambienti: in relazione ad umidità, escursioni termiche, vibrazioni, fenomeni di fatica.

Non è infatti insolito trovarsi difronte a strutture, apparentemente, in buono stato di conservazione sul piano prettamente statico, e che però possono denotare in maniera improvvisa, ed imprevedibile, problemi di distacco di porzioni di intonaco, di fondelli di pignatte o di controsoffitti (quest'ultimo fenomeno legato o meno a quello dello sfondellamento). Le cause di ciò, come già accennato, sono da trovare talvolta in problemi di origine strutturale, ma più frequentemente possono essere motivati da aspetti del tutto indipendenti dai primi. Ancora oggi si rileva una scarsa sensibilità a tali problematiche, forse dovuta ad una non sufficiente preparazione o conoscenza da parte dei tecnici coinvolti, ma sicuramente ad una limitata memoria storica su episodi che negli anni invece si sono

ripetuti con maggiore o minore gravità e frequenza. Basti pensare che solo nell'anno 2015 si sono verificati circa 200 episodi di caduta dall'alto di "componenti non strutturali"; tale dato rappresenta, chiaramente, che uno dei pericoli più frequenti per gli occupanti gli ambienti è quello del distacco dai solai di "componenti non strutturali".

Figura 3 – Casi di sfondellamento nella Penisola Italiana (Fonte: Mecatti _ sfondellamento dei solai e caduta dei controsoffitti).

CAGLIARI	Soffitto "casa dello studente"	**AGRIGENTO**	
CARRARA		**BOLOGNA**	Appartamento privato
FIRENZE	Teatro a Campi Bisenzio	**ANCONA**	
GORIZIA		**ANZIO**	
IMPERIA	Soffitto sala operatoria	**ASTI**	
LETCO		**BELLUNO**	Controsoffitto
LIVORNO		**BRESCIA**	Caduta soffitti in asilo nido appena ristrutturato
MODENA		**CAGLIARI**	
NAPOLI	Controsoffitto	**CATANIA**	Tunnel pronto soccorso

OLBIA	Caduta corpi illuminanti, scuola dichiarata inagibile	**MESTRE**	Sanità
OSTUNI	Feriti 2 bambini	**MILANO**	
PALERMO		**OSTIA**	
RAGUSA	Tribunale	**PESCARA**	Soffitto e controsoffitto Università: 1 ferito
RAVENNA		**POZZUOLI**	
RIVOLI		**ROVIGO**	Uffici pubblici
		SANREMO	Chiusi 6 edifici, 2.000 alunni a casa
SALERNO	Appartamento privato	**SASSARI**	
SAVONA	Controsoffitto	**SASSUOLO**	Controsoffitto teatro
TIVOLI		**SESTO SAN GIOVANNI**	7 feriti
TORINO		**TERAMO**	
VARESE	Controsoffitto	**TRENTO**	

Tabella 1.1 *– Casi caduta di componenti dagli intradossi dei solai nell'anno 2015 (Fonte: Mecatti _ sfondellamento dei solai e caduta dei controsoffitti).*

Per avere una proiezione più completa della potenziale estensione dei rischi legati ai problemi sugli elementi non strutturali (e nello specifico di caduta di componenti dall'alto) si possono richiamare dati (Fonte ISTAT e Centro Studi Consiglio Nazionale Geologi) legati alla estensione del **patrimonio Scolastico ed Ospedaliero**, che di fatto rappresentano edifici, prevalentemente, vetusti e soggetti ad un elevato tasso di affollamento:

	Totale	di cui	
		Pubbliche	Private e no profit
Edifici	63.485	n.d.	n.d.
Superficie delle Unità Locali (m²)	78.455.675	69.826.781	8.628.894
Unità locali	72.801	45.146	27.655
Addetti	1.454.665	1.305.203	149.462

Tabella 1.2 *– Le* ***strutture scolastiche*** *in Italia Elaborazione e stime Centro Studi Consiglio Nazionale Geologi su dati CRESME/SI, ISTAT 2001. (Fonte: Mecatti _ sfondellamento dei solai e caduta dei controsoffitti).*

Regione	Totale		
	Alunni	Classi	Alunni con disabilità
Piemonte	537.274	25.046	13.939
Lombardia	1.181.659	53.135	33.089
Veneto	607.490	28.462	15.620
Friuli Venezia Giulia	146.095	7.282	3.056
Liguria	174.503	8.055	5.137

Regione	Totale		
	Alunni	Classi	Alunni con disabilità
Emilia Romagna	539.281	23.914	14.416
Toscana	478.595	21.571	11.433
Umbria	119.840	5.767	3.134
Marche	217.080	9.867	6.001
Lazio	739.377	33.834	24.240
Abruzzo	179.308	8.684	5.704
Molise	41.800	2.138	1.138
Campania	933.149	45.097	22.893
Puglia	626.808	28.359	15.637
Basilicata	83.554	4.233	1.679
Calabria	294.457	15.142	6.496
Sicilia	769.346	36.849	21.809
Sardegna	212.016	10.906	5.488
Italia	7.881.632	368.341	210.909

Tabella 1.3 *– Le* ***strutture scolastiche*** *in Italia: Alunni, classi, alunni con disabilità per regione – A.S. 2014/2015. (Fonte : Mecatti _ sfondellamento dei solai e caduta dei controsoffitti).*

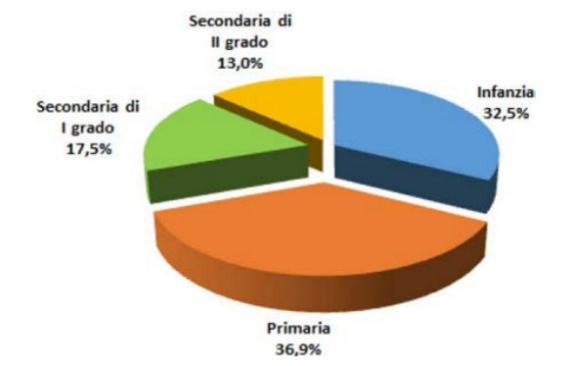


Fig.4 - Sedi scolastiche – A.S. 2014/2015

	Totale	di cui	
		Pubbliche	Private e no profit
Edifici	5.527	n.d.	n.d.
Superficie delle Unità Locali (m²)	28.046.702	22.190.197	5.586.505
Unità locali	2.829	1.222	1.607
Addetti	661.580	530.387	131.193

Tabella 1.4- *Le* ***strutture ospedaliere*** *in Italia: stock, unità locali addetti. (Fonte: Elaborazione e stime Centro Studi Consiglio Nazionale Geologi su dati CRESME/SI, ISTAT 2001 - Mecatti _ sfondellamento dei solai e caduta dei controsoffitti).*

Dai numeri in gioco (estensione delle potenziali superfici interessate, numero di occupanti ed utenti, casi già occorsi), sorgono quindi spontanee domande su quali possano essere le conseguenze, sul piano organizzativo, logistico e della sicurezza, quando si innescano problemi di distacco intonaci, sfondellamento solai o caduta di controsoffitti.

2.1.1. Definizione di "sfondellamento"

Per sfondellamento (o scartellamento) (cfr.fig.5) si intende il distacco e la successiva caduta della parte inferiore dei blocchi di alleggerimento. Un fenomeno tipico dei solai in latero-cemento, in cui le pignatte, ovvero i blocchi inseriti nel getto di calcestruzzo per ottenere l'alleggerimento delle solette, vengono sollecitate al punto di rompersi nella parte inferiore e distaccarsi dal resto del solaio. In realtà questo termine comprende anche altri fenomeni tra cui, distacchi e/o fessurazioni del copriferro e/o dell'intonaco, ossidazione dei ferri di armatura o delle putrelle, distacchi di arelle o di rete intonacata e di ogni altro componente non strutturale che compongono lo strato di finitura dell'intradosso del solaio.

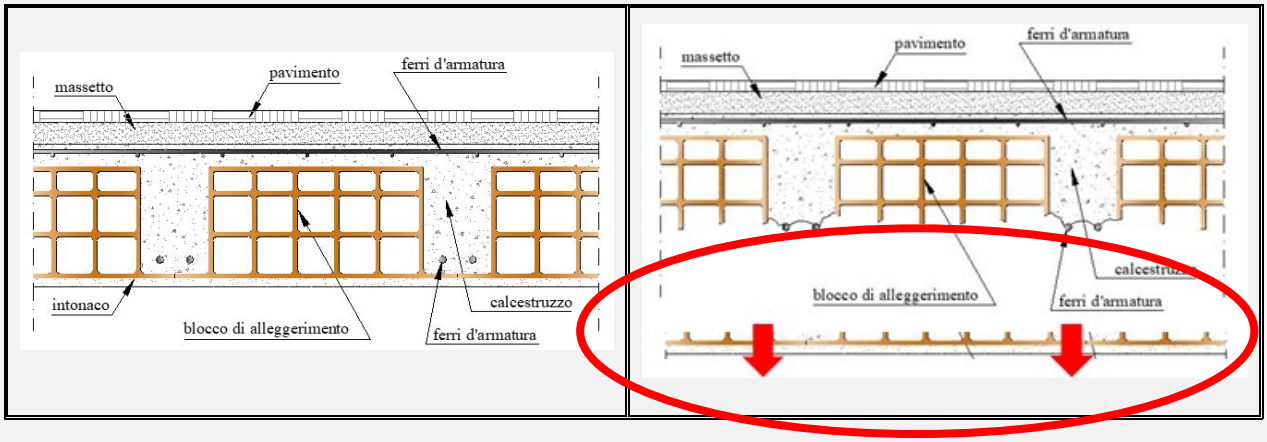


Fig.5 – Fenomeno dello sfondellamento.

Lo sfondellamento non è un problema puramente strutturale, in quanto il solaio in realtà mantiene la sua stabilità statica, ma non può essere sottovalutato perché mette a rischio la sicurezza delle persone.

Lo sfondellamento di 1.00 mq di plafone con intonaco spesso 1.00 cm corrisponde ad un carico di circa 35 kg. L'intonaco, tuttavia, può giungere anche ad uno spessore di 3 cm ed oltre; il carico di uno sfondellamento può quindi arrivare tranquillamente a 75 kg/mq.

Considerando, dunque, che l'estensione di uno sfondellamento riguarda superfici più estese di 1.00 mq, si comprende facilmente come un crollo possa raggiungere carichi molto elevati. In uno sfondellamento esteso, per esempio di 20.00 mq, crolla materiale con un carico fino 1.500 kg.

2.1.2. Cause dello sfondellamento

Le cause che innescano lo sfondellamento non sono mai legate ad un'unica criticità, ma da un insieme di fattori che interagiscono e progrediscono nel tempo provocando il distacco di componenti edilizie, quali intonaco, pignatta/tavellone, copriferro, in forma assemblata o separatamente.

Il fenomeno si manifesta, inizialmente, con l'insorgenza di fratture a livello locale del componente edilizio interessato (intonaco, pignatta/tavellone, copriferro); in altri casi, come ad esempio i controsoffitti, le casistiche "aumentano" poiché maggiori sono i componenti che li costituiscono

(fissaggi, pendinature, orditure, finiture) e più aumentano i "punti di debolezza" del sistema che possono essere oggetto di degrado.

Di seguito si elencano alcune considerazioni sui motivi più ricorrenti:

A. <u>Perdita di aderenza al supporto da parte dell'intonaco;</u>

Origine interna

1) Composizione del materiale;

Intonaci con forti componenti di cemento possiedono grande rigidezza e bassa traspirabilità, sono fisiologicamente predisposti a formazione di cavillature che nel tempo tendono ad estendersi ed a favorire il degrado dello strato cementizio, fino a determinare il distacco di porzioni di intonaco di bassa/media estensione.

Intonaci di gesso possono facilmente attaccare i materiali acciaio-ferrosi con cui si trovano a contatto, come le eventuali armature presenti; ciò, unito ad uno scarso o pressoché nullo spessore di copriferro, può innescare il fenomeno elettrochimico della corrosione. Inoltre, tali materiali risultano particolarmente sensibili ad eventuali piccoli assestamenti del supporto, in quanto fragili e soggetti a rigonfiamento in presenza di umidità o di infiltrazioni.

2) Errori di posa del materiale;

Errori commessi al momento della posa, per errata esecuzione dello strato di rinzaffo, per mancata preparazione dei supporti, intradossi eccessivamente o scarsamente umidi, etc… .

Origine esterna

1) Fattori ambientali/antropici;

- *Umidità eccessiva;*
- *Fenomeno di infiltrazione attivo e/o pregresso;*
- *Escursioni termiche cicliche;*

Eccessive dilatazioni dovute ad escursioni termiche che possono portare, con cicli continui di surriscaldamento e raffreddamento, a fratture per attrito col supporto.

B. <u>Deformazione e frattura delle pignatte con rottura e conseguente crollo;</u>

Origine interna

1) Modalità di preparazione del materiale;

Errori di preparazione del materiale costituente la pignatta durante il processo di estrusione-essiccamento-cottura o riguardanti il raffreddamento dopo la cottura.

2) Errata progettazione della pignatta;

Un disegno errato delle cartelle provoca una concentrazione dello stato tensionale nelle pareti della stessa pignatta con il conseguente distacco del fondello o la rottura interna delle stesse cartelle (fenomeno a breve termine). I primi riferimenti per la progettazione delle strutture di solaio furono pubblicati nella Circolare n. 91 del 1961 e nella UNI 10355 del 1995. Per tale motivo, indicativamente, tutte le costruzioni antecedenti il 1970 presentano tipologie di pignatte "non normate". Considerando che la maggior parte degli edifici scolastici ed ospedalieri sono stati costruiti prima del 1974, si può asserire che buona parte di essi presenta tipologie costruttive degli elementi di alleggerimento (pignatte) potenzialmente rischiose, in quanto realizzate in assenza di codificati processi di costruzione legati alla "buona regola dell'arte".

Origine esterna

2) Errata modalità di getto del calcestruzzo;

Errata modalità di getto del calcestruzzo all'interno dei travetti che lascia spesso esposti i ferri causandone l'ossidazione, con conseguente rigonfiamento e quindi rottura delle alette e dei setti delle

adiacenti pignatte; è fondamentale assicurarsi che il getto avvolga correttamente le armature dei travetti e quindi non si formano i cosiddetti "nidi di ghiaia" ed i vuoti tra armature e pareti del laterizio.

3) ***Fattori ambientali/antropici;***

- *Infiltrazioni e/o umidità;*

Le infiltrazioni sono tra i principali fattori scatenanti il fenomeno dello sfondellamento, perché l'acqua tende ad imbibire il blocco di alleggerimento (pignatta o tavellone) favorendone la dilatazione; tale espansione ingenera coazioni di compressione tra il citato blocco e gli adiacenti travetti in cemento armato, causando la fratturazione dell'elemento più fragile rappresentato dal medesimo blocco di alleggerimento. Siffatta situazione tensionale comporta un rapido e precoce ammaloramento dell'intradosso del solaio.

Inoltre, l'effetto negativo dell'acqua sui ferri d'armatura dei travetti accelera l'insorgere di ossidazione corrosiva (ruggine) e della consequenziale espansione volumetrica delle barre, fino a provocare la fratturazione e distacco dello strato corticale in c.a. (copriferro - cfr. figura n.6), oltre che a generare ingenti compressioni al fondello del blocco di alleggerimento (pignatta o tavellone), finanche a causarne la rottura con successivo crollo.

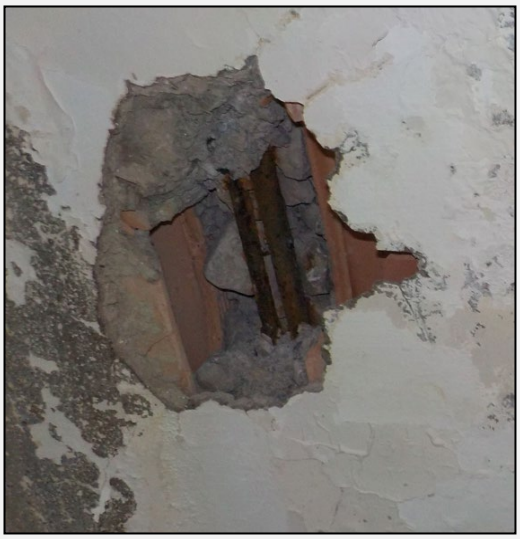


Fig.6 – Fenomeno della corrosione dei ferri d'armatura.

- *Vibrazioni;*

I fenomeni fisici responsabili delle vibrazioni che interessano le costruzioni possono essere di diversa entità e provenienza. È possibile classificare le sorgenti in due distinti gruppi:

1) Sorgente interna all'edificio: macchinari che operano all'interno delle costruzioni, come motori elettrici, gruppi elettrogeni, trasformatori elettrici, strumenti rotativi, piegatrici e tutti gli impianti tecnologici inseriti negli edifici, specialmente nei contesti produttivi;

2) Sorgente esterna all'edificio: traffico veicolare, sia stradale che ferroviario, sia superficiale che sotterraneo, eventi sportivi o musicali all'interno di stadi, attività industriali quali scavi, realizzazione di tunnel, perforazioni, battitura ed infissione di pali ed ovviamente quelle di origine ambientale come vento, terremoti e moti ondosi.

- *Fenomeni termoigrometrici;*

La presenza di dispersioni termiche anomale possono provocare valori delle temperature delle murature inferiori al valore della temperatura di rugiada e quindi favorire la formazione di condense e muffe per effetto della condensazione del vapore acqueo presente nell'aria, accelerando il degrado del materiale.

4) Difetti di progettazione strutturale;

In tale tipologia rientrano:

- la scarsa regolarità in pianta del solaio;
- luci eccessive dei travetti o delle travi portanti a spessore;
- campate affiancate di luce sensibilmente diversa;
- interazione con le strutture di bordo;
- effetti di piastra difficilmente quantificabili.

Tali difetti possono comportare un aumento tenso-deformativo nelle pignatte fino al raggiungimento della massima resistenza meccanica del laterizio e con la conseguente rottura dello stesso (fenomeno a lungo termine). Altri difetti di realizzazione sono riscontrabili principalmente nei solai gettati in opera; essi consistono nella segregazione del calcestruzzo e/o al posizionamento con poco o assente copriferro nei travetti. Il fenomeno di sfondellamento nel caso in esame risulta essere discontinuo e distribuito a macchia sul solaio.

5) Presenza di vincoli "inattesi" e problemi di manutenzione;

- Problema altrettanto deleterio per i solai può essere la presenza di vincoli inattesi e non previsti durante la fase di progettazione (ad esempio la modifica del posizionamento delle partizioni dell'edificio per la riorganizzazione degli spazi interni).
- Interventi ripetuti negli anni senza un vero programma di manutenzione strutturato nel tempo; è il caso dei controsoffitti, degli impianti e dei corpi illuminanti che spesso vengono sospesi al solaio senza particolari accorgimenti costruttivi con tecniche e materiali di fortuna o con ancoranti non idonei.

6) Fenomeno della corrosione;

- Carbonatazione del calcestruzzo;

La corrosione delle armature metalliche è inizialmente indotta dal fenomeno della carbonatazione del calcestruzzo; per carbonatazione del calcestruzzo si intende la formazione di carbonato di calcio nella massa di questo materiale allo stato indurito. Per effetto della carbonatazione diminuisce il pH del calcestruzzo e si stabiliscono le condizioni favorevoli all'ossidazione delle armature metalliche presenti nelle strutture.

In particolare, le sostanze che provocano il fenomeno sono l'anidride carbonica, l'ossigeno e l'acqua, contenuta sotto forma di vapore nell'aria.

Durante la presa e l'indurimento del calcestruzzo i componenti del cemento, quali i composti C_2S e C_3S, sono interessati dalle reazioni di idratazione e formano la famiglia dei composti C-H-S (Calcium-Silicate-Hidraded), e l'idrossido di calcio $Ca(OH)_2$:

$$C_3S + H_2O = C\text{-}H\text{-}S + Ca(OH)_2$$

e

$$C_2S + H_2O = C\text{-}H\text{-}S + Ca(OH)_2$$

L'idrossido di calcio abbassa l'acidità del calcestruzzo, fino a valori del pH maggiori di 13, e la basicità del composto favorisce la passivazione delle armature metalliche, ovvero la formazione di una pellicola di ossido di ferro, F_2O_3, che va a ricoprire i tondini metallici.

La pellicola, impermeabile e compatta, isola la massa dell'armatura dal contatto con l'ossigeno e con l'acqua, impedendo la formazione della ruggine.

Tuttavia, la presenza nella massa del calcestruzzo sia dell'idrossido di calcio derivante dalla idratazione del cemento, sia dell'anidride carbonica legata alla penetrazione dell'aria, provoca la formazione di carbonato di calcio:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3$$

che innalza l'acidità fino a valori del pH minori di 11. La riduzione del pH provoca la depassivazione del ferro, ovvero quella che era la pellicola protettiva dell'armatura diventa porosa ed incoerente, consentendo all'ossigeno ed all'acqua di attaccare l'armatura metallica. L'acqua e l'ossigeno provocano l'ossidazione del ferro secondo la nota reazione:

$$2Fe\ (ferro) + O_2 + 2H_2O = 2\ Fe(OH)_2\ (ruggine)$$

All'ossidazione dell'armatura metallica corrisponde un aumento del volume del metallo, di circa 6-7 volte rispetto al volume iniziale, con conseguente fessurazione del copriferro, prima, ed espulsione

dello stesso, dopo. In conclusione, la carbonatazione non provoca direttamente il degrado del calcestruzzo, né tanto meno quello dell'armatura metallica, ma determina le condizioni favorevoli per l'azione aggressiva dell'ossigeno e dell'umidità ambientali penetrati nella massa del calcestruzzo insieme all'anidride carbonica. L'avanzamento del fenomeno della carbonatazione nella massa strutturale avviene secondo la relazione:

$$x = k \sqrt[n]{t}$$

nella quale:

- x è lo spessore di calcestruzzo interessato dalla carbonatazione, in mm;
- t è il tempo, in anni;
- n è un coefficiente che dipende dalla porosità del conglomerato: n=2 per calcestruzzi porosi, n>2 per quelli compatti;
- k è un coefficiente complesso funzione del rapporto A/C, del titolo del cemento e dell'umidità relativa dell'aria.

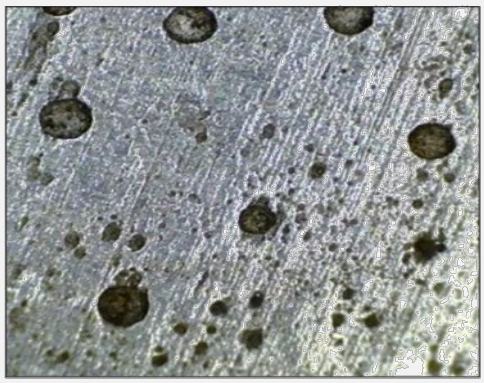
Il rapporto A/C è il rapporto tra il peso dell'acqua efficace (tutta l'acqua presente, meno quella di assorbimento degli aggregati) e il peso di cemento in un metro cubo di calcestruzzo; esso influenza molti parametri quali: resistenza a compressione, ritiro, porosità, permeabilità, capacità di proteggere le barre di armatura, velocità di indurimento. Il coefficiente k assume il valore massimo per una umidità relativa compresa tra il 60 e il 70% ed è tabellato nella specifica norma UNI.

In conclusione, la corrosione delle armature nel calcestruzzo armato, indotta dal processo di carbonatazione del cls, distrugge completamente la pellicola protettiva delle barre e favorisce l'ossidazione delle stesse con conseguente e deleteria espansione.

- Corrosione da cloruri;

Altro fenomeno è l'erosione e/o corrosione alveolare (pitting o vaiolatura) che si manifesta attraverso la comparsa sulla superficie di un materiale di piccoli danneggiamenti dalla morfologia caratteristica, per cause differenti dovute a:

- un attacco corrosivo localizzato;
- a carichi hertziani elevati;
- a cavitazione.



Fenomeno della vaiolatura localizzata (pitting)

La corrosione localizzata per vaiolatura o corrosione per pitting (dall'inglese pit alveolo o foro) è una tipologia di corrosione localizzata che si innesca quando lo strato passivante di ossidi insolubili che si forma sulla superficie dei metalli, a seguito della formazione e di alveoli, viene rotto localmente per effetto degli ioni alogeni (principalmente cloro), determinando l'attivazione del processo di corrosione.

Il pitting si può innescare sia nei metalli a comportamento **elettrochimico attivo** quali le leghe ferrose (acciai al carbonio e debolmente legati, ghise), sia per quelli a comportamento **passivo** come l'acciaio inossidabile, le leghe ferro-cromo-nickel, le leghe di rame, le leghe di alluminio, alluminio, etc… .

La differenza tra i due comportamenti elettrochimici è la seguente:

- **il comportamento elettrochimico attivo** è caratteristico di quei metalli che ossidandosi danno origine a prodotti di corrosione insolubili (es. ruggine) che una volta depositati sul materiale formano un film spugnoso e poco compatto inadatto a impedire il processo anodico e pertanto a passivare il sottostante metallo;
- il **comportamento elettrochimico passivo** è caratteristico di quei metalli che ossidandosi danno origine a prodotti di corrosione insolubili che formano un sottile strato compatto e

continuo capace di impedire il processo anodico e di conseguenza la corrosione del materiale sottostante.

Pertanto, anche i materiali come l'acciaio inossidabile, pur essendo resistenti alla corrosione generalizzata perché hanno una forte tendenza a passivarsi (già se semplicemente esposti all'azione atmosferica), in presenza di ioni cloro capaci di rompere localmente lo strato passivante sono soggetti all'attacco localizzato per vaiolatura.

È soggetto al pericolo di pitting anche il ferro di armatura del calcestruzzo armato.

Infatti gli ioni cloro Cl- (ambiente marino, sali disgelanti) penetrando nella matrice cementizia, anche nel caso di calcestruzzo non carbonatato (pH 12,5 -13), possono dissolvere il film alcalino che protegge le armature innescando la corrosione del metallo sottostante.

Di norma l'idrossido di ferro formatosi in ambiente molto basico (con pH > 11), come si verifica nel calcestruzzo per effetto della presenza della calce, si presenta stabile, denso, compatto e aderente al sottostante supporto metallico e pertanto capace di passivarlo. In presenza di cloruri il film di ossidi diviene invece poroso, permeabile all'ossigeno e all'umidità e quindi non più protettivo per il ferro sottostante (depassivazione del ferro).

Questa azione di distruzione del film protettivo, almeno in condizioni di pH elevato, avviene in forma localizzata nelle zone della superficie delle armature dove si raggiungono determinati tenori di cloruri. Se tali tenori diventano eccessivi, l'attacco può interessare zone più estese, per cui la morfologia tipica del pitting è meno evidente; il meccanismo comunque non cambia.

Per le strutture esposte all'atmosfera si considera come tenore critico un contenuto di cloruri nell'intervallo di 0.4-1% in massa rispetto al cemento.

Questo valore può cambiare significativamente in funzione dei seguenti parametri:

- il potenziale elettrochimico delle armature (che dipende principalmente dal contenuto di umidità del calcestruzzo);
- il pH della soluzione dei pori del calcestruzzo (che dipende principalmente dal tipo di cemento utilizzato);
- la presenza di vuoti all'interfaccia tra il calcestruzzo e l'armatura (che dipende dalla lavorabilità del calcestruzzo e dalla vibrazione);
- la temperatura;
- la composizione delle armature e le loro condizioni superficiali (ad esempio la presenza di ossidi di laminazione).

Pertanto, è possibile affermare che:

- la corrosione da carbonatazione si presenta uniformemente distribuita sulla superficie dell'armatura; è facilmente individuabile anche dall'esterno, in quanto sulla superficie del copriferro si notano macchie di ossido di colore brunastro, tipiche del fenomeno di corrosione dell'acciaio;
- la corrosione da cloruri risulta, in generale, di tipo localizzato con attacchi penetranti, ciascuno di limitata estensione longitudinale, che si configurano come veri e propri crateri (pits), circondati da zone non corrose. La corrosione per **pitting** nei calcestruzzi armati, non essendo accompagnata dalla formazione di ruggine, e quindi da distacco del copriferro, è estremamente pericolosa in quanto il fenomeno non è facilmente rilevabile a occhio nudo.

Iniziato il processo di corrosione, laddove non si eseguano interventi di ripristino strutturale volti a eliminare le cause ed a ristabilire le condizioni iniziali di passività delle armature, le conseguenze dell'attacco corrosivo possono arrivare a compromettere del tutto la struttura.

La riduzione della sezione delle armature implica, infatti, una diminuzione della resistenza a rottura, delle proprietà di deformazione, della resistenza a fatica, della resistenza flessionale e a taglio. Inoltre, a causa dell'espansione dell'ossido, il calcestruzzo circostante si fessura (fino ad arrivare progressivamente alla rottura e all'espulsione del copriferro) esponendo maggiormente le armature agli agenti aggressivi, con conseguente aumento della velocità di corrosione.

La riduzione di sezione, inoltre, può provocare la riduzione di aderenza delle armature e condurre al disancoraggio delle stesse, sia a causa del mancato effetto di confinamento che il copriferro offre sia a causa del "distacco" delle nervature delle barre dall'alloggiamento con il calcestruzzo formatosi nella fase di getto.

Il fenomeno dello sfondellamento non avviene quasi mai per uno solo dei motivi indicati, ma è, in genere, il risultato della presenza di due o più delle cause elencate in precedenza.

2.1.3. Segnali indicatori dello sfondellamento

Lo studio del fenomeno insegna che lo sfondellamento non è improvviso, segue un'evoluzione nel tempo, ed è proprio durante l'evoluzione che è possibile e necessario, agire per contrastare la crescita del fenomeno ed impedire che arrivi a causare rischi.

Lo sfondellamento culmina con un crollo improvviso, ma non è un fenomeno inaspettato; segue infatti un'evoluzione precisa composta da due fasi ben distinte: innesco ed evoluzione.

Durante la fase di innesco possono manifestarsi i primi segnali di allarme che indicano la presenza di criticità nel solaio, quali:

- macchie di umidità e segnali evidenti di infiltrazioni attive e/o pregresse che si manifestano dapprima con la creazione di aloni di colore grigio, giallastro, nero o marrone a seconda della presenza di acqua pulita oppure sporca, e successivamente con danni alla tinteggiatura:

esfoliazione e caduta di piccole scaglie nel caso di tinteggiature sintetiche al quarzo; disgregazione, polverizzazione e formazione di efflorescenze negli intonaci a calce.

- fessurazioni, anche a livello di intonaco, che segnalano movimenti e cambiamenti dell'assetto originale dell'intradosso;

Mentre in fase di evoluzione le criticità riscontrate sull'estradosso dei solai sono:

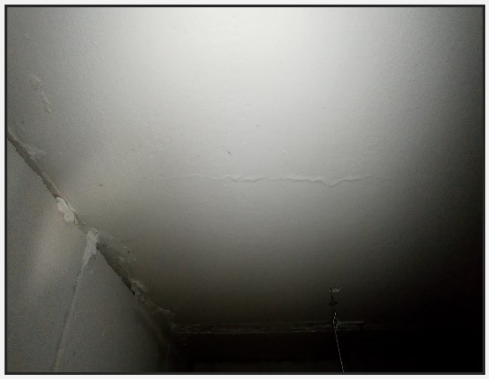
- rigonfiamenti del solaio quali avvallamenti e bombature, che segnalano porzioni in fase di distacco;
- distacchi localizzati che, anche se di estensione limitata, sono in realtà un campanello d'allarme che segnala la possibilità di distacchi in tutte le aree della struttura con analoghe caratteristiche costruttive.
- Armature dei travetti a vista corrosi e/o ossidati.

Capita, inoltre, che lo sfondellamento avvenga senza alcun preavviso visibile ad occhio nudo; pertanto, escludere il rischio con sicurezza è possibile solo attraverso controlli specifici e periodici del solaio. Se invece si manifestano uno o più segnali, è fondamentale non trascurarli; può capitare,

che gli stessi segnali a volte siano confusi con altre tipologie di degrado, ma se correttamente interpretati permettono di prevedere e quindi prevenire uno sfondellamento.

a)

b)



c)

c)

d)

d)

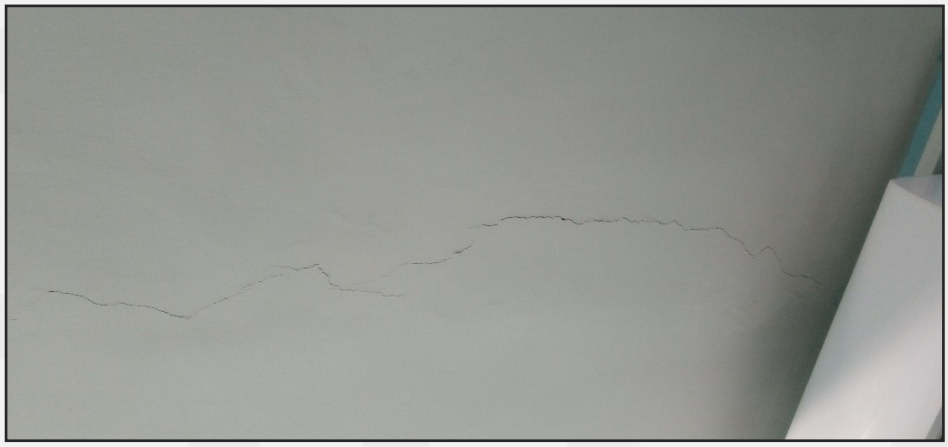

e)

Figura 7 – Esempi di difetti riscontrati su solai esistenti in laterocemento, durante alcuni sopralluoghi eseguiti dalla BRT S.r.l.: a) infiltrazioni con cedimenti di finitura; b) infiltrazioni; c) lesioni/rigonfiamenti sx) cedimenti di intonaco (dx); d) infiltrazioni con cedimenti di intonaco e ferri d'armatura ossidati; e) fessurazioni.

2.1.4. Metodi di indagine dei solai

Si ritiene che la manutenzione preventiva sia l'unico approccio in grado di garantire una reale sicurezza contro lo sfondellamento. Lo scopo della prevenzione, infatti, è quello di mettere in sicurezza gli ambienti prima che avvenga il possibile crollo di materiale, nonostante i sistemi preventivi siano stati progettati per essere applicati anche a sfondellamento avvenuto.

Contro il pericolo improvviso dello sfondellamento l'unica soluzione è il controllo sistematico dell'integrità dei plafoni: tale analisi consente di valutare lo stato del solaio, individuando la presenza di zone ammalorate e quindi a rischio sfondellamento.

In base alla diversa tipologia di controsoffitto ispezionabile (ovvero a pannelli) o non ispezionabile (ovvero continuo) si possono impiegare mirate metodologie di indagine:

- nel caso di controsoffitti ispezionabili l'osservazione viene eseguita rimuovendo temporaneamente un numero di pannelli sufficiente alle osservazioni visive dirette da eseguire;
- nel caso di controsoffitti non ispezionabili le osservazioni sono eseguite mediante analisi termografica e le informazioni sono completate con saggio diretto (carotaggio o micro-carotaggio).

Per le parti ispezionabili e removibili (pannelli) viene valutato il peso dei vari componenti del sistema tenendo anche conto di eventuali elementi appesi, ciò in previsione della successiva fase di prova con carico da applicare alle pendinature portanti del controsoffitto; per ogni tipologia di controsoffitto ispezionabile osservato, sono eseguite prove statiche collegando al sistema di pendinatura un carico proporzionale al peso del controsoffitto; scopo di tale prova è certificarne la stabilità: la prova si svolge applicando un carico noto e per esempio pari al doppio di quello sopportato dal pendino testato (per ottenere cioè un coefficiente di sicurezza ≥ 2 rispetto al peso proprio del controsoffitto).

L'esito della prova consente di valutare la resistenza del supporto, la resistenza allo sfilamento del fissaggio e la verifica della pendinatura in genere (di corpi illuminanti, impianti o carichi puntuali eventualmente presenti).

Tale tipologia di prova è per lo più applicabile laddove la pendinatura sia stata eseguita secondo la regola dell'arte e le indicazioni del produttore del sistema (cfr. UNI EN 13964); viceversa non trova facile o alcuna applicabilità laddove il sistema sia realizzato con altri elementi non standardizzati o con soluzioni "artigianali" (ad es. fili di ferro, profili riadattati, fissaggi improvvisati e così via).

Tutte le informazioni note ed i risultati delle valutazioni susseguenti le indagini confluiscono infine in una planimetria ("mappatura") che esprime sinteticamente ed in maniera immediatamente leggibile la gravità o meno dei problemi riscontrati.

A completamento o in affiancamento alle indagini preventive (termografia, endoscopia, saggi, battitura) può essere poi necessario impiegare test specifici per valutare la possibilità di messa in opera dei presidi anti-sfondellamento eventualmente necessari a seguito delle valutazioni svolte e la loro effettiva riuscita (in sede di collaudo); è consigliabile effettuare test di estrazione (ante e post operam) per valutare sia l'effettiva fattibilità dell'intervento (installazione dei fissaggi atti a sostenere i presidi anti-sfondellamento) sia la reale portata dei fissaggi installati e la loro rispondenza alle premesse progettuali.

Ciò può essere realizzato con:

- test di estrazione preliminari con ancoranti comunemente in commercio per vagliare le possibilità di fissaggio o meno alle strutture portanti;
- test di estrazione post operam per valutare la posa degli ancoranti impiegati rispetto alle ipotesi di progetto ed affidabilità degli stessi nelle condizioni reali.

In questa fase si possono riscontrare immediatamente i fenomeni di sfondellamento in essere verificando, a seguito della pressione sull'intradosso (fondello), distacchi di parti che apparentemente coese al di sotto dell'intonaco sono già staccate dal supporto, ovvero accertare il distacco in atto dell'intonaco stesso: più diffusamente la diversa risposta sonora della superficie alla battitura dà un'indicazione sullo stato in cui versa il solaio e sull'eventuale stato di avanzamento del fenomeno con possibile interpretazione delle difettosità legate alla presenza di fratture interne. Nelle zone in cui sono state accertate situazioni di sfondellamento delle pignatte e/o altri elementi in laterizio, oltre alle analisi e/o indagini soniche sopraindicate, possono essere effettuate prove di trazione sulla resistenza

al distacco del laterizio (pull-off del fondello) ripetute poi, per confronto, anche in altre parti in cui non si sono evidenziati fenomeni di rottura o sfondellamento. La prova si può svolgere applicando un carico crescente ad un opportuno tassello post-inserito nella pignatta e direttamente collegato al fondello; contemporaneamente all'applicazione del carico viene misurata la deformazione dell'intradosso in prossimità del tassello tramite comparatore millesimale.

È infine possibile riportare su un grafico l'andamento dello spostamento in funzione del carico applicato ed individuare il comportamento elastico, plastico, fragile dei fondelli. Le prove di carico effettuate in altri punti, in cui non sono presenti evidenti fenomeni di rottura o sfondellamento, applicando via via piccoli carichi statici e, verificando il comportamento deformativo, consentono, per confronto con quelli portati fino a rottura, di rivelare la condizione delle ulteriori parti indagate.

Per quanto riguarda i controsoffitti, l'analisi costruttiva mediante osservazione visiva, termografica e/o endoscopica consiste schematicamente nella determinazione dei materiali costituenti ovvero: caratteristiche e dimensioni dei pannelli, tipologia e regolarità dei fissaggi, interasse e tipologie di supporto delle sospensioni (e valutare ad esempio la rispondenza o meno alla UNI EN 13964 "Controsoffitti. Requisiti e metodi di prova").

L'ispezione nei controsoffitti può rivelare situazioni compromesse o difettose o problematiche dettate da successive modifiche o all'introduzione nel tempo di impianti inizialmente non previsti. La fase preliminare di indagine, studio e approfondimento è di fondamentale importanza se si vuole evitare di "lasciare al caso" la successiva scelta delle più adeguate metodologie di fissaggio: a questa fase conoscitiva deve poi far seguito anche un controllo costante e puntuale in corso d'opera, che può rivelare talvolta difetti o effettivi problemi di posa.

Si riportano di seguito schematicamente le metodologie di indagine appena descritte.

2.1.5. Metodologie non distruttive

L' esecuzioni di indagini sui soffitti (intradossi solai) prevede:

- un primo approccio di ispezione visiva e con impiego di termocamera al fine di individuare la tipologia di solaio (lo "scheletro strutturale"), circoscrivere le aree in cui approfondire le indagini o evidenziare quelle con le problematiche più evidenti o di immediato intervento;
- un primo approfondimento costituito dall'esecuzione della "battitura manuale" delle superfici circoscritte dalle precedenti indagini;
- un ulteriore affinamento tramite l'impiego di un'indagine strumentale (acustica, impulsiva, dinamica) che consenta di giungere ad un giudizio sul possibile rischio secondo criteri comparativi (tra parti in buono stato e parti in cui si sospettano o si sono evidenziati problemi).

Assieme a tali aspetti viene raccomandata l'esecuzione di saggi esplorativi (almeno: 1 ogni 250 m², o per ogni tipologia costruttiva di solaio) finalizzati alla individuazione di eventuali difetti locali o estendibili a superfici più vaste (se ad esempio legati alle modalità realizzative dei componenti il solaio).

Per l'effettuazione di indagini sui controsoffitti di tipo "non ispezionabile" (cioè, la cui ispezione in maniera estesa comporterebbe la necessità di rimuovere completamente gli elementi costituenti e tra essi vengono compresi: quelli "con camera a canne" o "in cannicciato"; quelli costituiti da lastre di cartongesso, oppure quelli con pannelli in gesso o altro materiale – aventi struttura portante nascosta e la cui rimozione comporterebbe il danneggiamento del controsoffitto medesimo);

- ispezione visiva dall'esterno/intradosso per individuare avvallamenti, infiltrazioni, fessurazioni, ammaloramenti della finitura;

- ispezione visiva dall'interno/estradosso, previa apertura di un passaggio per individuare tipologia, interasse e modalità di fissaggio dei pendini;
- esecuzione di prova di carico sui pendini, tenendo conto del peso degli elementi sorretti dagli stessi.

Per l'esecuzione di indagini sui controsoffitti di tipo "ispezionabile" (cioè tutti quelli che consentono l'agevole rimozione degli elementi/pannelli di finitura):

- ispezione visiva dall'esterno/intradosso per valutare lo stato di conservazione dei componenti o eventuali ammaloramenti;
- ispezione visiva dall'interno/estradosso, previa apertura "a campione" dei pannelli per individuare tipologia, interasse e modalità di fissaggio dei pendini;
- esecuzione di prova di carico sui pendini, tenendo conto del peso degli elementi sorretti dagli stessi.

Per quanto riguarda le indagini sui controsoffitti non ispezionabili può essere inoltre consigliata l'esecuzione anche di analisi dell'intradosso tramite termocamera per individuare agevolmente l'orditura portante o il posizionamento e fissaggio di eventuali ulteriori elementi appesi, quali: plafoniere, bocchette di areazione, elementi poggiati all'interno del controsoffitto o, ancor peggio, su di esso caduti (ad esempio fenomeni silenti di sfondellamento del solaio sovrastante), aspetti questi più direttamente valutabili nel caso invece di soffitti di tipo ispezionabile.

Di seguito si elencano le metodologie di indagine suggerite (e relative strumentazioni necessarie):

1. ***Indagine visiva***

L'indagine ed il controllo visivo sono il punto di partenza degli accertamenti utili a definire lo stato degli elementi strutturali secondari (solai).

2. ***Analisi mediante termocamera ad infrarosso***

È il metodo strumentale di indagine non distruttiva studiato e collaudato per individuare anomalie nella conformazione del solaio. L'osservazione strumentale permette di individuare lo scheletro strutturale, l'orditura dei solai e la presenza o meno dei rompitratta.

L'individuazione delle travi principali e di quelle secondarie permette di formulare alcune ipotesi sulla deformabilità degli impalcati e di individuare irregolarità nelle luci e nelle geometrie.

La sensibilità di misurazione permette di rilevare la presenza di infiltrazioni, umidità e stati ammalorati che spesso producono il deperimento del laterizio o dello strato di intonaco causando il successivo distacco.

L'osservazione all'infrarosso, effettuata con precisione sull'intera superficie da indagare, permette anche di individuare i punti in cui procedere alla successiva analisi costruttiva.

3. ***Analisi costruttiva dei solai***

Si eseguono piccole demolizioni localizzate nel solaio che permettono di definirne la tipologia e di constatare le geometrie dei manufatti.

La presenza di curvature sui setti, impurità nell'impasto o colorazioni particolari dovute ai processi produttivi, forniscono importanti elementi alla valutazione.

L'individuazione di impalcati realizzati con tavelloni di alleggerimento permette la corretta interpretazione dei risultati durante la battitura e la taratura delle strumentazioni.

Anche l'osservazione della consistenza dell'intonaco ed il relativo spessore forniscono le informazioni necessarie all'individuazione del grado di rischio connesso ad un eventuale cedimento.

Il distacco del solo strato di intonaco, anche se talvolta trascurato, interessa solitamente porzioni di superficie molto più estese, proporzionalmente con i carichi in gioco.

La corretta preparazione del supporto in latero-cemento costituisce l'elemento principale per la corretta conservazione dell'aderenza.

4. ***Diagnosi acustica mediante battitura manuale e/o strumentale***

Tale indagine consente di valutare l'esistenza di anomalie nella regolarità del solaio e sull'estensione del fenomeno e può essere eseguita tramite:

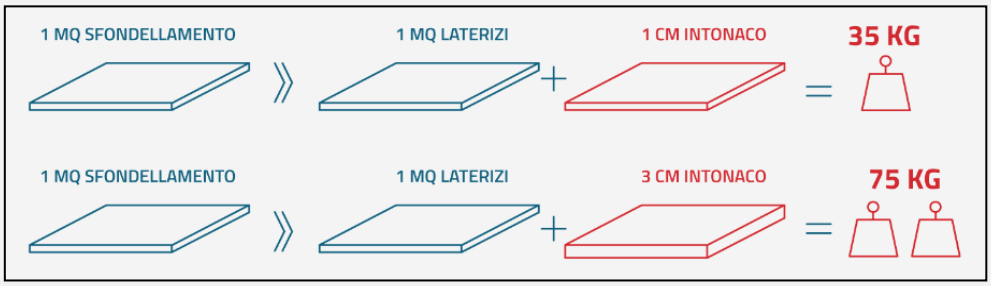
- Analisi sonica manuale mediante "battitura manuale" con apposito martello avente battente in materiale polimerico ad elevata durezza rivolta ad individuare fenomeni di "sfondellamento" sia esso in fase di innesco (distacchi intonaco, lesioni, etc.) sia di evoluzione;
- Analisi sonica strumentale mediante asta alla cui estremità è posizionato un microfono che registra la risposta sonora. Il metodo consente di svincolare l'indagine dall'esperienza e dalla soggettività dell'operatore in sito nel metodo di battitura manuale.

2.1.6. Metodologia BRT: Quantificazione del rischio sfondellamento

Per quantificare il grado di rischio legato ad un possibile sfondellamento dei solai, occorre far riferimento principalmente a due fattori:

- **l'estensione del fenomeno** che, nella sua fase di evoluzione, è rappresentato dal distacco di intonaco e/o fondello pignatta rilevate nel corso nelle indagini in sito. Spesso il distacco interessa più di 1.00 mq, arriva a 3.00-4.00 mq e a volte coinvolge locali interi. Il peso del materiale che si distacca va quindi moltiplicato per la superficie interessata;
- **peso del materiale** soggetto a possibili crolli e/o distacchi. Lo spessore dell'intonaco è ciò che maggiormente influisce sul peso del materiale: uno sfondellamento con intonaco di

spessore 1.00 cm, pesa 35 kg per mq, mentre per uno spessore di 2.00-3.00 cm il peso aumenta notevolmente e varia tra i 55 e i 75 kg.



Per questo motivo anche la sola caduta d'intonaco diventa una reale minaccia per la sicurezza e la salvaguardia della vita umana

L'esperienza ottenuta da anni di osservazioni insegna che in molti casi tali aspetti sono quelli rilevanti in quanto maggiore è l'estensione della superficie ammalorata, maggiore sarà la quantità di materiale soggetta a possibili crolli e di conseguenza il peso degli stessi.

Tali considerazioni sono necessarie per una corretta interpretazione della valutazione del rischio e dei risultati da essa ottenuti.

Pertanto, sulla base dei risultati delle indagini effettuate su solai esistenti, si redige una mappatura del degrado ed in seguito una mappatura delle aree vulnerabili tramite un "indice di vulnerabilità allo sfondellamento".

L'indice di "vulnerabilità allo sfondellamento" è un indicatore formulato con l'obiettivo di esprimere tramite un unico valore, in percentuale, il potenziale rischio allo sfondellamento dei solai.

$$x = \frac{Area_{suoni\ "cassi\ o\ vuoti"}}{Area_{totale\ \ di\ indagine}} x100$$

L'indice percentuale può essere definito come il rapporto tra la superficie del solaio (mq) che ha restituito suoni "cassi o vuoti", quindi a rischio sfondellamento, e l'intera superficie indagata (mq) tramite "battitura manuale e/o strumentale".

I valori ottenuti forniscono un elemento utile per l'individuazione di potenziali aree di criticità suddivise su tre differenti livelli.

Le caratteristiche di ciascun livello sono descritte qui di seguito:

Zone di "livello 1"	**$x < 33\%$**	**area a vulnerabilità media-bassa**

La superficie a seguito delle battute manuali riporta poche difformità restituendo un segnale acustico uniforme rispetto alle zone ritenute integre, alternando ampie zone integre a piccole zone ammalorate; difetti visivi o microfessurazioni superficiali limitate al solo strato dell'intonaco; infiltrazioni non recenti e/o localizzate. I solai per conformazione e tipologia possono essere comunque soggetti a deterioramento nel tempo.

Zone di "livello 2"	**$33\% \leq x \leq 67\%$**	**area a vulnerabilità media**

La superficie a seguito delle battute manuali riporta chiare difformità restituendo un segnale acustico distorto, alternando zone presumibilmente integre a zone ammalorate; fessure e cavillature superficiali sull'intonaco senza particolari segni di deperimento e senza movimenti sullo strato d'intradosso; presenza di infiltrazioni diffuse che non pregiudicano l'aderenza al supporto. I solai per conformazione e tipologia possono essere comunque soggetti a deterioramento nel tempo.

Zone di "livello 3"	**$x > 67\%$**	**area a vulnerabilità elevata**

La superficie a seguito delle battute manuali riporta chiare difformità restituendo un segnale acustico distorto rispetto alle zone ritenute integre. Le difformità appaiono piuttosto diffuse su tutta la superficie indagata; distacco evidente dell'intonaco con rigonfiamento dello stesso; fessure e crepe si

allargano e/o si muovono vistosamente durante la battitura nelle zone limitrofe al danno rilevato e si verifica caduta di materiale durante le indagini.

A seguire per ogni fabbricato ispezionato, si realizza un foglio di calcolo excel, all'interno del quale è riportato oltre alla percentuale di rischio e del corrispondente livello, anche la sigla identificativa di ogni ambiente indagato per agevolare la lettura all'interno della documentazione grafica.

PS1	ANALISI SFONDELLAMENTO			
Ambienti	Superficie Solaio indagata (Metodo a "Battitura") mq	Superficie Solaio a Rischio Sfondellamento mq	VALUTAZIONE DEL RISCHIO X (%)	LIVELLO VULNERABILITA' Punteggio
PS1_1	8,77	3,86	44,01	2
PS1_2	3,05	3,05	100,00	3
PS1_3	4,44	4,44	100,00	3
PS1_4	7,74	3,74	48,32	2
PS1_5	12,07	1,62	13,42	1
PS1_6	6,67	0,01	0,15	1
PS1_7	6,5	0,81	12,46	1
PS1_8	25,74	0,54	2,10	1
PS1_8B	20,9	20,9	100,00	3

Fig.8- Esempio valutazione del rischio e livello di vulnerabilità

I risultati numerici ottenuti e i corrispondenti "*Layout di Degrado, Danno e Rischio*" sono riportati e rappresentati all'interno di elaborati grafici di cui si riporta un esempio:

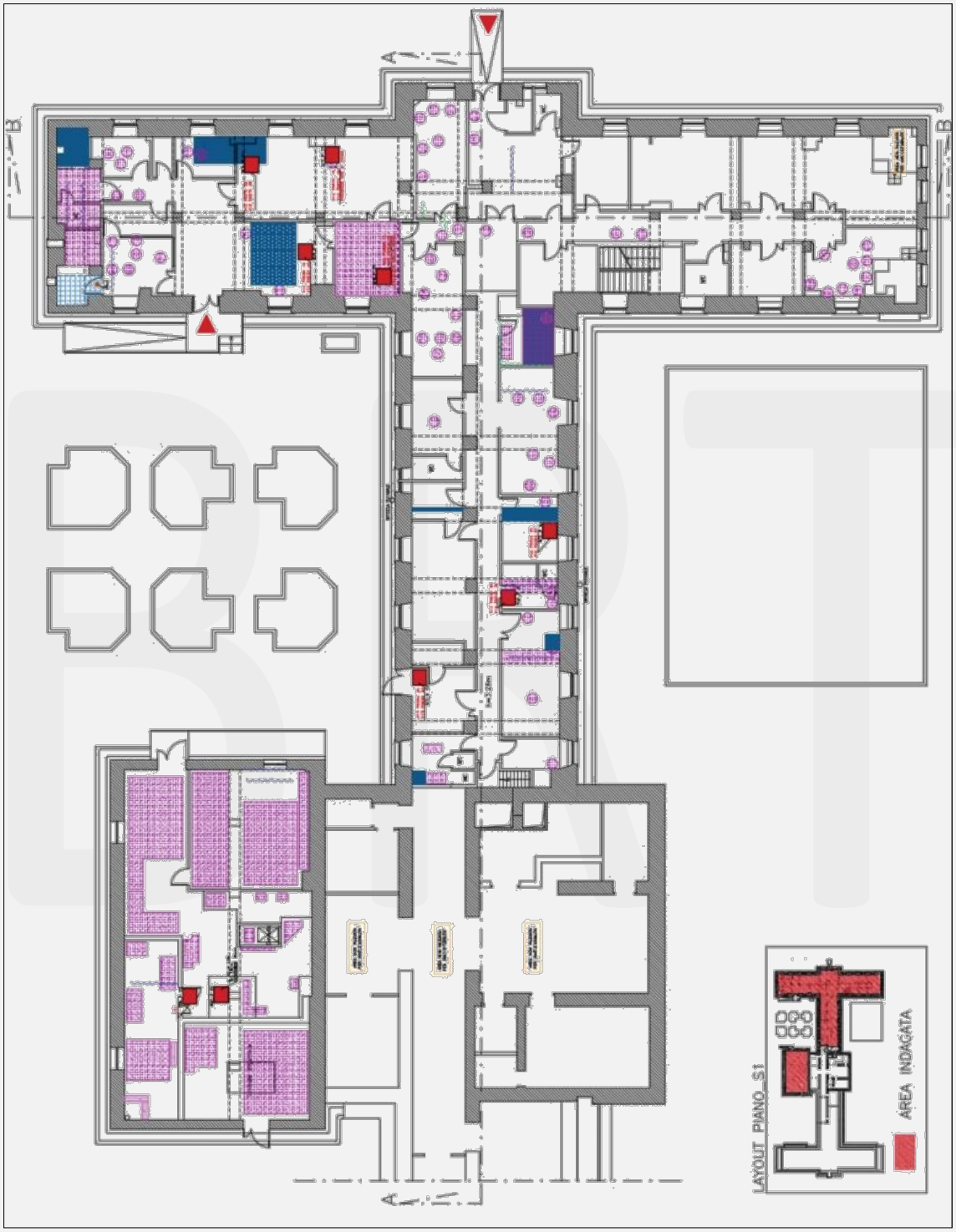


Fig.9- Esempio mappatura del degrado

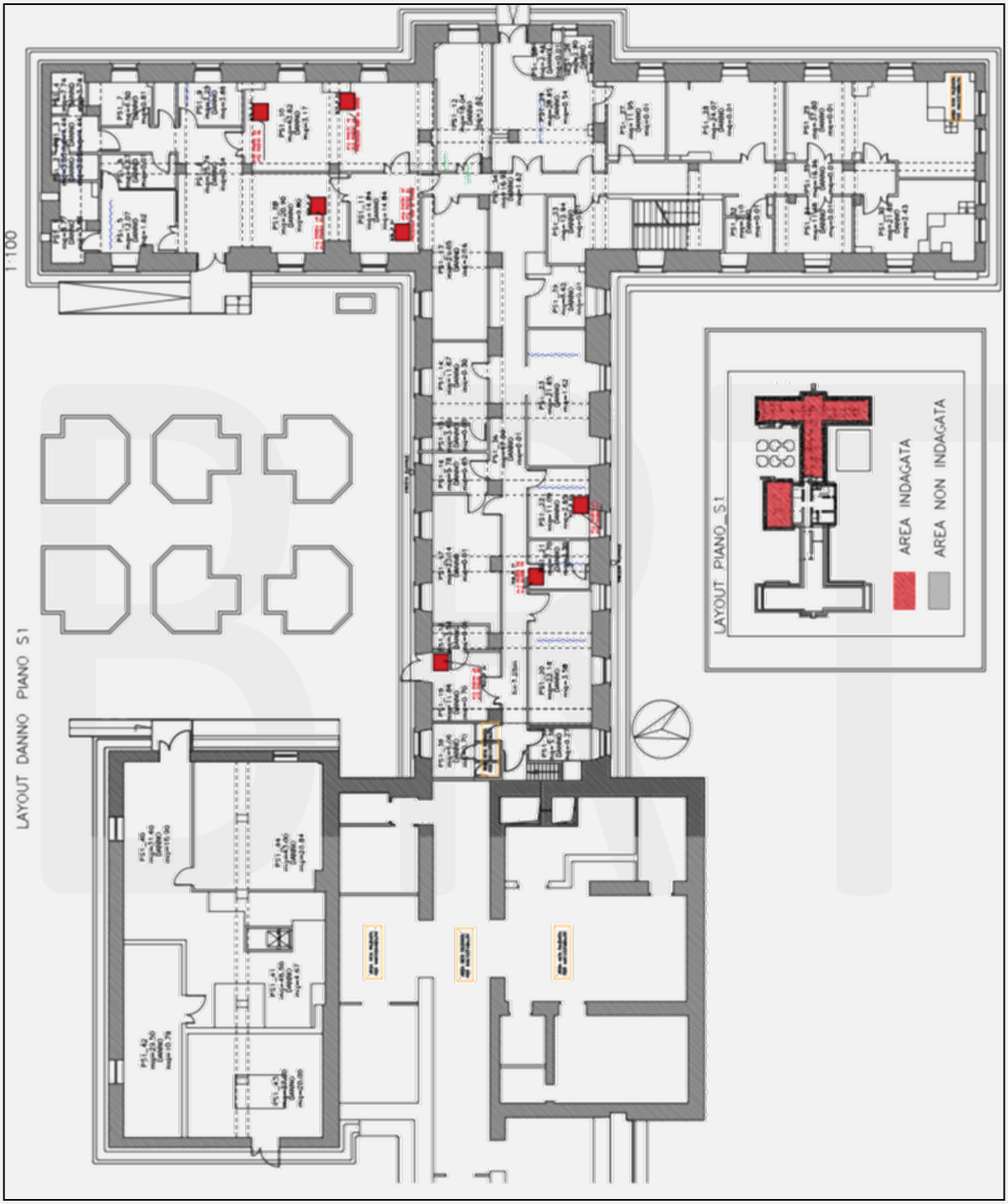


Fig.10- Esempio Layout Danno

Fig.11- Esempio Mappatura del Rischio

2.1.7. Soluzioni anti-sfondellamento

Le soluzioni anti-sfondellamento si differenziano in base alle diverse caratteristiche e problematiche dei solai. È fondamentale, dunque, conoscere tutte le possibilità di messa in sicurezza, così da individuare l'intervento ottimale alla risoluzione definitiva del degrado riscontrato.

I sistemi di prevenzione dello sfondellamento oggi disponibili e maggiormente diffusi sono la rete in fibra di vetro ed i sistemi a secco, ossia il controsoffitto anti-sfondellamento ed il controsolaio anti-sfondellamento.

- ***Rete anti- sfondellamento***

Le reti in fibra di vetro sono soluzioni anti-sfondellamento leggere, resistenti ed agevoli; sono ideali in presenza di controsoffitti esistenti, impianti voluminosi o quando non è necessario avere la finitura estetica.

Sono soluzioni nate per rispondere ad altre esigenze e che sono state adattate nel tempo per avere soluzione di anti-sfondellamento: è fondamentale verificare che il prodotto sia stato certificato per contenere lo sfondellamento.

L'intervento di ripristino viene eseguito seguendo le fasi riportate di seguito.

Generalmente, dopo una preliminare verifica dello stato della struttura esistente, valutando intonaco e travetti, si effettuata una preparazione del supporto nelle seguenti fasi:

- pulizia dei ferri di armatura esposti dei travetti;
- applicazione boiacca passivante sui ferri di armatura dei travetti contenente inibitori di corrosione;
- applicazione malta per il ripristino dei copriferri sui travetti con malta premiscelata tixotropica strutturale;

- Procedere al riempimento delle volumetrie mancanti, nelle zone dove le porzioni di pignatta sono già sfondellate, tramite incollaggio di tavelle in laterizio spessore 3 cm e/o con pannelli in polistirene incollati con adesivo e rasante monocomponente a base cementizia

- ricostruzione dell'intonaco ammalorato esistente per il ripristino volumetrico dell'intradosso con malta strutturale premiscelata, reoplastica, antiritiro, fibrorinforzata, a base di calce idraulica e pozzolana naturale.

Terminata la preparazione si applica la rete di rinforzo, applicando i lembi terminali con opportuna sovrapposizione.

La rete si vincola ai travetti per fissaggio meccanico tramite l'uso delle viti autofilettanti per calcestruzzo e flange di fissaggio in nylon; infine, si aggiunge un ancoraggio al perimetro dei solai mediante squadrette metalliche in acciaio, ancorate a loro volta tramite appositi tasselli.

Fig.12 – Rete anti-sfondellamento; a sinistra: esempio di installazione (disponibile su: https://sicurtecto.it); a destra: dettaglio della sezione (disponibile su https://www.fibrenet.it)

- ***Sistemi a secco: controsoffitti e controsolai anti-sfondellamento***

A differenza delle reti, i sistemi anti-sfondellamento a secco sono progettati e realizzati come veri e proprio sistemi di messa in sicurezza dei solai; generalmente sono adottati in locali che richiedono prestazioni ambientali specifiche e dove è richiesta la finitura estetica.

Sono sistemi progettati ad hoc per assumere diverse misure e caratteristiche adatte a ciascuna tipologia edilizia.

I controsoffitti anti-sfondellamento proteggono dai distacchi di intonaco e dallo sfondellamento, mentre i controsolai, oltre ad avere la funzione di anti-sfondellamento, permettono anche di migliorare il comportamento strutturale generale dell'impalcato.

- ***Controsoffitto***

Speciale controsoffitto anti-sfondellamento, a secco, armato e fibrorinforzato, composto da elementi studiati, progettati e connessi per contenere ogni possibile distacco.

Generalmente è composto da un'orditura principale realizzata con speciali profilati metallici sagomati, disposti a passo variabile con coefficiente di sicurezza elevato; l'orditura principale è fissata ai travetti tramite tasselli meccanici; il controsoffitto è ultimato tramite lastre armate fibrorinforzate fissate all'orditura e con caratteristiche diversificate per la specifica applicazione.

L'applicazione può essere effettuata sia in aderenza al solaio sia ribassato.

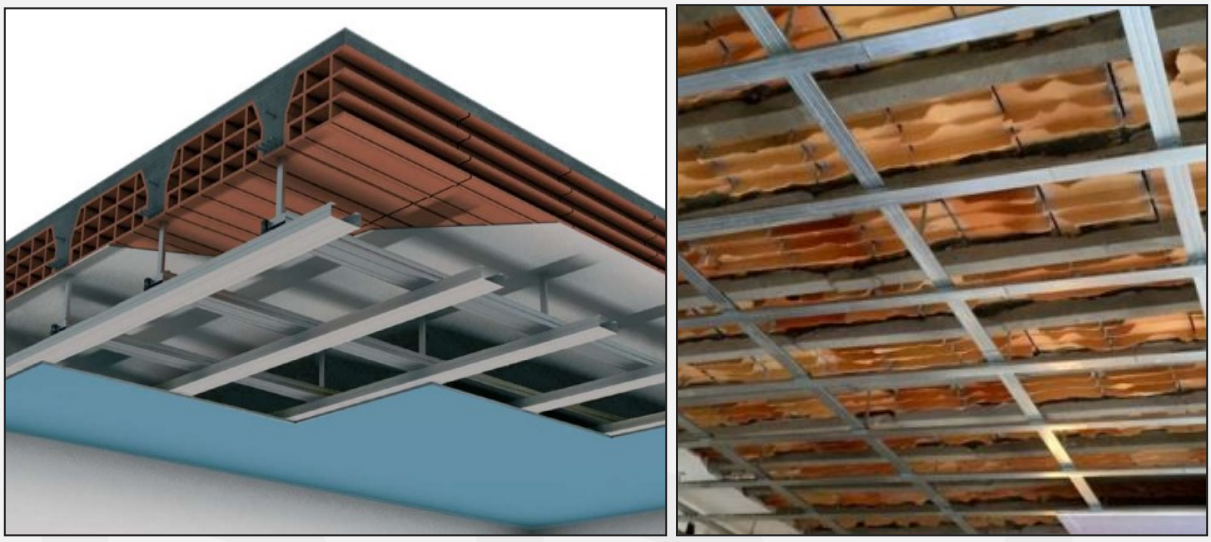


Fig. 13 – Controsoffitto anti-sfondellamento; a sinistra: particolare costruttivo di un controsoffitto anti-sfondellamento del tipo "ribassato". (Disponibile su: https://www.knauf.it); a destra: esempio di installazione (disponibile su https://www.sistemicostruttivi.it).

- ***Controsolaio***

Il controsolaio anti-sfondellamento, rispetto al controsoffitto, ha anche una funzione strutturale, in quanto:

- garantisce la tenuta allo sfondellamento per carichi molto maggiori:
- attribuisce ai travetti un incremento di collaborazione trasversale ottimizzando la distribuzione dei carichi applicati;
- nel complesso, conferisce maggiore inerzia al solaio, aumentandone rigidezza flessionale e riducendone le deformazioni in fase di esercizio.

Esso rappresenta una nuova tecnologia nata proprio per rispondere a quelle situazioni in cui lo sfondellamento è la conseguenza di problemi di natura strutturale (come in caso di ferri ammalorati in mostra, presenza di solaio snello o incertezza sulle condizioni del solaio); in questi casi, si risolve sia il problema dello sfondellamento ed inoltre, si migliora la risposta del solaio dal punto di vista strutturale.

Generalmente si compone di una rete di nervature a placcaggio esterno composte da profili sagomati in acciaio, disposti a passo variabile in funzione della rompitratta ed ancorati tramite fissaggi meccanici; la finitura è costituita da lastre gessofibrate ad alta resistenza fissate meccanicamente alla nervatura e con caratteristiche specifiche per ogni intervento.

L'intervento nel complesso non prevede nessuna demolizione, nessun collegamento alle strutture verticali e non va ad aggiungere pesi rilevanti sull'impalcato.

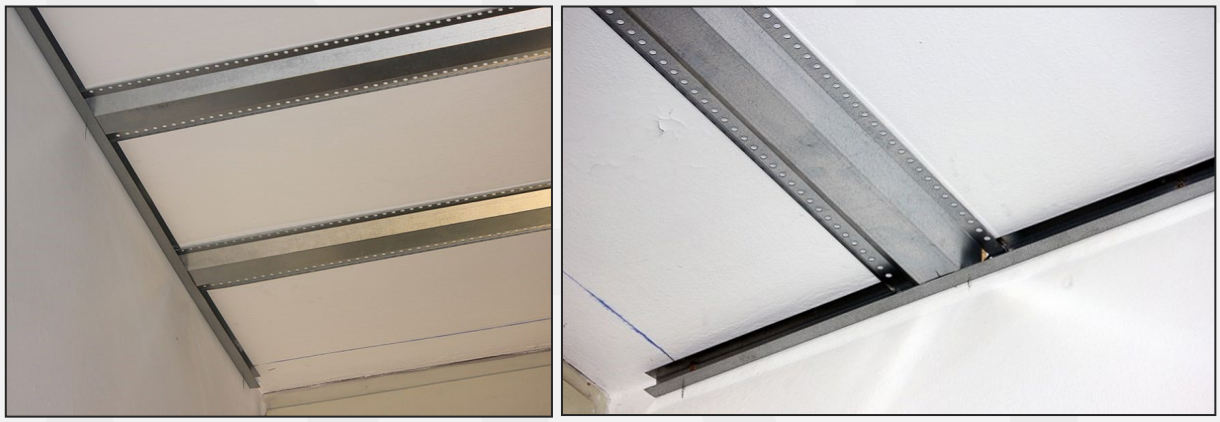


Fig.14 – Controsolaio anti-sfondellamento; particolari realizzativi di ancoraggio della rete di nervature al solaio (disponibile su https://sicurtecto.it/sfondellamento)

2.2. DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI OGGETTO DI MONITORAGGIO

Gli edifici pubblici svolgono un ruolo cruciale nella nostra vita quotidiana, fornendo spazi per il lavoro, l'istruzione, la ricreazione e la socializzazione. È quindi fondamentale assicurare che queste strutture siano ben mantenute e in buone condizioni per garantire la sicurezza e il comfort di chi le utilizza. Uno degli elementi chiave da considerare nella manutenzione degli edifici pubblici è il solaio: un componente fondamentale che fornisce le fondamenta e il supporto per l'intera struttura.

Nello specifico, tra i principali fattori di deterioramento che inficiano sulla prestazione e sulla durabilità delle solette latero-cementizie vi è l'accumulo di umidità. Se i livelli di umidità all'interno

di questi solai non sono gestiti correttamente, infatti, gli stessi possono deteriorarsi e perdere la loro integrità strutturale nel tempo. Tali problematiche possono essere innescate da una varietà di fattori, come infiltrazioni d'acqua o alti livelli di umidità ambientale. Quando l'umidità penetra nel solaio, può causare l'indebolimento dei materiali con innesco di crepe, deformazioni e altre forme di danno. Uno dei maggiori problemi causati dall'umidità nei solai latero-cementizi è che può far arrugginire le barre in acciaio all'interno dei travetti, causandone l'ossidazione e quindi l'ingrossamento in termini di volume. Questo, a sua volta, può portare a una riduzione della resistenza alla trazione dell'acciaio, rendendo la struttura "impalcato" più suscettibile a crepe e altre forme di danneggiamento. Una delle conseguenze di questo tipo di fenomeni è lo "sfondellamento" ossia il distacco della parte inferiore delle pignatte (il componente di alleggerimento del solaio) con il conseguente crollo che mette a rischio l'incolumità degli utenti dell'edificio. Tale fenomeno, tuttavia, non è imprevedibile in quanto segue un'evoluzione che è caratterizzata da una serie di segnali.

Inoltre, l'umidità è un fattore che influenza enormemente il benessere termoigrometrico, la sensazione di benessere e vivibilità percepita dall'uomo; l'umidità è un parametro importante anche per il funzionamento di dispositivi sensibili, come le apparecchiature elettroniche, industriali, i dispositivi sensibili alle scariche elettrostatiche e quelli che operano con alte tensioni: dispositivi di questo tipo devono operare in ambienti con umidità controllata, tale da mantenersi al di sotto, al di sopra, o inclusa entro specifici valori soglia.

Per prevenire questi problemi e garantire la funzionalità a lungo termine dei solai latero-cementizi, dunque, è importante monitorare ed individuare tali segnali attraverso due tecnologie: quelle di rilevazione del grado di umidità all'interno del solaio e quelle relative alla rilevazione di movimenti. L'utilizzo di queste tecnologie applicate al settore specifico dei solai in edilizia presenta interessanti opportunità per aziende e privati nel campo della costruzione e della manutenzione degli edifici.

L'obiettivo del presente report è fornire un'analisi dello stato dell'arte relativa alle tecnologie che vengono utilizzate in relazione al problema presentato con lo scopo di individuare l'applicabilità industriale del progetto presentato che è relativo al monitoring dei solai negli edifici pubblici e privati.

2.2.1.1. Definizione di umidità

L'umidità, dipendentemente dall'applicazione su cui si opera, può essere definita come:

- assoluta;
- specifica;
- relativa;

2.2.1.2. Umidità assoluta (AH)

Essa esprime la densità del vapore acqueo in una massa d'aria umida (miscela vapore acqueo-aria); si definisce più precisamente, la quantità di grammi di vapore acqueo "mv" presente in 1 m^3 d'aria umida, a una data temperatura e una data pressione.

Tale parametro può risultare "non comodo" da un punto di vista operativo, specie nelle situazioni in cui occorre un confronto tra stati termodinamici (o situazioni ambientali) differenti, in quanto suscettibile alla temperatura e alla pressione alla quale si effettua la misurazione.

Pertanto, operativamente, si preferisce utilizzare le altre definizioni, quali l'umidità specifica.

2.2.1.3. Umidità specifica

Il rapporto di mescolanza è il rapporto tra la massa "mv" di vapore acqueo e la massa d'aria secca "ms" contenute in una certa massa d'aria umida "mu" (miscela aria-vapore acqueo):

$$q = m_v / m_s = m_v / (m_u - m_v)$$

Generalmente s'intende come un rapporto tra i chilogrammi di vapore acqueo e i chilogrammi di aria secca; dato che la massa di vapore totale contenuta nell'atmosfera è generalmente bassa, il rapporto di mescolanza si esprime spesso in grammi di vapore acqueo per chilogrammo d'aria secca.

Per 1 kg di aria umida, nel caso vi siano 5 g di vapore acqueo, il rapporto di miscelazione è:

$$q = 5/0{,}995 \text{ (g/kg) } 5{,}025 \text{ g/kg}$$

Si dimostra che il rapporto di miscelazione "r" può essere definito anche sfruttando la pressione totale dell'aria e parziale del vapore tramite la relazione:

$$r = 0{,}622\ p_v / (p_a - p_v)$$

Talvolta, nella letteratura scientifica, si può trovare anche un'altra definizione di umidità specifica, come rapporto tra la massa del vapore acqueo e la massa d'aria umida (ovvero miscela tra aria secca e vapore).

In termodinamica, però, si preferisce la definizione di umidità specifica basata sull'aria secca in quanto questa non varierà mai nei normali processi termodinamici (sopra la temperatura di 132 K), al contrario della massa di aria umida (per esempio: con la condensazione del vapore nell'aria umida, il fluido può essere facilmente sottratto).

2.2.1.4. Umidità relativa (RH)

L'umidità relativa è il rapporto, tra la massa di vapore acqueo "mv" contenuto nell'unità di volume V di aria umida e la massima massa di vapore "mv,s"

contenibile nello stesso volume alla stessa temperatura T in condizioni di saturazione:

$$\varphi = mv(T) / mv,s\ (T)$$

Nell'ipotesi di miscela ideale, l'umidità relativa è anche il rapporto tra la pressione parziale del vapore pv e la pressione del vapore saturo ps valutate alla stessa temperatura:

$$\varphi = pv(T) / pv,s\ (T)$$

in genere tale rapporto viene espresso in percentuale, pertanto l'umidità relativa può variare tra un minimo di 0% (assenza di vapore acqueo) ad un massimo del 100% (aria satura). Le condizioni alla saturazione sono tali che un qualsiasi aumento in massa della quantità di vapore acqueo in fase aeriforme non è più possibile, ed il vapore si separa dalla miscela condensando.

2.3. SVILUPPO DEL SOFTWARE PER L'ANALISI DEI DATI

La proposta progettuale prevede l'utilizzo di tecnologie esistenti (prevalentemente sonde, sensori e centrali di acquisizione dati) ideate per scopi differenti da quello oggetto di studio. Sul mercato, infatti, non esistono tecnologie che consentono di individuare preventivamente il fenomeno dello sfondellamento dei solai in latero-cemento esistenti. Pertanto, l'introduzione di questa nuova tecnologia "composta" introduce e contribuisce ad una innovazione nel campo della diagnostica e della prevenzione del rischio sfondellamento, particolarmente rilevante per il patrimonio edilizio pubblico italiano.

2.4. RICERCA INDUSTRIALE DEI SENSORI IDONEI AI PARAMETRI DI MONITORAGGIO

Nell'ambito della ricerca, sono stati selezionati attentamente i sensori da utilizzare per il monitoraggio dello sfondellamento dei solai. In funzione dei parametri fisici oggetto di monitoraggio, si è deciso di utilizzare sensori di temperatura, pressione, umidità, giroscopici, accelerometrici, magnetometrici e di prossimità. Tra i sensori selezionati, quello di umidità è risultato essere il più critico. Idealmente, sarebbe stato utile utilizzare un sensore che rilevasse l'umidità dell'intonaco mediante l'inserimento

di opportune punte all'interno del materiale. Tuttavia, dato che lo strato di finitura, può presentarsi ammalorato e/o in fase di distacco, si è ritenuto che un tale sensore risultasse troppo invasivo e di difficile installazione. Pertanto, si è optato per una tipologia di sensore che misurasse l'umidità ambientale in prossimità dell'estradosso del solaio oggetto di sperimentazione, cercando di compensare la minore precisione con le informazioni provenienti da altri sensori.

2.4.1. Sensore di umidità e temperatura

I sensori di umidità sono dispositivi per la misura e il monitoraggio dell'umidità nelle applicazioni industriali, biomediche, ambientali e nell'elettronica di consumo.

- Numerosi sono i campi e le applicazioni in cui i sensori di umidità trovano impiego:
  - in campo industriale, specialmente nelle raffinerie, nelle industrie chimiche e metallurgiche e nelle fornaci; in questi contesti, infatti, un elevato grado di umidità riduce la quantità di ossigeno nell'aria diminuendo il rischio di incendio;
  - il settore della domotica, dove i sensori misurano e controllano il grado di umidità nelle case, negli uffici e nelle serre;
  - in agricoltura, in cui i sensori controllano l'umidità necessaria per una corretta coltivazione di ortaggi e frutta;
  - in campo biomedicale, in cui il controllo dell'umidità è fondamentale in apparecchiature quali incubatrici, sterilizzatori e ventilatori.

2.4.1.1. Funzionamento

I sensori di umidità sono dei dispositivi in grado di misurare l'umidità presente nell'ambiente circostante. Da un punto di vista tecnico, un sensore di questo tipo è anche noto con il termine di

igrometro. Considerando il tipo di grandezza misurata possono essere classificati in sensori di umidità assoluta (AH) e in sensori di umidità relativa (RH).

Dal punto di vista elettrico, i sensori di umidità possono invece essere classificati in:

- sensori capacitivi;
- sensori resistivi.

2.4.1.2. Sensori capacitivi

Questo tipo di sensori (progettati per misurare l'umidità relativa RH) viene utilizzato soprattutto in applicazioni in cui costo, ingombro e robustezza sono dei requisiti obbligatori.

Il principio su cui basano è la variazione della permettività elettrica di un materiale dielettrico al variare dell'umidità.

Da un punto di vista costruttivo, il sensore di umidità capacitivo è costituito da un condensatore, tra le cui armature viene inserito un opportuno materiale dielettrico la cui costante dielettrica varia con l'umidità.

Il metodo più comunemente utilizzato per la fabbricazione di questo sensore consiste nell'utilizzo di una pellicola di polimero igroscopico (impiegato come dielettrico) alle cui estremità vengono depositati gli elettrodi delle armature.

I vantaggi dei sensori di umidità capacitivi sono molteplici, tra cui: tensione di uscita pressoché lineare, elevata stabilità di funzionamento nel tempo, ampia gamma di misura RH e costo contenuto.

Le applicazioni dei sensori di umidità capacitivi sono numerose: impianti di riscaldamento e condizionamento, stampanti e fax, stazioni meteorologiche, settore automotive, industria alimentare, congelatori, forni e asciugatrici.

Occorre comunque considerare che il sensore di umidità capacitivo, per sua natura, non deve essere posizionato troppo distante dal circuito elettronico di controllo: questo fattore porrebbe forti limiti all'utilizzo nel sistema HMD.

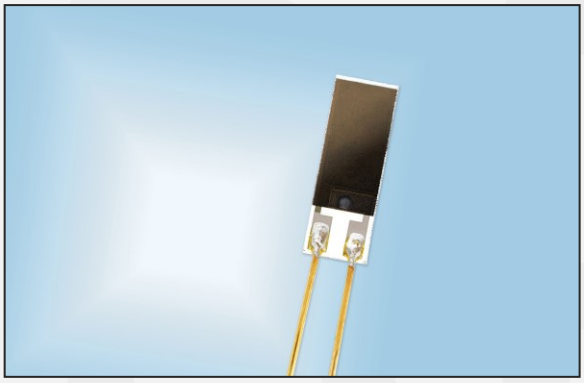


Fig. 15 – Esempio di sensore di umidità capacitivo prodotto dalla Innovative Sensor Technology (disponibile su: https://www.ist-ag.com)

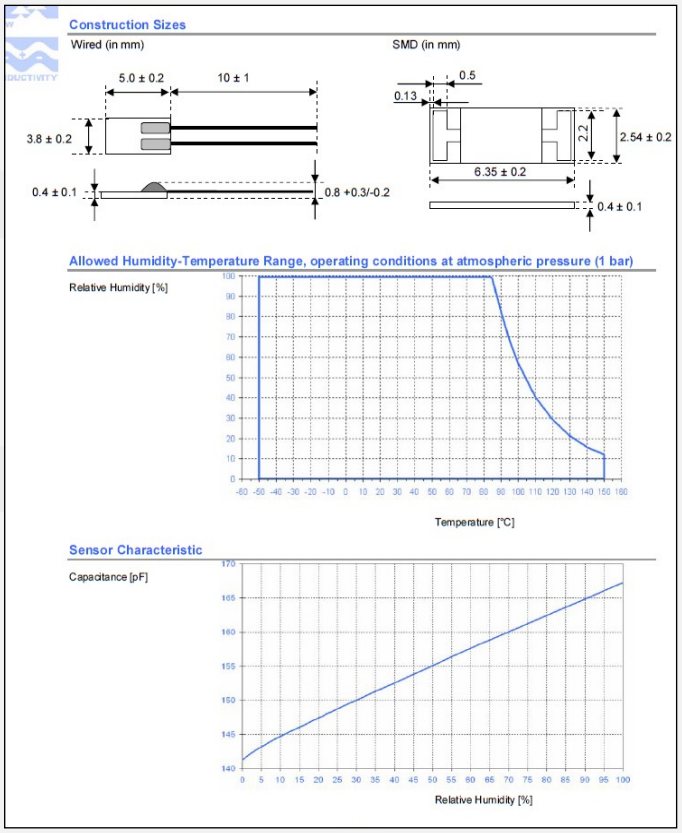


Fig.16 – Esempio di range di applicabilità e curva caratteristica di un sensore di umidità capacitivo; estratto da scheda tecnica sensore prodotto da DISTRELEC (disponibile su: https://www.distrelec.it)

2.4.1.3. Sensori resistivi

Altra importante classe di sensori di umidità è rappresentata dai sensori di tipo resistivo, i quali, anziché la capacità, misurano la resistenza (impedenza) oppure la conduttività elettrica: tale caratteristica, infatti, nei materiali conduttori non metallici dipende dall'umidità. Dal punto di vista costruttivo, un sensore di umidità resistivo è solitamente realizzato utilizzando dei materiali con

resistività relativamente bassa, tali da apprezzare ogni variazione della stessa in base all'umidità presente.

La relazione tra resistenza e umidità è inversamente proporzionale.

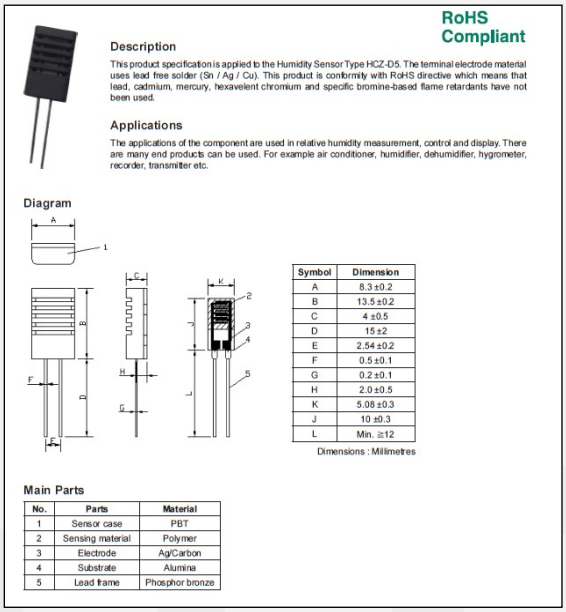
Il materiale a bassa resistività viene depositato sopra i due elettrodi, i quali vengono disposti seguendo uno schema interlacciato (a pettine) in modo tale da incrementare il più possibile l'area di contatto.

La resistività tra gli elettrodi cambia quando lo strato superiore assorbe umidità; questa variazione può poi essere misurata e convertita in valore numerico tramite l'aiuto di un semplice circuito elettrico. Come materiale a bassa resistività si possono utilizzare particolari tipi di sale, polielettroliti solidi, oppure polimeri conduttivi. I più moderni sensori di umidità resistivi sono protetti esternamente da uno strato ceramico che garantisce una protezione addizionale.

Gli elettrodi del sensore sono invece realizzati con metalli nobili come oro, argento o platino. Tra i principali vantaggi offerti dai sensori di umidità resistivi si possono citare: costo ridotto, dimensioni compatte, elevata intercambiabilità (i sensori non richiedono alcuna calibrazione), possibilità di collocare i sensori anche ad elevate distanze rispetto al circuito elettrico di controllo e misura.

Il limite di questi sensori è la loro sensibilità ai vapori chimici e ad altre sostanze contaminanti.

I sensori di umidità resistivi sono ampiamente utilizzati in numerose applicazioni industriali, domestiche, commerciali e per il controllo ambientale.



RoHS Compliant

Description

This product specification is applied to the Humidity Sensor Type HCZ-D5. The terminal electrode material uses lead free solder (Sn / Ag / Cu). This product is conformity with RoHS directive which means that lead, cadmium, mercury, hexavalent chromium and specific bromine-based flame retardants have not been used.

Applications

The applications of the component are used in relative humidity measurement, control and display. There are many end products can be used. For example air conditioner, humidifier, dehumidifier, hygrometer, recorder, transmitter etc.

Diagram

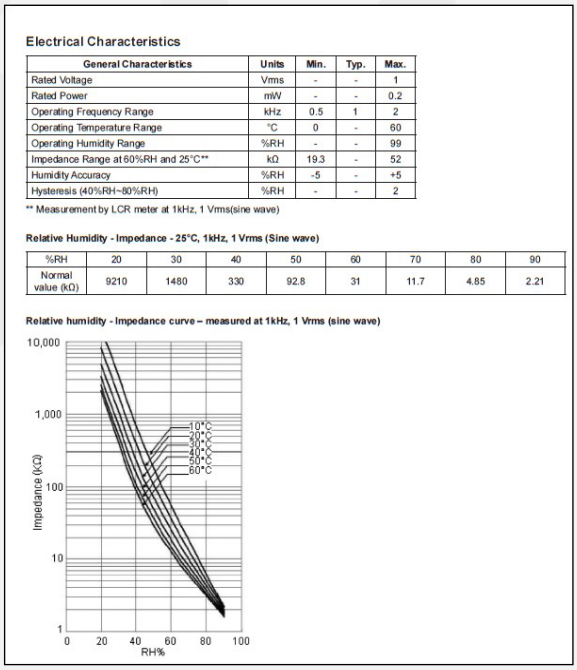
Symbol	Dimension
A	8.3 ±0.2
B	13.5 ±0.2
C	4 ±0.5
D	15 ±2
E	2.54 ±0.2
F	0.5 ±0.1
G	0.2 ±0.1
H	2.0 ±0.5
K	5.08 ±0.3
J	10 ±0.3
L	Min. ≥12

Dimensions : Millimetres

Main Parts

No.	Parts	Material
1	Sensor case	PBT
2	Sensing material	Polymer
3	Electrode	Ag/Carbon
4	Substrate	Alumina
5	Lead frame	Phosphor bronze

Fig.17 – Estratto scheda tecnica sensore di umidità resistivo prodotto dalla Multicomp (disponibile su https://multicomp-pro.com/)



Electrical Characteristics

General Characteristics	Units	Min.	Typ.	Max.
Rated Voltage	Vrms	-	-	1
Rated Power	mW	-	-	0.2
Operating Frequency Range	kHz	0.5	1	2
Operating Temperature Range	°C	0	-	60
Operating Humidity Range	%RH	-	-	99
Impedance Range at 60%RH and 25°C**	kΩ	19.3	-	52
Humidity Accuracy	%RH	-5	-	+5
Hysteresis (40%RH~80%RH)	%RH	-	-	2

** Measurement by LCR meter at 1kHz, 1 Vrms(sine wave)

Relative Humidity - Impedance - 25°C, 1kHz, 1 Vrms (Sine wave)

%RH	20	30	40	50	60	70	80	90
Normal value (kΩ)	9210	1480	330	92.8	31	11.7	4.85	2.21

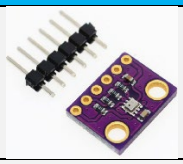
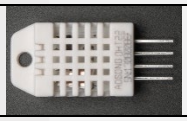
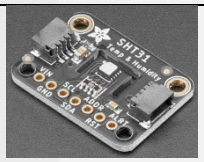
Relative humidity - Impedance curve – measured at 1kHz, 1 Vrms (sine wave)

Figura 18 – Estratto scheda tecnica sensore di umidità resistivo prodotto dalla Multicomp – particolare della curva caratteristica (disponibile su https://multicomp-pro.com/)

2.4.1.4. Ricerca industriale sensori di umidità e pressione

Per consentire al sistema di rilevare l'umidità ambientale e stimare le condizioni ambientali di lavoro (temperatura) presente nell'intercapedine del controsoffitto si prevede l'utilizzo di sensori di

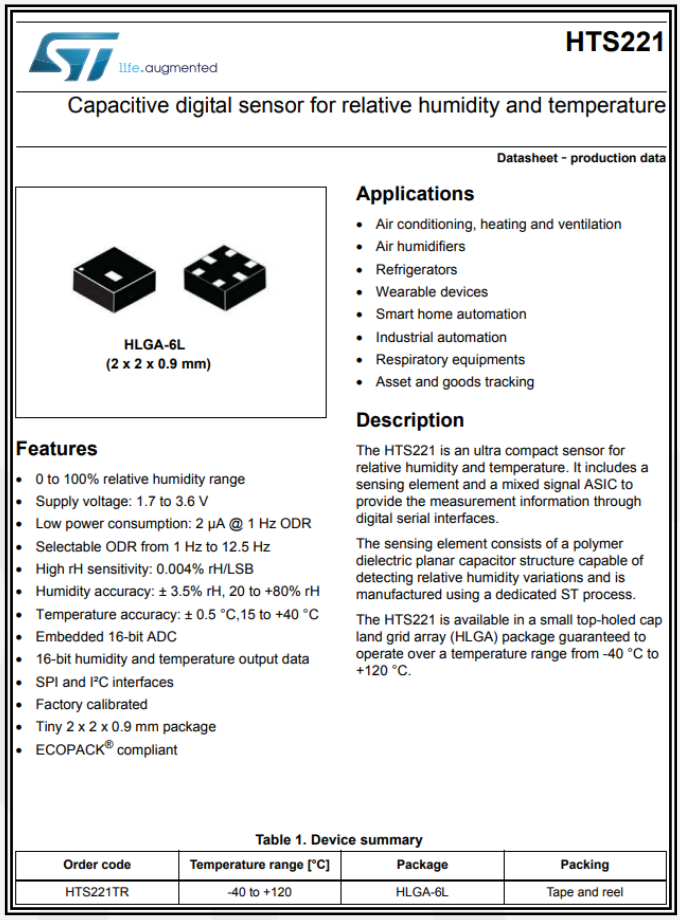
temperatura e di umidità del tipo capacitivo per misurazione affidabile e accurata; considerando l'utilizzo di destinazione e la posizione di montaggio, si utilizzeranno sensori stabili e di dimensioni contenute.

<table>
<tr><th colspan="3">SENSORI DI UMIDITÀ E TEMPERATURA</th></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore di umidità e temperatura DHT11</td><td>  </td></tr>
<tr><td>• Range di temperatura: da 0°C a 50°C</td><td colspan="2">• Range di umidità: da 20% a 90%</td></tr>
<tr><td>• Precisione: ±2°C, ±5% di umidità relativa</td><td colspan="2">• Alimentazione: 3.3V - 5V</td></tr>
<tr><td>• Interfaccia: digitale (1 pin di segnale)</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore di umidità e temperatura DHT22 (o AM2302)</td><td>  </td></tr>
<tr><td>• Range di temperatura: da -40°C a 80°C</td><td colspan="2">• Range di umidità: da 0% a 100%</td></tr>
<tr><td>• Precisione: ±0.5°C, ±2% di umidità relativa</td><td colspan="2">• Alimentazione: 3.3V - 6V</td></tr>
<tr><td colspan="3">Interfaccia: digitale (1 pin di segnale)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore di umidità e temperatura SHT31</td><td>  </td></tr>
<tr><td>• Range di temperatura: da -40°C a 125°C</td><td colspan="2">• Range di umidità: da 0% a 100%</td></tr>
<tr><td>• Precisione: ±0.3°C, ±2% di umidità relativa</td><td colspan="2">• Alimentazione: 2.4V - 5.5V</td></tr>
<tr><td>• Interfaccia: digitale (I2C o interfaccia seriale)</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore di umidità e temperatura BME280</td><td> </td></tr>
<tr><td>• Range di temperatura: da -40°C a 85°C</td><td colspan="2">• Range di umidità: da 0% a 100%</td></tr>
<tr><td>• Precisione: ±1°C, ±3% di umidità relativa</td><td colspan="2">• Alimentazione: 1.71V - 3.6V</td></tr>
<tr><td>• Interfaccia: digitale (I2C o SPI)</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

Per tali ragioni, tra i modelli individuati, si è optato per il modello "HTS221" della "ST life", piccole dimensioni (2 x 2 x 0.9 mm), di cui si riporta un estratto della scheda tecnica (Cfr. fig.19).

HTS221 è un sensore ultra compatto per umidità relativa e temperatura. Include un elemento di rilevamento e un ASIC a segnale misto per fornire le informazioni di misura attraverso interfacce seriali digitali. L'elemento sensibile è costituito da una struttura di condensatore planare dielettrico polimerico in grado di rilevare le variazioni di umidità relativa ed è prodotto utilizzando un processo ST dedicato.

Sensore di umidità e temperatura **HTS221**	
• Range di temperatura: da -40°C a 120°C	• Range di umidità: da 0% a 100%
• Intervallo di umidità relativa da 0 a 100%.	• ADC a 16 bit integrato.
• Precisione: ±0.5°C, ±3.5% di umidità relativa	• 2µA a 1Hz ODR basso consumo energetico.
• Fornisce dati digitali tramite un'interfaccia I2C o SPI	• Il sensore HTS221 è un sensore di umidità e temperatura altamente preciso.
• Dispone di funzionalità avanzate, come l'offset digitale per la calibrazion	• È compatibile con una vasta gamma di applicazioni, come dispositivi portatili, elettrodomestici, controllo ambientale, etc.
• Il package del sensore è piccolo e compatto per una facile integrazione nei progetti.	• Tensione di alimentazione da 1,7 a 3,6 V.
Si consiglia di consultare il datasheet ufficiale del sensore HTS221 di STMicroelectronics per ulteriori informazioni dettagliate sulle sue specifiche tecniche e le modalità di utilizzo. Come mostrato sopra le peculiari caratteristiche del sensore giustificano la sua scelta nell'attuale prototipo sviluppato.	



life.augmented

HTS221

Capacitive digital sensor for relative humidity and temperature

Datasheet - production data

HLGA-6L
(2 x 2 x 0.9 mm)

Applications

- Air conditioning, heating and ventilation
- Air humidifiers
- Refrigerators
- Wearable devices
- Smart home automation
- Industrial automation
- Respiratory equipments
- Asset and goods tracking

Features

- 0 to 100% relative humidity range
- Supply voltage: 1.7 to 3.6 V
- Low power consumption: 2 µA @ 1 Hz ODR
- Selectable ODR from 1 Hz to 12.5 Hz
- High rH sensitivity: 0.004% rH/LSB
- Humidity accuracy: ± 3.5% rH, 20 to +80% rH
- Temperature accuracy: ± 0.5 °C,15 to +40 °C
- Embedded 16-bit ADC
- 16-bit humidity and temperature output data
- SPI and I²C interfaces
- Factory calibrated
- Tiny 2 x 2 x 0.9 mm package
- ECOPACK® compliant

Description

The HTS221 is an ultra compact sensor for relative humidity and temperature. It includes a sensing element and a mixed signal ASIC to provide the measurement information through digital serial interfaces.

The sensing element consists of a polymer dielectric planar capacitor structure capable of detecting relative humidity variations and is manufactured using a dedicated ST process.

The HTS221 is available in a small top-holed cap land grid array (HLGA) package guaranteed to operate over a temperature range from -40 °C to +120 °C.

Table 1. Device summary

Order code	Temperature range [°C]	Package	Packing
HTS221TR	-40 to +120	HLGA-6L	Tape and reel

Fig. 19 – Estratto scheda tecnica del sensore di temperatura e umidità individuato per gli scopi del progetto (disponibile su https://www.st.com/content/st_com/en.html/)

2.4.2. Sensore di pressione

Un **sensore di pressione** è uno strumento costituito da un elemento di rilevazione della pressione che determina la pressione reale applicata al sensore (utilizzando principi di funzionamento diversi) e da alcuni componenti che convertono tali informazioni in un segnale in uscita.

2.4.2.1. Funzionamento

Esiste una varietà di tecnologie utilizzate nei sensori di pressione perché possano fornire risultati accurati. Di seguito alcuni esempi:

- **Sensori di pressione basati su estensimetri**: usano un elemento di rilevazione della pressione su cui sono incollati estensimetri in metallo o su cui sono applicati tramite spruzzamento estensimetri con pellicola sottile. Questo elemento di misura può essere un diaframma; nel caso di estensimetri in lamina di metallo, è possibile utilizzare anche corpi di misura di tipo incapsulato. Il design monolitico di tipo incapsulato ha il grande vantaggio di offrire maggiore rigidezza e la capacità di misurare pressioni molto elevate, fino a 15.000 bar. Il collegamento elettrico viene di norma effettuato tramite un ponte di Wheatstone che consente una buona amplificazione del segnale e risultati di misura precisi e costanti.

- **I sensori di pressione capacitivi** utilizzano la pressione in cavità e un diaframma per produrre un condensatore variabile. Quando viene applicata pressione, il diaframma subisce una deformazione e la capacità elettrica diminuisce proporzionalmente. Questa variazione di capacità può essere misurata elettricamente per essere poi messa in relazione con la pressione applicata. Questi sensori sono limitati a pressioni basse (circa 40 bar).

- **I sensori di pressione piezoresistivi** sono costituiti da un diaframma (per la maggior parte in silicone) con estensimetri integrati per rilevare le deformazioni risultanti dalla pressione applicata. La configurazione tipica di questi estensimetri è un circuito a ponte di Wheatstone che riduce la sensibilità e aumenta i valori in uscita. Grazie al materiale usato, il limite di pressione è di circa 1000 bar.

- A differenza delle tecnologie descritte sopra, che utilizzano tutte la curvatura di un corpo di misura, **i sensori di pressione a risonanza** usano le variazioni nella frequenza di risonanza in un meccanismo di rilevazione per misurare le sollecitazioni provocate dalla pressione applicata. A seconda del design dei sensori, l'elemento di risonanza può essere esposto al mezzo, nel qual caso

la frequenza di risonanza dipende dalla densità del mezzo. In alcuni casi questi sensori sono sensibili agli urti e alle vibrazioni.

2.4.2.2. Tipi di misurazione della pressione

Per classificare i sensori di pressione, si utilizzano diversi parametri, tra cui l'intervallo di pressione che misurano, gli intervalli di pressione in condizioni di funzionamento o il tipo di pressione che misurano.

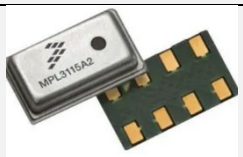
I diversi tipi di pressione utilizzati possono essere pressione assoluta, pressione manometrica, pressione con manometro sigillato e pressione differenziale.

- **I sensori di pressione assoluta** misurano la pressione relativa a una camera di riferimento (quasi-vuoto);
- **I sensori di pressione manometrica** (o sensori di pressione relativa) vengono usati per misurare la pressione relativa alla pressione atmosferica attuale;
- **I sensori di pressione con manometro sigillato** sono simili ai sensori di pressione manometrica, ma misurano la pressione relativa a una pressione fissa invece che alla pressione atmosferica attuale;
- **I sensori di pressione differenziale** determinano la differenza tra due pressioni e possono essere utilizzati per misurare cali di pressione, livelli di fluido e portate.

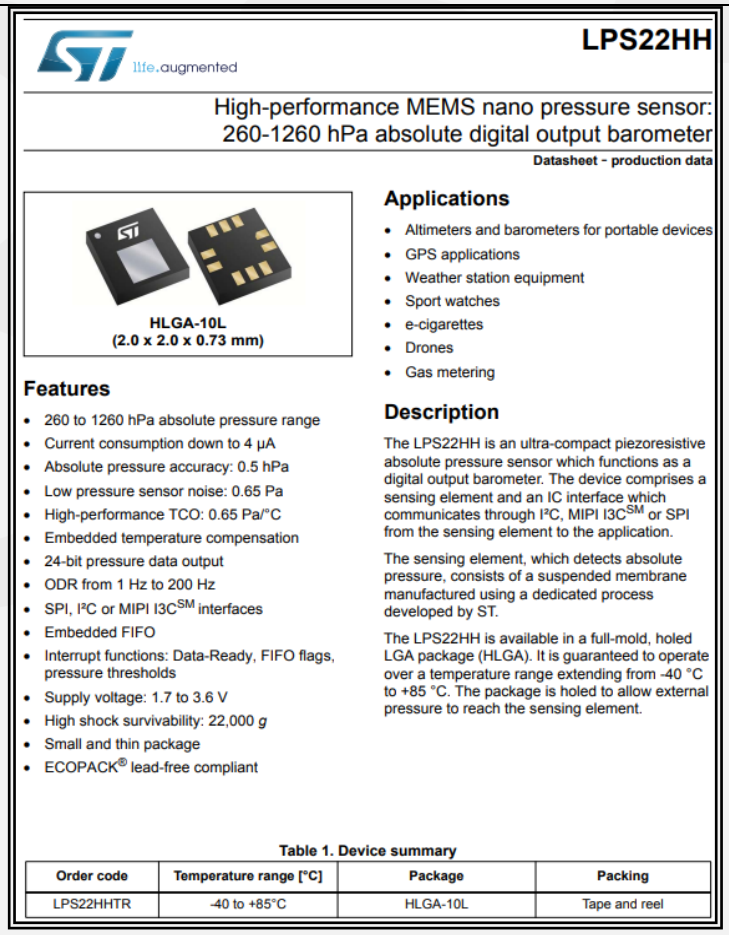
Il vantaggio evidente di un sensore di pressione assoluta è quello di ottenere misurazioni relative sempre alla stessa pressione (vuoto) e quindi non soggette alle variazioni della pressione atmosferica o della temperatura.

2.4.2.3. Ricerca industriale sensori di pressione

Per consentire al sistema HMD di rilevare la pressione assoluta (stima condizioni ambientali di lavoro) presente nell'intercapedine del controsoffitto è stata eseguita una indagine di mercato, volta alla ricerca di un sensore di pressione che meglio si adattasse alle condizioni di utilizzo e alla posizione di montaggio.

SENSORI DI PRESSIONE	
Sensore di pressione **BMP280**	
• Range di pressione: da 300 hPa a 1100 hPa	• Precisione: ±1 hPa
• Alimentazione: 1.71V - 3.6V	• Interfaccia: I2C o SPI
• Include una funzione di compensazione di temperatura	• Consumo energetico molto basso
Sensore di pressione **BME280**	
• Range di pressione: da 300 hPa a 1100 hPa	• Precisione: ±1 hPa
• Alimentazione: 1.71V - 3.6V	• Interfaccia: I2C o SPI
• Include una funzione di compensazione di temperatura e di umidità	• Dispone di un sensore di umidità integrato
Sensore di pressione **MPL3115A2**	
• Range di pressione: da 20 kPa a 110 kPa	• Precisione: ±1 kP
• Alimentazione: 2.0V - 3.6	• Interfaccia: I2C
• Supporta la misurazione dell'altitudine barometrica	• Dispone di funzionalità avanzate, come l'autocalibrazione
Sensore di pressione **LPS22HH**	

• Range di pressione: da 260 hPa a 1260 hPa	• Precisione: ±0.5 hPa
• Alimentazione: 1.71V - 3.6V	• Interfaccia: I2C o SP
• Consumo energetico molto basso	• Dispone di una modalità a bassa potenza per l'acquisizione dati
• Supporta la misurazione dell'altitudine barometrica	• Fornisce dati digitali tramite un'interfaccia I2C o SPI
• Dispone di una modalità a bassa potenza per l'acquisizione dei dati	• È compatibile con una vasta gamma di applicazioni, come meteorologia, monitoraggio ambientale, navigazione, etc.
• Il package del sensore è piccolo e compatto per una facile integrazione nei progetti.	
Si consiglia di consultare il datasheet ufficiale del sensore LPS22HH della STMicroelectronics per ulteriori informazioni dettagliate sulle sue specifiche tecniche e le modalità di utilizzo.	



LPS22HH

life.augmented

High-performance MEMS nano pressure sensor: 260-1260 hPa absolute digital output barometer

Datasheet - production data

HLGA-10L
(2.0 x 2.0 x 0.73 mm)

Applications

- Altimeters and barometers for portable devices
- GPS applications
- Weather station equipment
- Sport watches
- e-cigarettes
- Drones
- Gas metering

Features

- 260 to 1260 hPa absolute pressure range
- Current consumption down to 4 µA
- Absolute pressure accuracy: 0.5 hPa
- Low pressure sensor noise: 0.65 Pa
- High-performance TCO: 0.65 Pa/°C
- Embedded temperature compensation
- 24-bit pressure data output
- ODR from 1 Hz to 200 Hz
- SPI, I²C or MIPI I3C^{SM} interfaces
- Embedded FIFO
- Interrupt functions: Data-Ready, FIFO flags, pressure thresholds
- Supply voltage: 1.7 to 3.6 V
- High shock survivability: 22,000 *g*
- Small and thin package
- ECOPACK® lead-free compliant

Description

The LPS22HH is an ultra-compact piezoresistive absolute pressure sensor which functions as a digital output barometer. The device comprises a sensing element and an IC interface which communicates through I²C, MIPI I3C^{SM} or SPI from the sensing element to the application.

The sensing element, which detects absolute pressure, consists of a suspended membrane manufactured using a dedicated process developed by ST.

The LPS22HH is available in a full-mold, holed LGA package (HLGA). It is guaranteed to operate over a temperature range extending from -40 °C to +85 °C. The package is holed to allow external pressure to reach the sensing element.

Table 1. Device summary

Order code	Temperature range [°C]	Package	Packing
LPS22HHTR	-40 to +85°C	HLGA-10L	Tape and reel

Figura 20 – Estratto scheda tecnica del sensore di pressione per gli scopi del progetto (disponibile su https://www.st.com/content/st_com/en.html/)

Come mostrato sopra, le peculiari caratteristiche del sensore “modello LPS22HH” della “ST life”, giustificano la sua scelta nell’attuale prototipo sviluppato. Pertanto, si è previsto l’utilizzo di un

sensore di pressione del tipo piezorestivo per una misurazione affidabile e accurata; le dimensioni contenute, considerando l'utilizzo di destinazione e la posizione di montaggio, fortificano ancor di più la sua scelta nel sistema di monitoraggio.

L' "LPS22HH" è un sensore di pressione assoluta piezoresistivo ultracompatto che funziona come un barometro con uscita digitale. Il dispositivo comprende un elemento sensibile e un'interfaccia IC che comunica tramite I2C, MIPI I3C SM o SPI dall'elemento sensibile all'applicazione.

L'elemento sensibile, che rileva la pressione assoluta, è costituito da una membrana sospesa realizzata mediante un processo dedicato sviluppato da ST.

LPS22HH è disponibile in un pacchetto LGA full-mould forato (HLGA). È garantito il funzionamento in un intervallo di temperatura che va da -40 °C a +85 °C. Il pacchetto è forato per consentire alla pressione esterna di raggiungere l'elemento sensibile

2.4.3. Sensori di movimento

Un altro aspetto importante per il sistema combinato è la rilevazione dei movimenti dei materiali in caduta (ad es. eventuali copriferri, porzioni di pignatta e/o finitura). Per tale rilevazione si è deciso di utilizzare la seguente tipologia di sensori:

- Accelerometrici e giroscopici;
- Magnetometrici;
- Time of flight;

2.4.3.1. Sensori accelerometrici e giroscopici

Molti dispositivi sensoriali diversi sono usati per determinare la posizione e l'orientamento di un oggetto. I più comuni di questi sensori sono il giroscopio e l'accelerometro. Anche se simili nello

scopo, misurano cose diverse. Quando sono combinati in un singolo dispositivo, possono fornire una serie di importanti informazioni.

Un giroscopio è un dispositivo che usa la gravità terrestre per aiutare a determinare l'orientamento. Il suo design consiste in un disco liberamente rotante chiamato rotore, montato su un asse di rotazione al centro di una ruota più grande e stabile. Mentre l'asse gira, il rotore rimane fermo per indicare l'attrazione gravitazionale centrale, e quindi da che parte è "giù".

I giroscopi furono inventati e nominati per la prima volta nel XIX secolo dal fisico francese Jean-Bernard-Léon Foucault. Solo nel 1908 l'inventore tedesco H. Anschütz-Kaempfe sviluppò la prima girobussola funzionante, secondo l'Enciclopedia Britannica. Fu creata per essere usata in un sommergibile. Poi, nel 1909, fu usata per creare il primo pilota automatico.

Un accelerometro è un dispositivo compatto progettato per misurare l'accelerazione non gravitazionale. Quando l'oggetto in cui è integrato passa da fermo a qualsiasi velocità, l'accelerometro è progettato per rispondere alle vibrazioni associate a tale movimento. Utilizza cristalli microscopici che vanno sotto stress quando si verificano le vibrazioni, e da questo stress si genera una tensione per creare una lettura su qualsiasi accelerazione. Gli accelerometri sono componenti importanti per i dispositivi che tracciano il fitness e altre misure nell'auto-movimento quantificato.

Il primo accelerometro fu chiamato la macchina Atwood e fu inventato dal fisico inglese George Atwood nel 1783, secondo il libro "Practical MEMS," di Ville Kaajakari.

La differenza principale tra i due dispositivi è semplice: uno può sentire la rotazione, mentre l'altro no. In un certo senso, l'accelerometro può misurare l'orientamento di un oggetto fermo rispetto alla superficie terrestre. Quando accelera in una particolare direzione, l'accelerometro non è in grado di distinguere tra questa e l'accelerazione fornita dall'attrazione gravitazionale della Terra. Se si dovesse

considerare questo handicap quando viene usato in un aereo, l'accelerometro perde rapidamente molto del suo fascino.

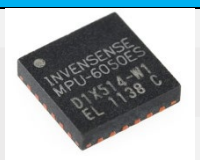
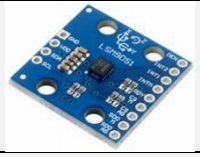
Il giroscopio mantiene il suo livello di efficacia essendo in grado di misurare il tasso di rotazione intorno a un particolare asse. Quando misura il tasso di rotazione intorno all'asse di rollio di un aereo, identifica un valore reale fino a quando l'oggetto si stabilizza. Utilizzando i principi chiave del momento angolare, il giroscopio aiuta a indicare l'orientamento. In confronto, l'accelerometro misura l'accelerazione lineare basata sulla vibrazione.

Il tipico accelerometro a due assi dà agli utenti una direzione di gravità in un aereo, smartphone, auto o altro dispositivo. In confronto, un giroscopio è destinato a determinare una posizione angolare basata sul principio della rigidità dello spazio. Le applicazioni di ogni dispositivo variano abbastanza drasticamente nonostante il loro scopo simile. Un giroscopio, per esempio, è utilizzato nella navigazione su veicoli aerei senza equipaggio, bussole e grandi imbarcazioni, aiutando in definitiva la stabilità nella navigazione. Gli accelerometri sono altrettanto diffusi nell'uso e si possono trovare nell'ingegneria, nei macchinari, nel monitoraggio dell'hardware, nell'edilizia e nel monitoraggio strutturale, nella navigazione, nei trasporti e anche nell'elettronica di consumo.

L'apparizione dell'accelerometro nel mercato dell'elettronica di consumo, con l'introduzione di dispositivi così diffusi come l'iPhone che lo utilizzano per l'app bussola integrata, ha facilitato la sua popolarità complessiva in tutti i settori del software. Determinare l'orientamento dello schermo, agire come una bussola e annullare le azioni semplicemente scuotendo lo smartphone sono alcune funzioni che si basano sulla presenza di un accelerometro. Negli ultimi anni, la sua applicazione tra l'elettronica di consumo, si è estesa ai device portatili.

2.4.3.2. Ricerca industriale dei sensori accelerometrici e giroscopici

Per consentire al sistema HMD di rilevare l'eventuale caduta di materiale (distacchi intonaco e/o pezzi di laterizio dall'estradosso dei solai) tramite stima delle vibrazioni associate a tale movimento, è stata eseguita una indagine di mercato, volta alla ricerca di un sensore accelerometrico e giroscopico che meglio si adattasse alle condizioni di utilizzo e alla posizione di montaggio.

<table>
<tr><th colspan="3">SENSORI ACCELOMETRICI E GIROSCOPICI</th></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore accelerometrico e giroscopico MPU-6050</td><td>  </td></tr>
<tr><td>• Range di accelerazione: ±2g, ±4g, ±8g, ±16g</td><td>• Range di velocità angolare: ±250°/s, ±500°/s, ±1000°/s, ±2000°/s</td><td></td></tr>
<tr><td>• Risoluzione: 16 bit per accelerazione e velocità angolare</td><td>• Alimentazione: 2.3V - 3.4V</td><td></td></tr>
<tr><td>• Interfaccia: I2C o SPI</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore accelerometrico e giroscopico MPU-9250</td><td> </td></tr>
<tr><td>• Range di accelerazione: ±2g, ±4g, ±8g, ±16g</td><td>• Range di velocità angolare: ±250°/s, ±500°/s, ±1000°/s, ±2000°/s</td><td></td></tr>
<tr><td>• Risoluzione: 16 bit per accelerazione e velocità angolare</td><td>• Alimentazione: 2.4V - 3.6V</td><td></td></tr>
<tr><td>• Interfaccia: I2C o SPI</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore accelerometrico e giroscopico LSM6DS3</td><td> </td></tr>
<tr><td>• Range di accelerazione: ±2g, ±4g, ±8g, ±16g</td><td>• Range di velocità angolare: ±125°/s, ±245°/s, ±500°/s, ±1000°/s, ±2000°/s</td><td></td></tr>
<tr><td>• Risoluzione: 16 bit per accelerazione e velocità angolare</td><td>• Alimentazione: 1.71V - 3.6V</td><td></td></tr>
<tr><td>• Interfaccia: I2C o SPI</td><td>• Include una funzione di rilevamento dell'orientamento (orientation detection)</td><td></td></tr>
<tr><td>• Dispone di una modalità a basso consumo energetico</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Sensore accelerometrico e giroscopico LSM9DS1</td><td>  </td></tr>
</table>

• Range di accelerazione: ±2g, ±4g, ±8g, ±16g	• Range di velocità angolare: ±245°/s, ±500°/s, ±2000°/s
• Risoluzione: 16 bit per accelerazione e velocità angolare	• Alimentazione: 2.4V - 3.6V
• Interfaccia: I2C o SPI	• Supporta la rilevazione delle rotazioni (sensor fusion) tramite un algoritmo interno
Sensore accelerometrico e giroscopico **LSM6DSO**	
• Range di accelerazione: ±2g, ±4g, ±8g, ±16g	• Range di velocità angolare: ±125°/s, ±245°/s, ±500°/s, ±1000°/s, ±2000°/s
• Risoluzione: 16 bit per accelerazione e velocità angolare	• Consumo energetico molto basso
• Il sensore LSM6DS è un modulo compatto che integra un accelerometro a 3 assi e un giroscopio a 3 assi.	• Fornisce dati digitali tramite un'interfaccia I2C o SPI
• Dispone di funzionalità avanzate, come il rilevamento dell'orientamento e una modalità a basso consumo energetico	• È compatibile con una vasta gamma di applicazioni, come robotica, navigazione inerziale, dispositivi indossabili, etc.
• Il package del sensore è piccolo e compatto per una facile integrazione nei progetti.	
Si consiglia di consultare il datasheet ufficiale del sensore LSM6DS della STMicroelectronics per ulteriori informazioni dettagliate sulle sue specifiche tecniche e le modalità di utilizzo. Come mostrato sopra le peculiari caratteristiche del sensore giustificano la sua scelta nell'attuale prototipo sviluppato.	

LSM6DSO

life.augmented

Datasheet

iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope

LGA-14L
(2.5 x 3.0 x 0.83 mm) typ.

Features

- Power consumption: 0.55 mA in combo high-performance mode
- "Always-on" experience with low power consumption for both accelerometer and gyroscope
- Smart FIFO up to 9 kbyte
- Android compliant
- ±2/±4/±8/±16 *g* full scale
- ±125/±250/±500/±1000/±2000 dps full scale
- Analog supply voltage: 1.71 V to 3.6 V
- Independent IO supply (1.62 V)
- Compact footprint: 2.5 mm x 3 mm x 0.83 mm
- SPI / I²C & MIPI I3C℠ serial interface with main processor data synchronization
- Auxiliary SPI for OIS data output for gyroscope and accelerometer
- Advanced pedometer, step detector and step counter
- Significant Motion Detection, Tilt detection
- Standard interrupts: free-fall, wakeup, 6D/4D orientation, click and double-click
- Programmable Finite State Machine: accelerometer, gyroscope and external sensors
- Embedded temperature sensor
- ECOPACK®, RoHS and "Green" compliant

Product status link

LSM6DSO

Product summary

Order code	LSM6DSO	LSM6DSOTR
Temperature range [°C]	-40 to +85	
Package	LGA-14L (2.5 x 3 x 0.83 mm)	
Packing	Tray	Tape & Reel

Product label

SUSTAINABLE TECHNOLOGY

Applications

- Motion tracking and gesture detection
- Sensor hub
- Indoor navigation
- IoT and connected devices
- Smart power saving for handheld devices
- EIS and OIS for camera applications
- Vibration monitoring and compensation

Description

The LSM6DSO is a system-in-package featuring a 3D digital accelerometer and a 3D digital gyroscope boosting performance at 0.55 mA in high-performance mode and enabling always-on low-power features for an optimal motion experience for the consumer.

The LSM6DSO supports main OS requirements, offering real, virtual and batch sensors with 9 kbytes for dynamic data batching. ST's family of MEMS sensor modules leverages the robust and mature manufacturing processes already used for the production of micromachined accelerometers and gyroscopes. The various sensing elements are manufactured using specialized micromachining processes, while the IC interfaces are developed using CMOS technology that allows the design of a dedicated circuit which is trimmed to better match the characteristics of the sensing element.

Fig.21 – Estratto scheda tecnica del sensore accelerometrico e giroscopico per gli scopi del progetto (disponibile su https://www.st.com/content/st_com/en.html/)

2.4.4. Sensore magnetico

Un **sensore di campo magnetico** (o più semplicemente un **magnetometro**) è uno strumento di misura dell'intensità e della direzione, appunto, del **campo magnetico** locale. Trova applicazione in diversi ambiti, dall'archeologia per la ricerca di siti sotterranei alla meteorologia per lo studio delle aurore, dall'esplorazione dei siti carboniferi ai sistemi di perforatura direzionale, dal rilevamento di sottomarini e ordigni in ambito militare alle applicazioni di esplorazione planetaria, dalla navigazione (rappresentativo è in questo caso l'esempio delle bussole per l'orientamento) alla medicina.

2.4.4.1. Funzionamento

I sensori di campo magnetico possono essere classificati in base al loro principio di funzionamento. I dispositivi di tipo galvanico, ad esempio, si basano sull'**effetto Hall**, in altre parole (si veda la **Figura 1**) l'insorgere di una tensione sulle facce di una lamina di materiale conduttore o semi-conduttore quando questa è attraversata da una corrente longitudinale e in presenza di un campo magnetico perpendicolare.

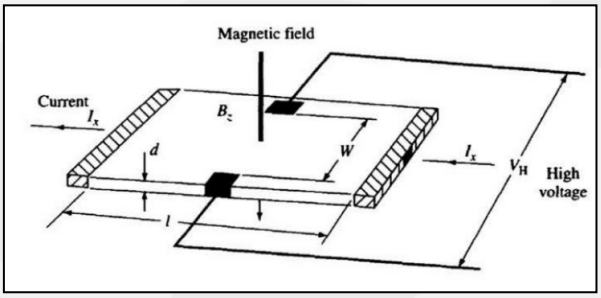


Fig. 22- Principio di funzionamento di un sensore a effetto Hall

La tensione generata è data dalla relazione seguente

$$V_H = \left(\frac{-1}{ne}\right)\frac{I_x B_z}{d} = R_H \frac{I_x B_z}{d}$$

dove n è il numero di portatori di carica, e la carica dell'elettrone, RH il coefficiente Hall, Bz ed Ix le intensità, rispettivamente, della componente perpendicolare del campo magnetico e di quella trasversale della corrente che attraversa la lamina di materiale. I sensori a effetto Hall sono fabbricabili utilizzando processi standard bipolari o CMOS su substrati drogati di tipo n. I dispositivi bipolari hanno una sensibilità di circa 50 V/AT mentre quelli nMOS fino a 1000 V/AT. Lo svantaggio principale di tali sensori è legato alla scarsa sensibilità, soprattutto per bassi valori dell'intensità di campo, a causa delle tensioni di offset presenti ai capi della lamina. Per questo sono tipicamente utilizzati in applicazioni con campi piuttosto intensi, come ad esempio per i dispositivi ABS delle

autovetture. Più elevata sensibilità si ottiene con i dispositivi magnetoresistivi, i quali basano il funzionamento sulla variazione della resistenza del materiale in presenza di un campo magnetico esterno. Tale resistenza varia, infatti, di un fattore:

$$(1 + \theta_H)$$

dove

$$\theta_H$$

noto come *angolo di Hall*, è l'angolo del quale la corrente longitudinale è ruotata come effetto della presenza del campo magnetico; per tale angolo vale la seguente approssimazione:

$$\theta_H \approx k_g \mu^2 B_z^2$$

dove **μ** è la mobilità dei portatori di carica. Tipicamente, i semiconduttori non evidenziano elevata mobilità (1600 cm2/Vs), per questo motivo sono più spesso usati, in tali applicazioni, materiali come l'InSb, drogato con NiSb. Gli svantaggi principali sono l'elevata dipendenza della temperatura dalla variazione di resistenza e la difficoltà di lavorare tali materiali con tecniche classiche di produzione di circuiti integrati. Compatibili con tali processi sono invece i magnetodiodi e i magnetotransistori. Nel caso di questi ultimi (ne sono mostrati in Figura 23 due diversi layout), in particolare, la generazione di una tensione nella regione attiva per effetto Hall in presenza di un campo magnetico esterno produce una modulazione della corrente di emettitore e quindi di collettore.

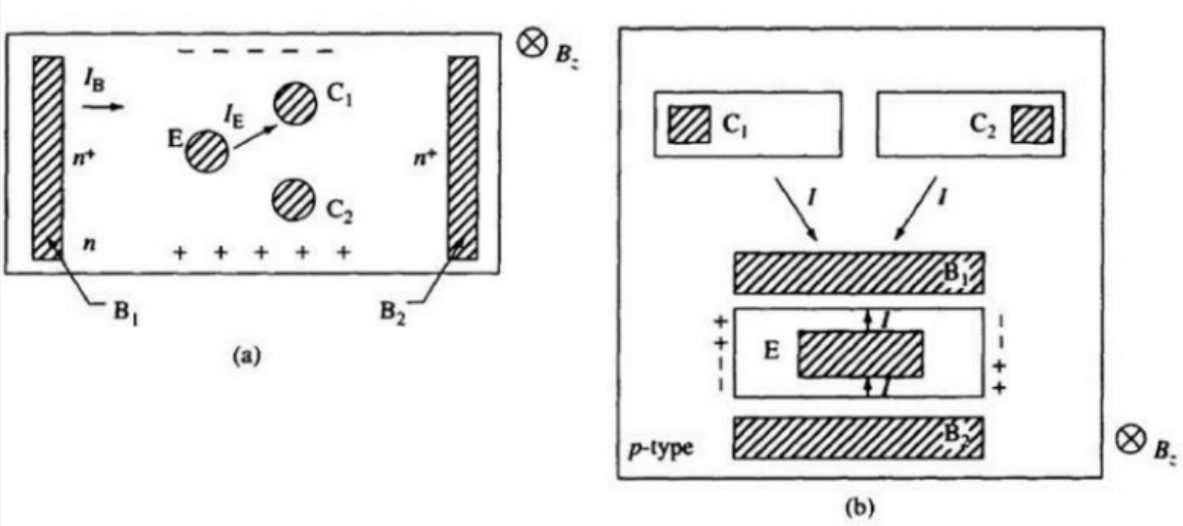


Fig.23-Schemi alternativi di magnetotransistori

Nel caso della Figura 23a, ad esempio, la variazione di corrente di collettore, avendo applicato una tensione di polarizzazione ai punti di contatto di base b1 e b2, è data dalla seguente espressione:

$$\Delta I_C = k_g(\mu_n + \mu_p)B_z I_E$$

Misurando questa, nota la corrente di emettitore, è possibile misurare il campo magnetico presente. Sensibilità ancora più elevata si ottiene con i sensori SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) i quali si basano (Figura 24) su strutture ad anello di materiale superconduttore interrotte da una (RF SQUID) o due (DC SQUID) giunzione Josephson. In quest'ultimo caso, ad esempio, in presenza di una corrente di polarizzazione, si osserva l'insorgere di una differenza di flusso magnetico tra le due spire che è proporzionale al prodotto tra l'intensità stessa di corrente e la differenza dei seni delle fasi del campo in corrispondenza delle due giunzioni. Mediando l'oscillazione di tale tensione, si determina una caratteristica V-I del sensore dalla misura dalla quale è quindi possibile risalire all'intensità di campo incidente. La sensibilità dei sensori SQUID può arrivare fino a 10 - 4 T, confrontabile con l'intensità di campo associata alle onde cerebrali o all'attività cardiaca; sensori SQUID sono per questo, spesso usati in apparecchiature medicali per magnetoencefalogrammi e

magnetocardiogrammi. Lo svantaggio principale di tali dispositivi risiede nella necessità di raffreddare a basse temperature il superconduttore.

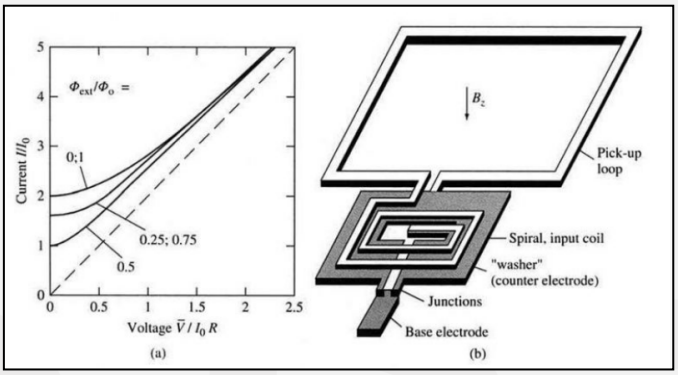


Fig. 24 - Schema di un sensore SQUID (b) e tipiche caratteristiche I_V (a)

Tra le applicazioni più interessanti di un sensore di campo magnetico vi è certamente, come accennato inizialmente, la realizzazione di una **bussola digitale**. In questo caso, il magnetometro serve a misurare le componenti del campo geo-magnetico per determinare la posizione del polo terrestre. La direzione nord può essere tracciata, infatti, calcolando l'arcotangente del rapporto tra le due componenti orizzontali del campo stesso. In tali applicazioni, la misura del magnetometro viene spesso corretta mediante un accelerometro a tre assi che permetta di determinare l'orientamento nello spazio della bussola stessa, ovvero i parametri di betcheggio (pitch) e rollìo (roll) relativi. Un'interessante Application Note di Freescale mostra come realizzare, su queste basi, una bussola digitale con capacità di correzione di inclinazione. Di seguito ne sono riportati i punti salienti. Indichiamo con Br e Gr, rispettivamente, le misure delle componenti del campo magnetico e dell'accelerazione di gravità fornite dal magnetometro e dall'accelerometro lungo i relativi assi. In condizioni che potremmo definire di riferimento, con la bussola orientata sul piano orizzontale in direzione nord (useremo il sistema di coordinate standard NED), tali misure valgono rispettivamente:

$$G_r = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}$$

$$B_r = B \begin{pmatrix} cos\delta \\ 0 \\ sin\delta \end{pmatrix}$$

dove g è l'accelerazione di gravità, B l'intensità del campo magnetico terrestre (che varia da un minimo di 22 μT nel Sud America a un massimo di 67 μT nel sud dell'Australia) e l'angolo di inclinazione del campo stesso misurato dall'orizzontale (che varia da -90° al polo sud magnetico a +90° al polo nord magnetico). Se, invece, la bussola ha un orientamento generico rispetto alla posizione di riferimento, il magnetometro e l'accelerometro forniranno le seguenti letture (lungo i tre assi) per quanto riguarda accelerazione di gravità e campo magnetico terrestre:

$$G_p = \boldsymbol{R}_x(\varphi)\boldsymbol{R}_y(\theta)\boldsymbol{R}_z(\square) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}$$

$$B_r = \boldsymbol{R}_x(\varphi)\boldsymbol{R}_y(\theta)\boldsymbol{R}_z(\square) B \begin{pmatrix} cos\delta \\ 0 \\ sin\delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}$$

Nelle espressioni di sopra

$$R_x(\varphi),\ R_y(\theta) \text{ e } R_z(\psi)$$

rappresentano evidentemente le **tre matrici di rotazione** che descrivono, appunto, il nuovo orientamento della bussola rispetto al sistema di riferimento inizialmente adottato. Il vettore V è stato invece introdotto per compensare (mediante un semplice modello a tre elementi) le perturbazioni attribuibili alla presenza di materiali magnetizzabili nell'ambiente circostante; questi sono noti come

effetti di Hard Iron. In applicazioni più complesse, per avere una migliore accuratezza, andrebbero in realtà compensate anche le analoghe perturbazioni (note come effetti di Soft Iron) attribuibili ai campi magnetici permanenti, causate, ad esempio, da calamite o da correnti continue che scorrono vicino alla bussola. Dalle misure ottenute dall'accelerometro e dal magnetometro è infine possibile risalire agli angoli di rotazione della bussola. Questi sono dati dalle seguenti relazioni:

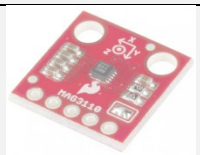
$$\varphi = arctan\left({G_{py}}/{G_{pz}}\right)$$

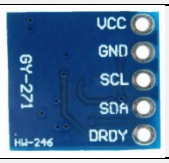
$$\theta = arctan\left({-G_{px}}/{(G_{py}sin\varphi + G_{pz}cos\varphi+)}\right)$$

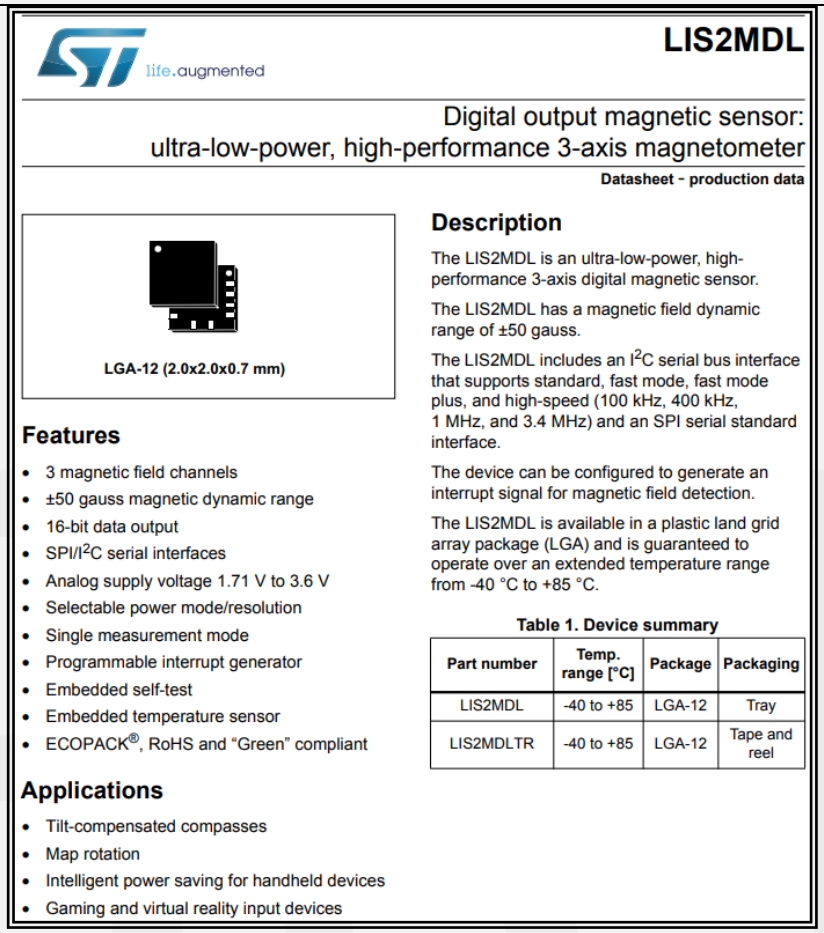
$$\square = arctan\left(\frac{(B_{pz} - V_z)sin\varphi - (B_{py} - V_y)cos\varphi}{(B_{px} - V_x)sin\theta + (B_{py} - V_y)sin\theta sin\varphi + (B_{pz} - V_{yz})sin\theta cos\varphi}\right)$$

2.4.4.2. Ricerca industriale sensore magnetico

Per consentire al sistema HMD di rilevare la posizione esatta dei sensori e stimare l'allineamento tra gli stessi è stata eseguita una indagine di mercato, volta alla ricerca di un sensore magnetometrico che meglio si adattasse alle condizioni di utilizzo e alla posizione di montaggio.

SENSORI MAGNETOMETRICI	
Sensore magnetometrico **HMC5883L**	
• Range di campo magnetico: ±1.3 gauss	• Range di campo magnetico: ±1.3 gauss
• Risoluzione: 2.5 milligauss	• Alimentazione: 2.16V - 3.6
• Interfaccia: I2C	• Sensore magnetometrico MAG3110:
Sensore magnetometrico **MAG3110**	
• Range di campo magnetico: ±1000µT	• Risoluzione: 0.1µT
• Alimentazione: 1.95V - 3.6V	• Interfaccia: I2C

Sensore magnetometrico **QMC5883L**	
• Range di campo magnetico: ±8 gauss	• Risoluzione: 0.5 milligauss
• Alimentazione: 2.16V - 3.6V	• Interfaccia: I2C
Sensore magnetometrico **LIS2MDL**	
• Range di campo magnetico: ±4 gauss	• Risoluzione: 0.15 milligauss
• Alimentazione: 1.62V - 3.6V	• Interfaccia: I2C o SPI
• Dispone di un filtro passa-basso per ridurre il rumore	• Include una funzione di autotest per la calibrazione
• Supporta la modalità a basso consumo energetico	• È compatibile con una vasta gamma di applicazioni, come navigazione inerziale, geolocalizzazione, realtà aumentata, etc.
• È compatibile con una vasta gamma di applicazioni, come navigazione inerziale, geolocalizzazione, realtà aumentata, etc.	• Il package del sensore è piccolo e compatto per una facile integrazione nei progetti.
Si consiglia di consultare il datasheet ufficiale del sensore LIS2MDL della STMicroelectronics per ulteriori informazioni dettagliate sulle sue specifiche tecniche e le modalità di utilizzo. Come mostrato sopra le peculiari caratteristiche del sensore giustificano la sua scelta nell'attuale prototipo sviluppato.	



life.augmented

LIS2MDL

Digital output magnetic sensor:
ultra-low-power, high-performance 3-axis magnetometer

Datasheet - production data

LGA-12 (2.0x2.0x0.7 mm)

Features

- 3 magnetic field channels
- ±50 gauss magnetic dynamic range
- 16-bit data output
- SPI/I²C serial interfaces
- Analog supply voltage 1.71 V to 3.6 V
- Selectable power mode/resolution
- Single measurement mode
- Programmable interrupt generator
- Embedded self-test
- Embedded temperature sensor
- ECOPACK®, RoHS and "Green" compliant

Applications

- Tilt-compensated compasses
- Map rotation
- Intelligent power saving for handheld devices
- Gaming and virtual reality input devices

Description

The LIS2MDL is an ultra-low-power, high-performance 3-axis digital magnetic sensor.

The LIS2MDL has a magnetic field dynamic range of ±50 gauss.

The LIS2MDL includes an I²C serial bus interface that supports standard, fast mode, fast mode plus, and high-speed (100 kHz, 400 kHz, 1 MHz, and 3.4 MHz) and an SPI serial standard interface.

The device can be configured to generate an interrupt signal for magnetic field detection.

The LIS2MDL is available in a plastic land grid array package (LGA) and is guaranteed to operate over an extended temperature range from -40 °C to +85 °C.

Table 1. Device summary

Part number	Temp. range [°C]	Package	Packaging
LIS2MDL	-40 to +85	LGA-12	Tray
LIS2MDLTR	-40 to +85	LGA-12	Tape and reel

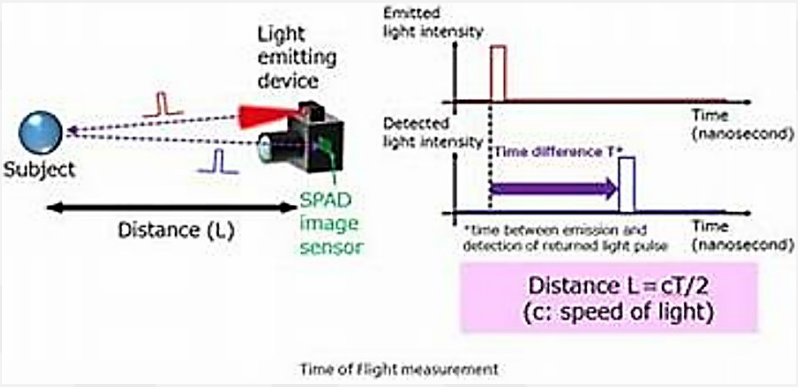
Fig.25 – Estratto scheda tecnica del sensore magnetico per gli scopi del progetto (disponibile su https://www.st.com/content/st_com/en.html/)

2.4.5. Sensore di misurazione del tempo di volo (TOF)

Una delle alternative da prendere in considerazione per il rilevamento di prossimità sono i sensori ToF. Questi misurano la distanza da un oggetto bersaglio calcolando il tempo del viaggio di andata e ritorno dei fotoni, dal sensore all'oggetto e viceversa. Fino ad oggi non è stato facile implementare progetti ToF in modo rapido e a costi contenuti, ma le nuove generazioni di sensori ToF altamente integrati e poco costosi adesso mettono a disposizione un rilevamento senza contatto estremamente accurato e a costi inferiori. Dal punto di vista tecnico, i sensori **ToF** basano il loro funzionamento sulla luce infrarossa.

2.4.5.1. Funzionamento

Il loro nome, **time of flight - tempo di volo**, corrisponde al fondamento del loro funzionamento. La fotocamera ToF invia infatti un segnale di luce infrarossa verso l'oggetto da mappare, questa viene riflessa e torna al sensore stesso. In base al tempo impiegato per tornare indietro dal fascio infrarosso, ovvero dal tempo in cui il fascio di luce è stato "in volo", si riesce a calcolare la distanza dell'oggetto dalla fotocamera.



Quanto appena detto descrive in modo semplificato il funzionamento di un sensore ToF. In sostanza possiamo paragonarlo al funzionamento dei sensori d'impronte a ultrasuoni, che sono altrettanto diffusi nel settore smartphone. In questo caso, la variabile che entra in gioco è il tempo di volo del segnale preso in esame, mentre per i sensori d'impronte si tratta dei parametri geometrici delle onde sonore riflesse o rifratte.

Nel caso delle fotocamere ToF, il tempo di volo permette di calcolare la distanza dell'oggetto inquadrato dal sensore.

Questo implica che il punto forte, dal punto di vista computazionale e tecnico, dei sensori ToF è la sensibilità del calcolatore del tempo di volo. La velocità della luce infrarossa rimane costante, l'unica variabile da derivare è la distanza percorsa a partire proprio dal tempo trascorso dall'emissione alla ricezione del fascio di luce infrarossa

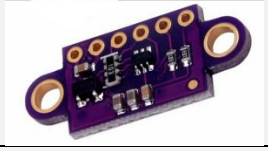
I sensori ToF si rivelano quindi molto adatti a **diversi tipi di utilizzo**: poter calcolare con accuratezza la distanza di un oggetto dalla fotocamera è utile per realizzare scatti in modalità **bokeh**, perché si riesce a capire quali sono gli elementi da sfocare più o meno, realizzare una **messa a fuoco** più accurata soprattutto in condizioni di bassa luminosità, perché quello basato sulla trasduzione della luce infrarossa prescinde dalla luminosità ambientale, e anche per realizzare il **riconoscimento facciale** o degli oggetti in tre dimensioni.

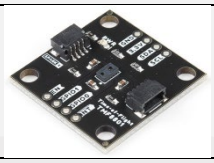
Pertanto, i sensori ToF non migliorano soltanto i comparti fotografici degli smartphone ma possono svolgere un ruolo fondamentale anche in termini di **sicurezza**, perché possono essere integrati per realizzare il riconoscimento facciale in tre dimensioni che notoriamente risulta essere più sicuro di quello realizzato in due dimensioni.

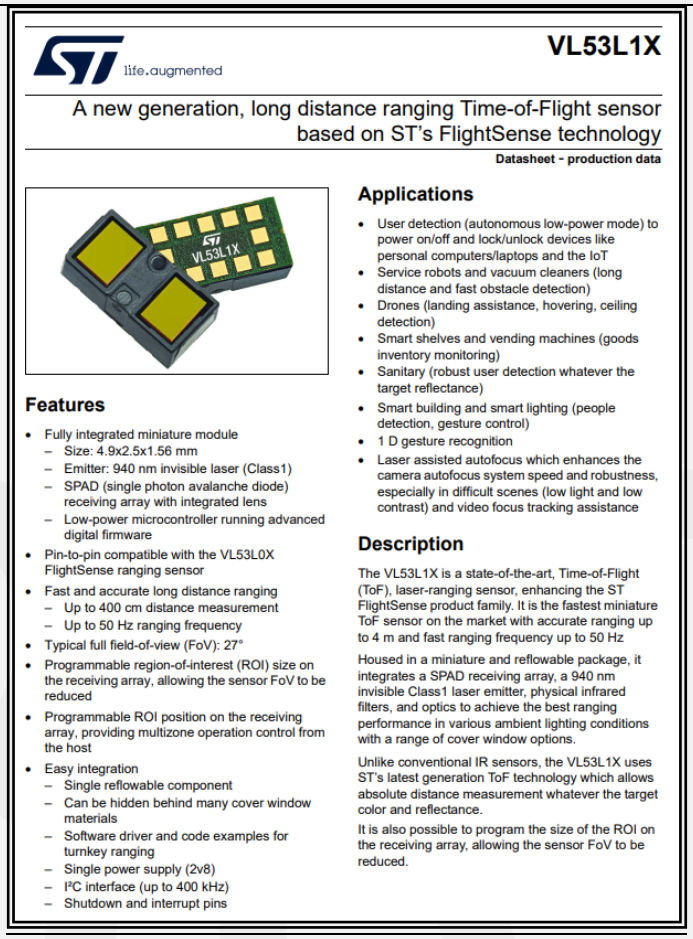
Un altro impiego delle fotocamere ToF sui dispositivi mobili coinvolge le applicazioni in **realtà aumentata** e in **realtà virtuale**, soprattutto in termini di mappatura degli oggetti.

2.4.5.2. Ricerca industriale sensori TOF

Per consentire al sistema HMD di stimare gli spostamenti relativi e individuare la porzione di solaio soggetta alla caduta di materiale dal lato estradossale (distacchi di intonaco e/o pezzi di laterizi) è stata eseguita una indagine di mercato, volta alla ricerca di un sensore magnetometrico che meglio si adattasse alle condizioni di utilizzo e alla posizione di montaggio.

SENSORI DI TIME OF FLIGHT	
Sensore di Time-of-Flight **VL53L0X**	
• Range di misurazione: fino a 2 metri	• Precisione: ±3% della distanza misurata
• Alimentazione: 2.6V - 3.5V	• Interfaccia: I2C
• Tempo di risposta rapido	• Consumo energetico molto basso
• Fornisce distanze assolute in millimetri	

Sensore di Time-of-Flight **VL6180X**	
• Range di misurazione: fino a 100 mm	• Precisione: ±1 mm
• Alimentazione: 2.8V - 5V	• Interfaccia: I2C
• Include un sensore di luce ambiente integrato	• Supporta la misurazione di distanze multiple
• Consumo energetico molto basso	
Sensore di Time-of-Flight **TMF8801**	
• Range di misurazione: fino a 2 metri	• Precisione: ±5% della distanza misurata
• Alimentazione: 2.6V - 3.6V	• Interfaccia: I2C
• Supporta la misurazione di distanze multiple	• Include un sensore di luce ambiente integrato
• Consumo energetico molto basso	• Fornisce distanze assolute in millimetri
Sensore di Time-of-Flight **VL53L1X**	
• Range di misurazione: fino a 4 metri	• Precisione: ±5% della distanza misurata
• Consumo energetico molto basso • Fornisce dati digitali tramite un'interfaccia I2C	• Tempo di risposta rapido
• Supporta la misurazione di distanze multiple	• È compatibile con una vasta gamma di applicazioni, come robotica, automazione industriale, monitoraggio degli ambienti, etc.
• Il package del sensore è piccolo e compatto per una facile integrazione nei progetti.	• altamente preciso e a lungo raggio.
Si consiglia di consultare il datasheet ufficiale del sensore VL53L1X della STMicroelectronics per ulteriori informazioni dettagliate sulle sue specifiche tecniche e le modalità di utilizzo. Come mostrato sopra le peculiari caratteristiche del sensore giustificano la sua scelta nell'attuale prototipo sviluppato.	



life.augmented

VL53L1X

A new generation, long distance ranging Time-of-Flight sensor based on ST's FlightSense technology

Datasheet - production data

Features

- Fully integrated miniature module
  - Size: 4.9x2.5x1.56 mm
  - Emitter: 940 nm invisible laser (Class1)
  - SPAD (single photon avalanche diode) receiving array with integrated lens
  - Low-power microcontroller running advanced digital firmware
- Pin-to-pin compatible with the VL53L0X FlightSense ranging sensor
- Fast and accurate long distance ranging
  - Up to 400 cm distance measurement
  - Up to 50 Hz ranging frequency
- Typical full field-of-view (FoV): 27°
- Programmable region-of-interest (ROI) size on the receiving array, allowing the sensor FoV to be reduced
- Programmable ROI position on the receiving array, providing multizone operation control from the host
- Easy integration
  - Single reflowable component
  - Can be hidden behind many cover window materials
  - Software driver and code examples for turnkey ranging
  - Single power supply (2v8)
  - I²C interface (up to 400 kHz)
  - Shutdown and interrupt pins

Applications

- User detection (autonomous low-power mode) to power on/off and lock/unlock devices like personal computers/laptops and the IoT
- Service robots and vacuum cleaners (long distance and fast obstacle detection)
- Drones (landing assistance, hovering, ceiling detection)
- Smart shelves and vending machines (goods inventory monitoring)
- Sanitary (robust user detection whatever the target reflectance)
- Smart building and smart lighting (people detection, gesture control)
- 1 D gesture recognition
- Laser assisted autofocus which enhances the camera autofocus system speed and robustness, especially in difficult scenes (low light and low contrast) and video focus tracking assistance

Description

The VL53L1X is a state-of-the-art, Time-of-Flight (ToF), laser-ranging sensor, enhancing the ST FlightSense product family. It is the fastest miniature ToF sensor on the market with accurate ranging up to 4 m and fast ranging frequency up to 50 Hz

Housed in a miniature and reflowable package, it integrates a SPAD receiving array, a 940 nm invisible Class1 laser emitter, physical infrared filters, and optics to achieve the best ranging performance in various ambient lighting conditions with a range of cover window options.

Unlike conventional IR sensors, the VL53L1X uses ST's latest generation ToF technology which allows absolute distance measurement whatever the target color and reflectance.

It is also possible to program the size of the ROI on the receiving array, allowing the sensor FoV to be reduced.

Fig. 26 – Estratto scheda tecnica del sensore magnetico per gli scopi del progetto (disponibile su https://www.st.com/content/st_com/en.html/)

Il VL53L1X è un sensore di portata laser all'avanguardia, Time-of-Flight (ToF), che migliora la famiglia di prodotti ST FlightSense™. È il sensore ToF miniaturizzato più veloce sul mercato con portata precisa fino a 4 m e frequenza di portata rapida fino a 50 Hz.

Alloggiato in un pacchetto miniaturizzato e reflowable, integra un array di ricezione SPAD, un emettitore laser di Classe 1 invisibile da 940 nm, filtri fisici a infrarossi e ottiche per ottenere le migliori prestazioni di portata in varie condizioni di illuminazione ambientale con una gamma di opzioni di finestra di copertura.

A differenza dei sensori IR convenzionali, il VL53L1X utilizza la tecnologia ToF di ultima generazione di ST che consente la misurazione della distanza assoluta indipendentemente dal colore e dalla riflettanza del target.

È anche possibile programmare la dimensione della ROI sull'array ricevente, consentendo di ridurre il FoV del sensore.

2.5. STATO DELL'ARTE

Il primo step ha riguardato una ricerca bibliografica per conoscere lo stato dell'arte relativo alle apparecchiature esistenti ritenute necessarie alla composizione del Sistema HMD. Lo scopo di tale ricerca è quello di individuare il punto più alto di sviluppo raggiunto nel settore oggetto di approfondimento.

Successivamente è stata effettuata una ricerca di mercato ed una selezione (sia dal punto di vista tecnico sia dal punto di vista economico) dei dispositivi ritenuti più affini allo scopo del progetto di ricerca, i cui risultati salienti sono riportati nella sezione a seguire.

La ricerca eseguita circa le tecnologie simili a quella oggetto del presente lavoro non ha fruttato alcun risultato. Nel panorama scientifico attuale non ci sono, dunque, altri studi pregressi per la realizzazione di un sistema in grado di rilevare il degrado di un solaio esistente in latero-cemento.

Per tale motivo, la sperimentazione proposta in questo lavoro si configura come innovativa e volta ad introdurre nuovi prodotti e servizi nel campo dell'edilizia e della manutenzione strutturale. Nella fattispecie, si può parlare di "innovazione incrementale" in grado di adattare l'utilizzo di alcuni componenti (sensori) per creare un sistema combinato da utilizzare per uno scopo ben preciso.

Attualmente, infatti, i componenti considerati (sensori di umidità e movimento) risultano utilizzati per scopi e modalità differenti rispetto a quanto previsto nel presente lavoro. Il sistema previsto, dunque, non comporta l'invenzione di nuove apparecchiature ma il riutilizzo di componenti esistenti per la creazione di un nuovo sistema composto.

2.5.1. Panoramica delle metodologie di indagine delle strutture

Esistono svariate tecniche volte ad esaminare materiali e strutture senza pregiudicarne l'integrità o alterare il materiale. Il loro complesso rientra sotto la sigla CND (controlli non distruttivi), NDT (non destructive testing) o PnD (prove non distruttive), alcune delle quali si elencano di seguito:

1. raggi X;
2. liquidi penetranti;
3. campi magnetici, esame a correnti indotte;
4. emissione acustica.
5. termografia;
6. tecniche soniche;
7. tecniche ultrasoniche;
8. ecografia;

- ***Raggi X***

I raggi X, che rappresentano la porzione di spettro elettromagnetico con lunghezza d'onda compresa tra il nanometro e il picometro, permettono ispezioni con buona risoluzione su materiali opachi.

Essi hanno un elevato potere di penetrazione, tale che per interromperli richiede strati di piombo di alcuni centimetri, o spessori di calcestruzzo di decine di centimetri. Sono utilizzati principalmente per la diagnostica medica (radiografie).

I limiti principali sono l'elevato costo delle apparecchiature e la necessità di protezione per gli operatori. Si tratta infatti di radiazioni ionizzanti, cioè, aventi sufficiente energia da ionizzare gli atomi o le molecole con cui interagiscono provocando mutazioni genetiche.

- ***Liquidi penetranti***

I liquidi penetranti sono utilizzati per evidenziare difetti superficiali. La tecnica di controllo che li impiega prende il nome di Penetrant Test e fu introdotta dai fratelli Robert e Joseph Switzer prima della Seconda guerra mondiale.

La procedura consiste nel cospargere con un liquido ad alta tensione superficiale e bassa viscosità l'oggetto testato mediante spruzzatura, pennellatura o immersione rimuovendo in una seconda fase il prodotto in eccesso con un diluente. Si cosparge poi il pezzo con un mezzo di contrasto (detto rilevatore), che farà riaffiorare superficialmente il liquido penetrato nelle discontinuità. Grazie all'azione della capillarità si potranno esaminare visivamente gli eventuali difetti.

- ***Campi magnetici: esame a correnti indotte***

Vari sono i metodi d'ispezione che sfruttano tale principio.

Tra questi, rilevante è l'esame a correnti indotte. Le correnti indotte sono create attraverso un processo chiamato elettromagnetismo indotto: quando una corrente alternata è applicata ad un conduttore, come ad esempio un filo di rame, un campo magnetico si sviluppa nel conduttore ed intorno ad esso.

Il campo si espande quando la corrente aumenta e collassa quando la corrente si riduce a zero.

Se un altro conduttore elettrico è portato in prossimità del campo magnetico ne determina una variazione con conseguente induzione di corrente nel secondo conduttore.

Tali correnti indotte influenzano il valore di impedenza della bobina che le ha generate.

La presenza di una discontinuità nel pezzo esaminato, modifica l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e quindi l'impedenza del circuito. In appropriate circostanze le correnti indotte possono essere utilizzate per la rilevazione di cricche e danni da corrosione, misurazioni di spessori di materiali di rivestimento e misure di conduttività. Il limite maggiore di quest'analisi è la sua applicabilità esclusivamente a materiali conduttivi, la rugosità superficiale interferisce con la misura, la profondità di penetrazione è limitata ed il controllo è localizzato, adatto perciò a ispezionare piccole aree.

- ***Termografia***

La termografia si basa sull'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso.

Si divide in termografia per telerilevamento (utilizzata principalmente in edilizia) e termografia a contatto (impiego in campo medico).

La tecnica sfrutta il fatto che ogni corpo emette radiazioni nel campo dell'infrarosso in un quantitativo correlato alla temperatura del corpo stesso; la termocamera rileva le temperature dei corpi analizzati attraverso la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa misurata su corpi sottoposti a sollecitazione termica.

L'energia radiante è funzione della temperatura superficiale dei materiali, della loro conducibilità ed inerzia termica.

La correlazione tra irraggiamento e temperatura è data dalla legge di Steran- Boltzmann.

In edilizia la si utilizza per evidenziare le strutture, individuare la presenza di pilastri, orditura dei solai, canali, impianti, tessiture murarie e inoltre la presenza di ponti termici e umidità nelle murature.

- ***Tecniche soniche***

Rientrano sotto il nome di tecniche soniche tutte quelle indagini che sfruttano le caratteristiche di propagazione delle onde elastiche, nel campo di frequenze incluse tra 20 Hz - 20 kHz (udibile all'orecchio umano) indotte all'interno dei corpi.

La generazione del segnale può essere acustica (speaker) o meccanica (percussore) e la captazione può avvenire con trasduttori microfonici o accelerometrici.

- ***Tecniche ultrasoniche***

Rientrano sotto il nome di tecniche ultrasoniche tutte quelle indagini che sfruttano le caratteristiche di propagazione degli ultrasuoni indotti ad attraversare un mezzo.

Si definiscono ultrasuoni le onde aventi frequenza superiore ai 2 kHz.

Il limite superiore di frequenza per la propagazione di onde ultrasoniche è dato dalle vibrazioni termiche del reticolo cristallino; al di sopra di tale limite il materiale non può seguire le vibrazioni del suono che lo penetra.

La lunghezza dell'onda minore del suono è il doppio della distanza interatomica.

A frequenze così alte, i periodi delle onde ultrasonore diventano paragonabili al tempo di rilassamento del materiale.

Nel campo dell'edilizia gli ultrasuoni vengono impiegati per determinare il grado di omogeneità di calcestruzzi e acciai, la presenza di vuoti, lesioni, discontinuità nelle strutture, il valore del modulo elastico, la resistenza dei calcestruzzi.

I risultati sono validi, ma si tratta di test che richiedono precauzioni per gli operatori in quanto l'attraversamento di tessuti biologici da parte di onde ultrasoniche provoca effetti termici, meccanici, e di cavitazione, e in generale un'alterazione del mezzo di propagazione, con conseguenti potenziali

danni alla salute nel caso di prolungate o ripetute esposizioni. Tutte le analisi non distruttive che impiegano gli ultrasuoni si basano sul concetto di eco.

- ***Ecografia***

Tra le tecniche ultrasoniche più assodate si cita l'ecografia, utilizzata in campo medico per la diagnosi di svariate patologie nonché per il monitoraggio delle gravidanze.

Quando l'onda emessa raggiunge un punto di variazione dell'impedenza acustica, può essere riflessa, rifratta, diffusa, attenuata.

La percentuale riflessa porta informazioni sulla differenza di impedenza tra i due tessuti; sfruttando questo principio è possibile ottenere un'immagine degli organi interni.

Le frequenze utilizzate per questo esame sono le più basse del campo ultrasonoro, cioè quelle ritenute non pericolose per il paziente e che consentono, inoltre, una buona risoluzione d'immagine.

- ***Emissione acustica***

L'emissione acustica è una particolare tecnica di controllo non distruttivo basata sul fatto che un materiale o una struttura sottoposta a sforzo emette segnali ultrasonori generati dal danneggiamento, degradazione, o corrosione del materiale stesso.

Le nozioni di base di questa tecnica risalgono agli anni '70, quando si pensò di estendere i concetti dell'analisi spettroscopica ai fenomeni acustici originati dalle dinamiche dei materiali.

Lo sviluppo delle tecniche ultrasonore suggerì la possibilità che la caratteristica di eccitabilità dei materiali - per cui ad un impulso ultrasonoro corrisponde una risposta in frequenza specifica - potesse giustificare una produzione di segnali acustici nelle frequenze ultrasoniche come conseguenza del rilascio di energia a livello microscopico.

L'emissione acustica fu inizialmente solo una teoria, fino a quando non si ebbe a disposizione un insieme di strumenti adeguati ad analizzare i segnali raccolti.

I segnali di emissione acustica sono captati mediante sensori piezoelettrici; i più comuni contengono cristalli PZT (piombo zirconato di titanio).

Attualmente questa tecnica ha portato buoni risultati in alcuni campi della diagnostica sui materiali, in particolare laddove applicata a manufatti in esercizio come ad esempio condotte in pressione, serbatoi, strutture edili in conglomerato cementizio e carpenteria metallica. Nel caso delle condotte in pressione, l'emissione acustica è utilizzata per individuare la posizione di un eventuale rottura dell'impianto, semplicemente ricorrendo ad un calcolo della distanza mediante misura del tempo di volo.

La tecnica ha portato risultati validi quando applicata a materiali isotropi e sufficientemente omogenei, soprattutto i metalli; mentre per materiali compositi, anisotropi, stratificati, aventi inclusioni o discontinuità di vario tipo, si sono riscontrati problemi nell'analisi dei segnali.

Tutti i solidi hanno una certa elasticità; in campo elastico, essi si deformano sotto l'azione di carichi esterni e tornano nella configurazione iniziale quando scaricati.

Lo sforzo più elevato sopportabile e la conseguente deformazione elastica dipendono dalla capacità del corpo di immagazzinare energia elastica.

Superando un certo limite, nei materiali fragili si verifica pressoché immediatamente la frattura.

Nei materiali dotati di elevata plasticità, invece, la frattura si presenta soltanto successivamente ad evidenti deformazioni.

Se il materiale sottoposto a trazione presenta una discontinuità, che sia questa un difetto o semplicemente un punto di connessione, come una saldatura o un giunto, si avrà in corrispondenza della stessa una concentrazione di tensioni che in alcuni casi potrebbe essere origine di un veloce moto di dislocazione conseguenza dell'azione sul materiale, associato ad un rapido rilascio di energia elastica, ed è quello che identifica un evento di emissione acustica.

Esso si manifesta come un'onda elastica che si propaga e può essere rilevata da sensori appropriati (piezoelettrici). Lo spettro d'onda è di tipo a banda larga: la frequenza del testing emissione acustica di oggetti metallici si attesta tipicamente tra i 100 e i 300 KHz.

Durante la deformazione plastica le dislocazioni si muovono attraverso il reticolo del cristallo: questi movimenti producono emissione acustica, ma la maggior parte di questi processi (etcetto il twinning) hanno un'ampiezza molto contenuta, la quale può essere misurata in maniera attendibile solo con un sensore posto a breve distanza dalla sorgente o in una prova di laboratorio.

Nella maggior parte dei casi vengono prodotti segnali continui piuttosto che burst.

I burst sono impulsi o pacchetti di onde corte, cioè il tipo di segnale preferenziale su cui si basa la tecnica dell'emissione acustica.

L'emissione acustica è una tecnica ricettiva che analizza gli impulsi ultrasonici emessi da un difetto proprio nel momento in cui questo si verifica.

In contrasto con la tecnica ultrasonora classica non si deve misurare la risposta ad un'eccitazione acustica artificiale indotta all'oggetto in prova.

Si tratta, come detto, di una tecnica dinamica: il segnale si genera quando la cricca cresce oppure quando i lembi di una cricca già aperta tornano in contatto, il che può avvenire per esempio dopo la rimozione di un carico applicato alla struttura in esame.

Solitamente l'oggetto testato deve essere stressato al di sopra del livello operativo al fine di ottenere la generazione di difetti locali che emettano ultrasuoni.

Tale tecnica è appropriata specialmente in quei casi dove gli oggetti vengono caricati copiosamente, ad esempio per i test di impermeabilità su recipienti in pressione.

Anche la corrosione sul fondo di recipienti di carburante, o di olio, produce segnali tipo burst che si propagano attraverso il liquido.

Con le infiltrazioni, l'emissione acustica viene prodotta dal flusso turbolento attraverso la fessura stessa. Si possono distinguere, fondamentalmente, due tipi di segnali di emissione acustica: transitori e continui.

I primi, anche detti "burst", sono più facilmente distinguibili dal rumore di fondo rispetto ai segnali continui.

Uno dei compiti principali di un sistema ad emissione acustica è convertire il burst in set di dati compatti ripulendoli dal rumore di fondo.

Per questo motivo nei sistemi ad emissione acustica si stabilisce una soglia di filtraggio (threshold) sotto la quale si ritengono gli eventi non significativi.

Se il segnale di emissione acustica supera la soglia, significa che si ha l'inizio di un "hit" (identificazione di un burst).

Il tempo del primo superamento della soglia è chiamato tempo di arrivo (burst arrival time) ed è necessario per il calcolo della posizione della sorgente. I sistemi digitali campionano il segnale di emissione acustica, ad esempio, ogni 100 ns (dieci milioni di volte al secondo), ovvero con una frequenza di 10 MHz.

Un pacchetto d'onda di 100 µs è composto dunque da più di mille campioni: ne segue che per l'acquisizione di un singolo burst è necessario un sistema ad elevata velocità di acquisizione e una grande quantità di memoria buffer.

Il threshold viene generalmente individuato fuori dalla fase di prova, quando si ritiene che non debbano verificarsi eventi di emissione acustica significativi. Allora si assume che l'emissione rilevata corrisponda al rumore ambientale. Il valore di soglia si fissa immediatamente al di sopra del valore quadratico medio del rumore campionato.

3. OR-2: REALIZZAZIONE DEL SISTEMA COMPOSTO (SENSORE E GESTIONE DATI)

Non tutti i sistemi di analisi descritti possono utilizzarsi nell'indagine dei solai latero-cementizi e nessuno di loro può costituire un sistema di indagine "preventiva" e "continua" del fenomeno di sfondellamento, considerando lo specifico principio di funzionamento della rilevazione o l'insieme della complessità/costo del dispositivo di rilevamento.

Da qui si definisce il punto di partenza nonché il punto di forza del sistema HMD: realizzare un sistema di monitoraggio automatico e continuo (o intermittente secondo specifici settaggi dell'utente) che permetta di rilevare l'eventuale innescarsi del fenomeno di degrado del solaio e ne analizzi l'evolversi, fino a restituire dei segnali di allarme (definiti in base a soglie di alert predefinite), oltre i quali occorre mettere in sicurezza l'ambiente monitorato prima che si verifichi il fenomeno dello sfondellamento.

Considerando la fenomenologia dello sfondellamento, principalmente legata:

- alla corrosione dei ferri di armatura dei travetti per la presenza di acqua;
- alla deformazione del solaio derivante da sollecitazioni anomali per difetti di progettazione e di realizzazione.

La rete di rilevatori è composta da sensori di umidità, temperatura, pressione e sensori di movimento posti all'intradosso del solaio.

La presenza di controsoffitto, tipica degli ambienti della Pubblica Amministrazione, degli ambienti ospedalieri o luoghi pubblici, preclude il rilevamento visivo dei primi sintomi di sfondellamento, per cui si è prevede l'utilizzo del sistema HMD anche e soprattutto in caso di presenza di controsoffitto, dotando il dispositivo di sensori di movimento per la rilevazione di caduta dei materiali (che comunque non precludono la tenuta del controsoffitto).

Il sistema HMD è stato progettato per consentire un monitoraggio automatico e continuo del fenomeno di sfondellamento nei solai latero-cementizi. Oltre ai sistemi di analisi descritti in precedenza, il sistema HMD è dotato di una serie di sensori che svolgono un ruolo chiave nel rilevare e analizzare l'evoluzione del degrado del solaio.

La rete di rilevatori del sistema HMD ha incluso una varietà di sensori che forniscono informazioni cruciali per identificare i segnali di allarme e le condizioni di pericolo. Questi sensori includono:

- Sensori di temperatura: monitorano le variazioni termiche nell'ambiente del solaio, consentendo di individuare potenziali punti caldi che potrebbero indicare la presenza di corrosione o altre anomalie.
- Sensori di pressione: misurano la pressione esercitata sulla superficie del solaio, consentendo di rilevare eventuali deformazioni o sollecitazioni anomale.
- Sensori di umidità: rilevano l'umidità presente nel solaio, fornendo indicazioni sulla presenza di acqua, che è uno dei principali fattori di corrosione dei ferri di armatura.
- Sensori giroscopici, accelerometrici e magnetometrici: questi sensori sono utilizzati per rilevare movimenti, vibrazioni e variazioni magnetiche nel solaio. Possono essere impiegati per individuare sollecitazioni anomale o movimenti strutturali che potrebbero indicare un potenziale sfondellamento.

L'utilizzo di questa combinazione di sensori ha consentito al sistema HMD di fornire un monitoraggio completo e accurato delle condizioni del solaio. L'elaborazione dei dati provenienti da questi sensori consente di identificare eventuali cambiamenti critici e di generare segnali di allarme quando le soglie di alert predefinite vengono superate. Ciò, in previsione futura, consentirà di adottare le misure di sicurezza necessarie per proteggere l'ambiente monitorato prima che si verifichi il fenomeno dello sfondellamento.

È importante sottolineare che il sistema HMD può essere utilizzato anche in presenza di controsoffitto, che potrebbe impedire il rilevamento visivo dei primi sintomi di sfondellamento. L'integrazione di sensori di movimento nel dispositivo consente di rilevare la caduta dei materiali, offrendo un ulteriore livello di sicurezza senza compromettere l'integrità del controsoffitto.

In conclusione, il sistema HMD rappresenta un'importante soluzione per il monitoraggio preventivo e continuo del fenomeno di sfondellamento nei solai latero-cementizi. Grazie alla sua rete di sensori avanzati, è in grado di rilevare le condizioni di pericolo e fornire segnali di allarme tempestivi, consentendo di intervenire prontamente per preservare la sicurezza dell'ambiente monitorato.

3.1. ASSEMBLAGGIO DEL SISTEMA HMD

3.1.1. Progettazione del PCB e selezione del microcontrollore

Per realizzare il sistema, è stato scelto di utilizzare il microcontrollore BlueNRG-232, un system on chip (SoC) appositamente progettato per applicazioni Bluetooth Low Energy. E' stato dedicato del tempo alla progettazione del PCB al fine di garantire un'adeguata alimentazione al microcontrollore e si è provveduto ad integrare il sistema con specifiche antenne per la comunicazione Bluetooth. Il PCB è stato sviluppato utilizzando il software Kicad per garantire un layout accurato e una corretta connessione dei componenti.

3.1.2. Sensori e protocollo di comunicazione

Sono stati collegati una serie di sensori al microcontrollore mediante il protocollo di comunicazione I2C, un protocollo seriale comunemente utilizzato nelle applicazioni sensoristiche. I sensori selezionati includono:

Sensori capacitivi HTS221: utilizzati per misurare l'umidità relativa e la temperatura dell'ambiente circostante.

Sensori di pressione LPS22HH: impiegati per la misurazione della pressione atmosferica.

Magnetometro LIS2MDL: utilizzato per rilevare e misurare il campo magnetico dell'ambiente.

Modulo inerziale a 6 assi LSM6DS0: contenente sia un giroscopio che un accelerometro, per rilevare e misurare i movimenti(vibrazioni) e le accelerazioni.

Sensore di misurazione del Time of Flight VL53L1X: utilizzato per la misurazione precisa delle distanze.

3.1.3. Sviluppo delle tracce e gestione dell'alimentazione

La realizzazione di un PCB con una moltitudine di chip richiede particolare attenzione nella progettazione delle tracce su più livelli del PCB. È fondamentale garantire che le tracce siano posizionate correttamente per evitare interferenze elettriche e ottimizzare le prestazioni complessive del sistema. Inoltre, l'alimentazione dei singoli chip deve essere gestita in modo adeguato, utilizzando piani di massa e piani di alimentazione dedicati per fornire un'alimentazione stabile ed efficiente a ciascun componente.

Durante il processo di sviluppo del PCB, è stata prestata particolare attenzione alla disposizione dei componenti, all'ottimizzazione delle tracce e all'implementazione di piani di massa e di alimentazione appropriati. Ciò ci ha consentito di ottenere un PCB funzionale e affidabile per il nostro sistema di monitoraggio.

In conclusione, la realizzazione del sistema ha richiesto la progettazione accurata del PCB, l'integrazione di sensori compatibili con il microcontrollore selezionato e l'implementazione di una gestione adeguata delle tracce e dell'alimentazione. Il risultato è un sistema completo e ben

funzionante in grado di acquisire dati dai sensori e comunicare tramite la connettività Bluetooth Low Energy.

3.2. HARDWARE PER CALCOLO NUMERICO HPC (HIGH PERFORMANCE COMPUTING)

L'infrastruttura hardware, riassumendo, costituisce una raccolta di servizi di orchestrazione dei carichi di lavoro gestiti da BRT S.r.l. che si integrano con risorse di calcolo, rete e archiviazione. È stata appositamente creata per l'applicazione sviluppata e predisposta per carichi di lavoro, anche parallelizzati.

1. **Elementi hardware del sistema:**

- N° 2 Workstation di calcolo HP z800, bi-processore basate su architettura Intel® Xeon® X5675; che offrono una architettura bilanciata con accelerazione e funzionalità di sicurezza avanzate integrate, progettate per i requisiti più stringenti dei carichi di lavoro;
- 64GB di RAM;
- GPU NVIDIA Quadro 6000 utile per la visualizzazione dei dati, per la loro elaborazione e l'analisi di Machine Learning;
- Hard disk SSD: 1TB HDD: 1TB;

Queste Workstation sono dotate di 64GB di RAM con controllo di parità etc…, espandibili fino a 2 Tera Byte. Le GPU NVIDIA alimentano le workstation desktop più avanzate del mondo, fornendo la potenza di elaborazione visiva richiesta da milioni di professionisti come parte del loro flusso di lavoro quotidiano. Le GPU discrete NVIDIA forniscono prestazioni e funzionalità, ben oltre ciò che è disponibile dalla grafica integrata, per un'ampia gamma di flussi di lavoro professionali dalla

creazione, modifica e visualizzazione di modelli e video 2D e 3D, al lavoro con più applicazioni su diversi display. Sono gestite dal controller LSI e dotate di hard disk a stato solido SSD Samsung.

A supporto è stato previsto una unità di storage che verrà di seguito descritta per l'archiviazione dei dati.

Le workstation sono alimentate da un alimentatore da 850w certificato 80+ Gold grande affidabilità e risparmio energetico a cui la BRT è stata sempre particolarmente attenta.

Caratteristiche tecniche di dettaglio:

Fig.27 - Workstation

- 2 HP z800, una workstation da prestazioni elevate essendo dotata di due processori xenon, di seguito alcune caratteristiche:
  - 2 x Xeon X5675;
  - RAM: 64 GB;
  - SSD: 1TB;
  - HDD: 1TB;
  - GPU: Quadro 600;
  - DVD-RW;

- UBUNTU con 3 virtual machine;

- Per garantire una corretta e costante alimentazione, è stato utilizzato un UPS della Riello da 1500 watt.

Fig.28 - UPS Riello da 1500 watt

- N° 1 Unità di storage in rete:

L'unità di storage dedicata al salvataggio dei dati ed alla collaborazione remota dei team di ricerca è costituita da una NAS QNAP mod. TS-932X Firmware versione 5.01 con n.2 volumi di cui 1 utilizzato per lo specifico progetto con una capacità specifica di archiviazione pari a 6,88 TB.

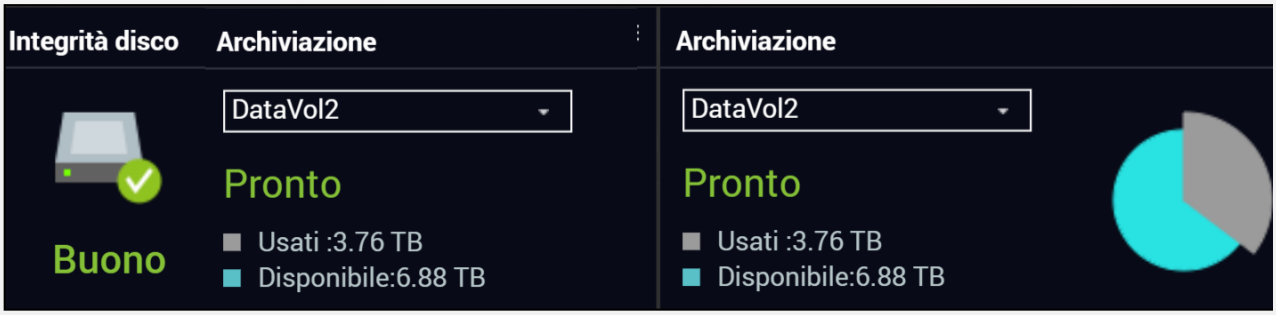


Fig.28 - Unità storage mod. TS-932X

La stessa unità NAS è stata opportunamente protetta da firewall e configurata per l'accesso remoto del team di lavoro.

2. Cablaggio dedicato

L'obiettivo principale del cablaggio è di garantire una trasmissione efficiente e accurata dei dati tra i dispositivi di misura e il sistema di acquisizione dati. Questo viene ottenuto attraverso la selezione dei materiali appropriati, la progettazione del layout del cablaggio e l'implementazione di tecniche di filtraggio del segnale.

3. Materiali e Componenti

I materiali e i componenti utilizzati nel cablaggio sono stati selezionati in base alle loro prestazioni, affidabilità e costo. Tra questi, si includono:

- Cavi coassiali: utilizzati per la trasmissione di segnali ad alta frequenza e per ridurre l'interferenza elettromagnetica (EMI).
- Connettori: utilizzati per collegare i dispositivi di misura e il sistema di acquisizione dati. I connettori devono essere robusti, affidabili e facili da utilizzare.

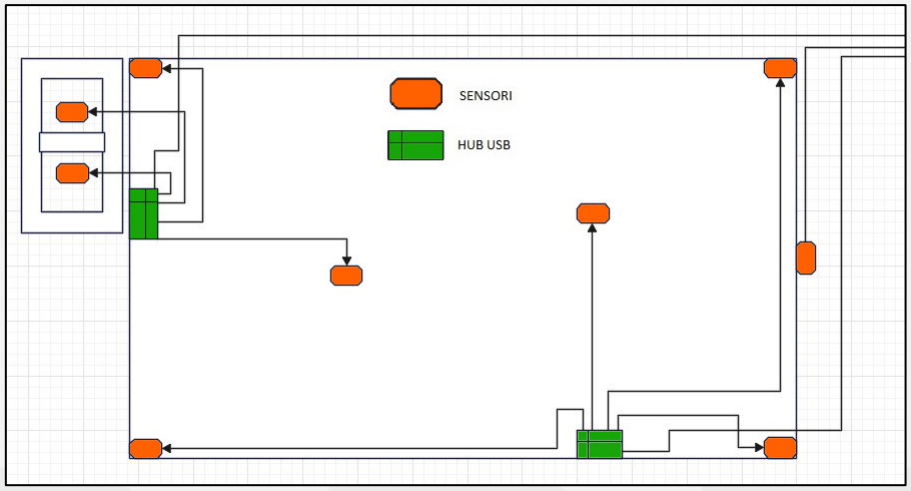
- Hub usb: ADJ utilizzati per espandere il numero di porte USB disponibili e permettere il collegamento di più dispositivi di misura al sistema di acquisizione dati per la loro alimentazione.
- Dongle: utilizzati per garantire una connessione costante dei sensori con la workstation, con un totale di 7;
- Sensori: sensori multi-parametro in grado di acquisire informazioni su umidità, temperatura, pressione e vibrazioni.

Fig.29 - Sensori multiparametro

Fig.30 - Particolare Hub usb

4. Layout del Cablaggio

Il layout del cablaggio è stato progettato per garantire un'ottimale distribuzione dei cavi e minimizzare l'interferenza tra i segnali. Per raggiungere questo obiettivo, sono state seguite alcune linee guida, tra cui:



- Mantenere i cavi di segnale e di alimentazione separati per ridurre l'interferenza;
- Utilizzare cavi schermati per segnali sensibili all'interferenza elettromagnetica;
- Raggruppare i cavi in fasci per facilitare la gestione e ridurre il rischio di danni;
- Etichettare i cavi e i sensori per facilitare l'identificazione e la manutenzione.

4. OR-3: SVILUPPO DI UN APPLICATIVO PER L'ANALISI DEI DATI MISURATI

4.1. SVILUPPO DEL SOFTWARE PER L'ANALISI DEI DATI

La piattaforma di monitoraggio e presentazione dei dati acquisiti è stata sviluppata utilizzando il linguaggio di programmazione di **Python**, per notevoli vantaggi connessi all'utilizzo nella ricerca scientifica. Python è un linguaggio Open Source che si è rapidamente diffuso in numerosi ambiti, tra cui quello scientifico.

Il suo utilizzo si sta consolidando grazie alle caratteristiche di semplicità, eleganza, modernità, integrazione ed estendibilità. Questo fa del Python un candidato ideale per applicazioni scientifiche quali analisi dati, simulazioni, grafici, manipolazione algebrica, e così via; anche a discapito dei numerosi software proprietari che molti, persino nell'ambito della ricerca universitaria, ancora ritengono essere una risorsa indispensabile per tali scopi. **Python** è un **linguaggio di programmazione ad alto livello**, rilasciato pubblicamente per la prima volta nel 1991 dal suo creatore Guido van Rossum, programmatore olandese attualmente operativo in Dropbox. Deriva il suo nome dalla commedia *Monty Python's Flying Circus* dei celebri Monty Python, in onda sulla BBC nel corso degli anni 70. Attualmente, lo sviluppo di Python (grazie e soprattutto all'enorme e dinamica comunità internazionale di sviluppatori) viene gestito dall'organizzazione no-profit Python Software Foundation.

Python supporta **diversi paradigmi di programmazione**, come quello object-oriented (con supporto all'ereditarietà multipla), quello imperativo e quello funzionale, ed offre una tipizzazione dinamica forte. È fornito di una libreria built-in estremamente ricca, che unitamente alla gestione automatica

della memoria e a robusti costrutti per la gestione delle eccezioni fa di Python uno dei linguaggi più ricchi e comodi da usare.

Comodo, ma anche **semplice** da usare e imparare. Python, nelle intenzioni di Guido van Rossum, è nato per essere un linguaggio immediatamente intuibile. La sua sintassi è pulita e snella così come i suoi costrutti, decisamente chiari e non ambigui. I blocchi logici vengono costruiti semplicemente allineando le righe allo stesso modo, incrementando la leggibilità e l'uniformità del codice anche se vi lavorano diversi autori.

Python è un linguaggio **pseudocompilato**: un interprete si occupa di analizzare il codice sorgente (semplici file testuali con estensione .py) e, se sintatticamente corretto, di eseguirlo. In Python, non esiste una fase di compilazione separata (come avviene in C, per esempio) che generi un file eseguibile partendo dal sorgente.

L'esser pseudointerpretato rende Python un linguaggio **portabile**. Una volta scritto un sorgente, esso può essere interpretato ed eseguito sulla gran parte delle piattaforme attualmente utilizzate, siano esse di casa Apple (Mac) che PC (Microsoft Windows e GNU/Linux). Semplicemente, basta la presenza della versione corretta dell'interprete.

Infine, Python è **free software**: non solo il download dell'interprete per la propria piattaforma, così come l'uso di Python nelle proprie applicazioni, è completamente gratuito; ma oltre a questo Python può essere liberamente modificato e così ridistribuito, secondo le regole di una licenza pienamente open-source.

Queste caratteristiche hanno fatto di Python il protagonista di un enorme diffusione in tutto il mondo, e anche in Italia, negli ultimi anni. Questo perché garantisce lo sviluppo rapido (e divertente) di applicazioni di qualsiasi complessità in tutti i contesti: dal desktop al web, passando dallo sviluppo di videogiochi e dallo scripting di sistema.

Dopotutto, se è vero che Python rappresenta una delle tecnologie principali del core business di colossi come Google (YouTube è pesantemente basato su Python) e ILM, allora probabilmente sarà ottimo anche per le tue necessità.

4.2. PYTHON

Python è un linguaggio high-level, trasportabile, interpretato, object oriented.

Il sito ufficiale è http://www.python.org.

Segue la filosofia Open Source; vedi http://www.python.org/doc/Copyright.html per i dettagli sul copyright (non è GPL ma è compatibile).

È disponibile per tutte le principali piattaforme:

- Linux;
- Windows;
- Macintosh;
- Sparc Solaris;
- OS/2;
- Amiga;
- PalmOS;
- Psion;
- Sharp Zaurus;
- WindowsCE;
- Play Station 2;
- Molte ed altre.

Viene incluso da vari anni in tutte le principali distribuzioni Linux. Nasce nel 1990, presso il CWI ad Amsterdam, e il suo sviluppo è portato avanti dal CNRI di Reston, oltre che da una numerosissima ed attiva comunità di programmatori (esistono newsgroup (comp.lang.python) e mailing list in tutto il mondo).

L'ultima release è **Python 3.11.3**

Il nome è dedicato al BBC show "Monty Python's Flying Circus".

4.2.1. Caratteristiche

Le principali caratteristiche sono:

- Sintassi elegante, semplice (ma non "over-simplified") e leggibile: L'indentatura è utilizzata per racchiudere i comandi. Molti trovano questa caratteristica perlomeno "anomala" e la guardano con sospetto.
- Estendibilità: le potenzialità del linguaggio vanno ben oltre le caratteristiche built-in, poiche' attraverso moduli aggiuntivi si possono aggiungere data types, funzioni, oggetti; grazie all' API (Application Programmers Interface) è possibile utilizzare il codice in C/C++. Esistono applicazioni che semplificano tale interfacciamento:

- Swig (http://www.swig.org).
- Jython (http://www.jython.org) è una versione di Python per piattaforme Java.

- Facilità di apprendimento, rapidità di sviluppo e debug: lo sviluppo di codice in Python può arrivare ad essere 10 volte più rapido rispetto al C/C++. Il codice può funzionare anche come prototipo per essere poi tradotto in C/C++.
- Ottima e abbondante documentazione. Sul sito, oltre alla documentazione ufficiale, sono raccolti numerosi how-to, FAQ e tutorial con i quali è possibile imparare ad usare Python per

numerosi scopi in brevissimo tempo. Nella distribuzione di Python è incluso un software per la gestione automatica della documentazione: pydoc.

Python viene usato professionalmente e principalmente nei seguenti ambiti:

- Ricerca scientifica, controllo di codice "number-crunching" su supercomputer;
- Siti web;
- Interfacce grafiche;
- Test suite per codice C o Java;
- Applicazioni commerciali che lo usano come linguaggio di scripting.

Un lungo elenco di molte società, università ed organizzazioni che utilizzano Python si trova su:

http://www.python.org/psa/Users.html .

Tra queste riportiamo ad esempio:

- Vari gruppi di ricerca universitari in tutto il mondo;
- Google (molti componenti del motore di ricerca);
- Industrial Light+Magic (Star Wars Episode II...);
- Zope corporation (application server);
- Infoseek (search engine);
- Yahoo! Groups (mailing list manager);
- Nasa (vari utilizzi, tra cui strumenti per il pre-mission planning dello Space Shuttle);
- Red Hat (installation software);
- SGI Inc. (installer, clustering, ISP, usi vari...);
- IBM (test automatici di strumenti internet);

- RealNetworks (vari utilizzi);
- Star Trek Bridge Commander;
- Blender 3D (scripting language).

4.2.2. Dettagli tecnici - La schell e gli editor per python

Python può essere usato sia attraverso una shell interattiva, sia editando degli script. Se dalla propria shell dei comandi si lancia il comando python, ci si ritroverà nel prompt della shell:

>>>

Tutti i principali editor per programmatori includono il supporto per Python (Vi, Emacs, NEdit...). Per un elenco dettagliato vedere:

http://www.python.org/cgi-bin/moinmoin/PythonEditors

Un editor o, meglio, un IDE (Integrated Development Environment) pensato apposta per Python è IDLE (http://www.python.org/idle).

4.2.3. Gestione degli errori

In Python risulta semplificata la comprensione degli errori (exceptions) e la loro gestione. In caso di errore l'interprete restituisce un messaggio di chiaro significato, ed è possibile intercettare da codice tali errori per "decidere" cosa fare nel caso si presentino. È anche possibile definire nel codice nuovi "errori" che l'interprete restituisce sotto determinate condizioni. Tutto questo accelera la fase di debug in modo considerevole.

Come già detto, il codice è decisamente leggibile e compatto, e risulta più corto dell'equivalente in C/C++ per i seguenti motivi: l'uso di high-level data-types permette di eseguire operazioni molto

complesse con un singolo comando il raggruppamento dei comandi fa uso di indentature e non di parentesi né le variabili né gli argomenti vanno dichiarati.

È supportato l'incapsulamento, le proprietà, l'ereditarietà, il polimorfismo, avendo quindi a disposizione tutta la potenza della programmazione ad oggetti, che svincola lo sviluppo del codice cliente dall'implementazione delle classi. Per un'ottima descrizione di alcuni esempi in questo senso vedere l'articolo di A. Martelli su Linux&C numero 25.

Per ulteriori esempi ed approfondimenti vedere la documentazione presso il sito ufficiale; in particolare, seguendo il tutorial disponibile all''indirizzo:

http://www.python.org/doc/current/tut/tut.html

Per quanto riguarda approfondimenti su materiale stampato si consulti, ad esempio:

- Riviste
  - Linux & C: numeri 24, 25, 26, 27, articoli di G. Zoppi e A. Martelli
  - Py (Pyzine): http://www.pyzine.com
- Libri
  - Python Cookbook, by Alex Martelli, David Ascher
  - Programming Python, by Mark Lutz
  - Learning Python, by Mark Lutz, David Ascher, Frank Willison

4.2.4. Python nella ricerca scientifica

In generale le persone che lavorano anche professionalmente in ambito scientifico programmano per effettuare analisi dati, grafici, simulazioni numeriche e manipolazioni algebriche. Sono largamente diffusi Fortran e C/C++, tuttavia alcune esigenze, come l'utilizzo di una sintassi più semplice, l'ausilio

di un ambiente di sviluppo integrato per il debug ed altre operazioni, hanno portato alla scelta di soluzioni diverse.

Interi gruppi di ricerca, e persino intere comunità scientifiche si affidano, per gli scopi suddetti, a software quali Mathematica, MapleV, MatCad, IDL, Origin, tanto per citarne alcuni. Questi applicativi sono estremamente validi ed utili, perché' permettono di sviluppare procedure di calcolo molto efficienti in breve tempo e senza essere programmatori "esperti". Ma tali soluzioni sono accomunate dai seguenti svantaggi:

- "viziano" lo sviluppatore ad una sintassi poco "ortodossa" difficilmente riutilizzabile in altri contesti di programmazione;
- sono software proprietari: il fatto di non essere Open Source diventa una grave petca nell'ambito della ricerca, dove il sapere dovrebbe essere libero di circolare; inoltre, costose licenze restringono enormemente l'utilizzo di tali applicativi, specialmente per gli studenti;
- non sono "linguaggi" di programmazione, ma piuttosto delle applicazioni il cui utilizzo può rivelarsi troppo ristretto all'ambito per cui sono progettate.

Python, non solo possiede tutte le caratteristiche di "semplicità'" che vantano tali software, abitua a programmare in modo corretto, è Open Source e non ha restrizioni di utilizzo, ma è un vero e proprio linguaggio ed è utilizzabile per innumerevoli scopi.

Le potenzialità di python, grazie all'estendibilità del linguaggio, sono innumerevoli. Ciò è testimoniato dall'ampiezza dello spettro di utilizzo in generale, e dal numero di moduli esterni. Ad esempio, Vault of Parnassus, (http://www.vex.net/parnassus) è un motore di ricerca che permette di trovare rapidamente il modulo che fa al caso nostro.

I moduli sono estensioni del linguaggio che permettono di aggiungere librerie, data types, funzioni, operazioni con oggetti...e così via.

Le domande che spesso si pone chi utilizza gli applicativi di manipolazione dati a proposito delle possibilità del software che ha tra le mani sono del tipo:

- "può fare operazioni con le matrici, operazioni statistiche, analisi di Fourier?";
- "può fare un grafico dei miei dati?";
- "può fare un plot tridimensionale bello e colorato?";
- "può aprire o salvare il tale formato di file?";
- "può aprire e trattare le immagini nei vari formati?".

Queste domande hanno sempre una risposta positiva per chi programma in Python, in quanto se non si tratta di features built-in del linguaggio si tratterà solo di trovare il modulo opportuno. Nei rari casi in cui non sia possibile reperirlo, la caratteristica di essere una "colla" tra le applicazioni permette a Python di usare altre applicazioni per eseguire alcune operazioni.

Dettaglio di alcuni moduli.

Andiamo a dettagliare un elenco dei più diffusi moduli utili per l'analisi scientifica, la ricerca ed applicazioni rivolte al trasferimento tecnologico in ambito industriale:

1. ***Numarray e Numeric***

   Numarray e Numeric (il primo è l'evoluzione del secondo) sono set di estensioni per Python che permettono di lavorare efficientemente con grandi quantità di dati organizzati in tabelle e matrici (array).

   I vantaggi che offrono in più rispetto alle funzionalità standard del Python sono:

- definizione di high-level data types (array) con i quali è possibile eseguire operazioni complesse con un codice pulito e semplice;
- velocità di calcolo enormemente superiore grazie all'ottimizzazione del codice per l'esecuzione delle operazioni con gli array e per la gestione della memoria;
- ereditano l'esperienza di strumenti come Fortran, Matlab, IDL, estendendola al Python;
- particolarmente utili per chi lavora con immagini e mappe di dati.

Il sito ufficiale di Numeric è:

http://pfdubois.com/numpy

mentre quello ufficiale di Numarray è:

(http://stsdas.stsci.edu/numarray)

ed è attualmente mantenuto presso lo Space Telescope Science Institute (http://stsdas.stsci.edu).

Esempi:

Definizione di un array e suoi attributi:

```
>>> matrix1 = array(([0,1],[1,3]))
>>> print matrix1
[[0 1]
[1 3]]
>>> print vector1.shape, matrix1.shape
(5,) (2,2)
```

Universal functions

```
>>> print sin([pi/2., pi/4., pi/6.])
```

```
[ 1. 0.70710678 0.5       ]
>>> print greater([1,2,4,5], [5,4,3,2])
[0 0 1 1]
>>> print add([1,2,4,5], [5,4,3,2])
[6 6 7 7]
>>> print add.reduce([1,2,4,5])
12
```

Convenience functions

```
>>> data = arange(10)                # homolog of builtin range()
>>> print data
[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9]
>>> print where(greater(data, 5), -1, data) # selection facility
[ 0  1  2  3  4  5 -1 -1 -1 -1]
>>> data = resize(array((0,1)), (9, 9))
>>> print data
[[0 1 0 1 0 1 0 1 0]
[1 0 1 0 1 0 1 0 1]
[0 1 0 1 0 1 0 1 0]
[1 0 1 0 1 0 1 0 1]
[0 1 0 1 0 1 0 1 0]
[1 0 1 0 1 0 1 0 1]
[0 1 0 1 0 1 0 1 0]
[1 0 1 0 1 0 1 0 1]
[0 1 0 1 0 1 0 1 0]]
```

Sono supportate tutte le più importanti operazioni tra matrici e sulle matrici. Riportiamo solo per dare un'idea alcuni dei nomi delle funzioni più importanti: take, put, resize, where, compress, diagonal,

trace, sort, transpose, argmin, argmax, indices, swapaxis, matrixmultiply, take, choose, cross_correlate, convolve, mask, putmask,...

Per esempio:

Moltiplicazione tra matrici:

```
>>> print a
[[0 1 2]
[3 4 5]]
>>> print b
[1 2 3]
>>> print a*b
[[ 0  2  6]
[ 3  8 15]]
>>> print matrixmultiply(a,b)
[ 8 26]
```

Trasposizione di matrici:

```
>>> print a
[[ 0  1  2  3  4]
[ 5  6  7  8  9]
[10 11 12 13 14]
[15 16 17 18 19]]
>>> print transpose(a)
[[ 0  5 10 15]
[ 1  6 11 16]
[ 2  7 12 17]
[ 3  8 13 18]
```

[4 9 14 19]]

2. ***Scientific e SciPy***

Scientific e SciPy sono collezioni di moduli che si appoggiano a Numeric, e forniscono numerose funzioni matematiche e scientifiche. Nello specifico:

- geometria: vettori, tensori, trasformazioni...;
- integrali, derivate, interpolazioni, polinomi;
- statistica;
- fit (anche non lineari) con i minimi quadrati;
- supporto per file di testo formattati per il Fortran;
- widgets per plot lineari e 3D;
- analisi di immagini;
- interfacce per il calcolo parallelo;

Il sito ufficiale di Scintific è:

http://starship.python.net/~hinsen/ScientificPython

Il sito ufficiale di SciPy è:

http://www.scipy.org

3. ***MayaVi***

MayaVi (http://mayavi.sourceforge.net) è un toolkit per la visualizzazione dei dati molto avanzato. Fornisce un'interfaccia molto comoda e allo stesso tempo potente per la visualizzazione 2D e 3D, e supporta VRML e 3DStudio.

4. ***Dislin***

Dislin http://www.dislin.com è un set di librerie per rappresentare graficamente i dati, utilizzabili da C, Fortran, Python ed altri. I dati possono essere visualizzati sullo schermo o salvati in diversi formati

di immagine. Sono supportati il plot 2D, 3D, contour, multiplot, mappe geografiche, titoli in TeX. Sono state sviluppate vari moduli di alto livello che si appoggiano su Dislin e che ne rendono ancor più intuitivo l'utilizzo grazie anche ad interfacce grafiche per il gestone dei plot: uno di questi è disipyl, http://pantheon.yale.edu/~pmm34/disipyl.html

5. ***PIL***

Python Imaging Library, http://www.pythonware.com/library/the-python-imaging-library.htm, permette l'elaborazione di immagini da Python. Sono supportati tutti i più diffusi formati di immagine. Attraverso PIL è possibile visualizzare, ritagliare, filtrare, analizzare, ridimensionare, convertire, applicare filtri, etc…, direttamente dal codice in Python.

6. ***WxPython***

wxPython, http://wxpython.org , è il wrap per Python di wxWindows, un'API per creare GUI multipiattaforma (Unix, Windows, Mac...), e supporta:

- finestre, pulsanti, widgets, disegni...
- drag and drop
- help online
- network programming

7. Multithred
    - caricamento e salvataggio immagini;
    - supporto per database;
    - visualizzazione e stampa di HTML.

8. ***Gnuplot***

Gnuplot.py, http://gnuplot-py.sourceforge.net , è un modulo che interfaccia Python con il noto Gnuplot. In questo modo si possono creare grafici di dati e funzioni matematiche chiamando Gnuplot dal codice Python.

9. GracePlot

Per questo modulo vale quanto detto per Gnuplot.py, ma l'interfacciamento è con il notissimo programma Open Source di analisi dati Grace.

10. Gimp, Blender...

Esistono moduli per rendere Python uno scripting language per applicazioni grafiche come Gimp, il più diffuso programma per l'elaborazione grafica Open Source, e Blender, il potentissimo programma di grafica 3D.

I link sono:

http://www.blender3d.com

http://www.daa.com.au/~james/pygimp

In definitiva, per quanto tutto sopra esposto, Python è un linguaggio Open Source che si sta diffondendo rapidamente in numerosi ambiti, tra cui quello scientifico.

Il suo utilizzo si sta consolidando grazie alle caratteristiche di semplicità, eleganza, modernità, integrazione ed estendibilità. Questo fa del Python un candidato ideale per applicazioni scientifiche quali analisi dati, simulazioni, grafici, manipolazione algebrica, e così via; anche a discapito dei numerosi software proprietari che molti, anche nell'ambito della ricerca universitaria, ancora ritengono essere una risorsa indispensabile per tali scopi. In particolare, Python grazie alla sua sintassi asciutta e potente, ed al supporto multipiattaforma, è utilizzato fino al machine learning.

4.3. SOFTWARE DI ACQUISIZIONE DATI E HARDWARE A SUPPORTO

Il software sviluppato per l'acquisizione, la visualizzazione e l'analisi dei dati provenienti dalle schede e sensori installate nel controsoffitto (come descritte nel precedente documento), è composto da 3 differenti tools:

1. Software di comunicazione con le schede;
2. Software di post elaborazione dei dati;
3. Software di visualizzazione dati su interfaccia Web.

4.3.1. Il Software di comunicazione

Il software di comunicazione si occupa della comunicazione tramite Bluetooth attraverso lo oramai standard implementativo BLE (Bluetooth Low Energy – versioni Bluetooth 4.0 e superiori) a 2.4GHz e come la maggior parte degli attuali profili di applicazione low energy, si basa sul "Generic Attribute Profile" noto come GATT che permette di colloquiare tramite bt tra client e server ma anche tra i client così da poter ottenere una "mesh" di sensori intercomunicanti.

Nella attuale implementazione non è stata implementata questa mesh, ma potrebbe ulteriormente ottimizzare e semplificare il posizionamento dei sensori utilizzati in una futura applicazione realizzativa di tipo industriale.

Seguendo le specifiche dettate dal profilo GATT. L'implementazione del dimostrativo di laboratorio, così come quello applicativo in fase di validazione segue i 3 step:

1. Identificazione delle schede in base al loro Mac Address e connessione alla workstation atta al recupero dei dati;

2. Richiesta periodica delle grandezze da misurare alle schede sensori (tramite gli appositi UUID), ricezione dei dati rilevati;
3. Formattazione dei dati e loro conservazione nel database;

Infine, il software si occupa della conservazione del dato nel database.

4.3.2. Software di post elaborazione dati

Il software di post elaborazione dei dati legge i dati dai file prodotti durante l'acquisizione costruisce un database (attualmente nel ben noto standard oracle-mysql/mariadb), effettua le opportune conversioni, filtra i dati e li media opportunamente.

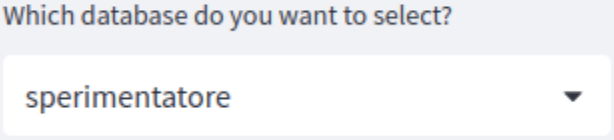
Esso è caratterizzato dalle seguenti funzionalità:

1. selezione del device considerato;
2. selezione del giorno considerato;
3. eliminazione di eventuali outlier;
4. opportuno filtraggio dei dati e loro media temporale.

4.3.3. Software di visualizzazione dati su interfaccia Web

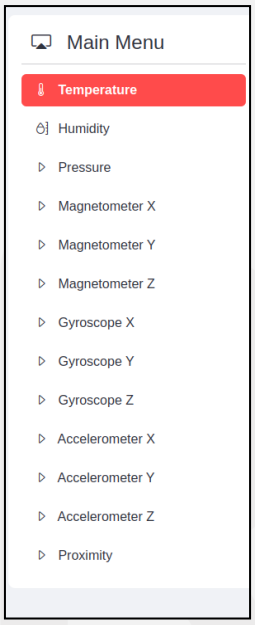
Il software di visualizzazione dati su interfaccia Web raccoglie i dati forniti dal software di post elaborazione, li formatta opportunamente e li visualizza su interfaccia web. Tale interfaccia sarà descritta nel seguito in maggiore dettaglio.

- **Interfaccia per la selezione del database di interesse**

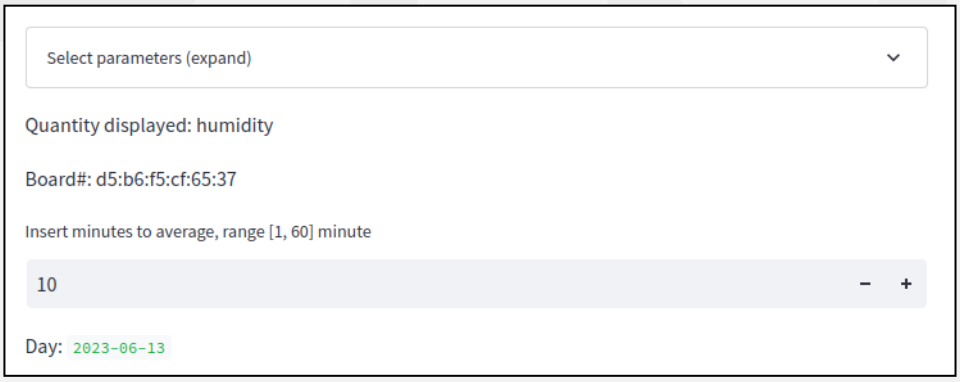


Attualmente sono disponibili dati provenienti dalla sperimentazione in laboratorio (“sperimentatore” nel menù) e dati di misure effettuate all’ospedale Cardarelli (“cardarelli” nel menù).

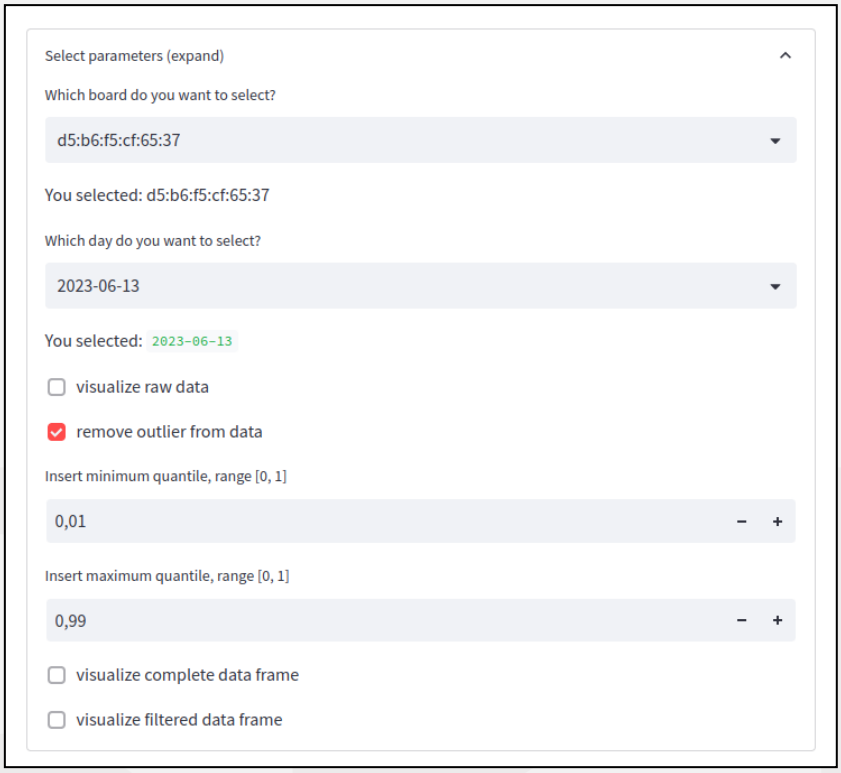
- **Interfaccia per la selezione delle grandezze da analizzare.**



- **Interfaccia selezione schede e giorno da analizzare**



In questa interfaccia, viene evidenziata la quantità mostrata, la board che ha prodotto i dati e l’intervallo temporale su cui sono effettuate le medie. Il default è 10 minuti che si è rilevato un tempo adeguato alla tipologia di dati acquisiti.



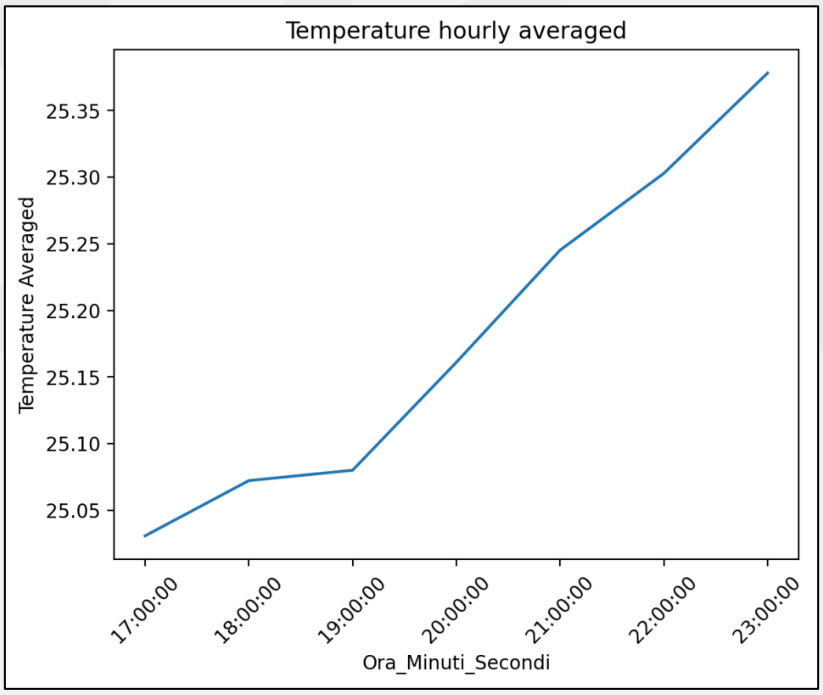
Espandendo il menù “selected parameters” è possibile cambiare la scheda che ha acquisito i dati e cambiare la data di interesse.

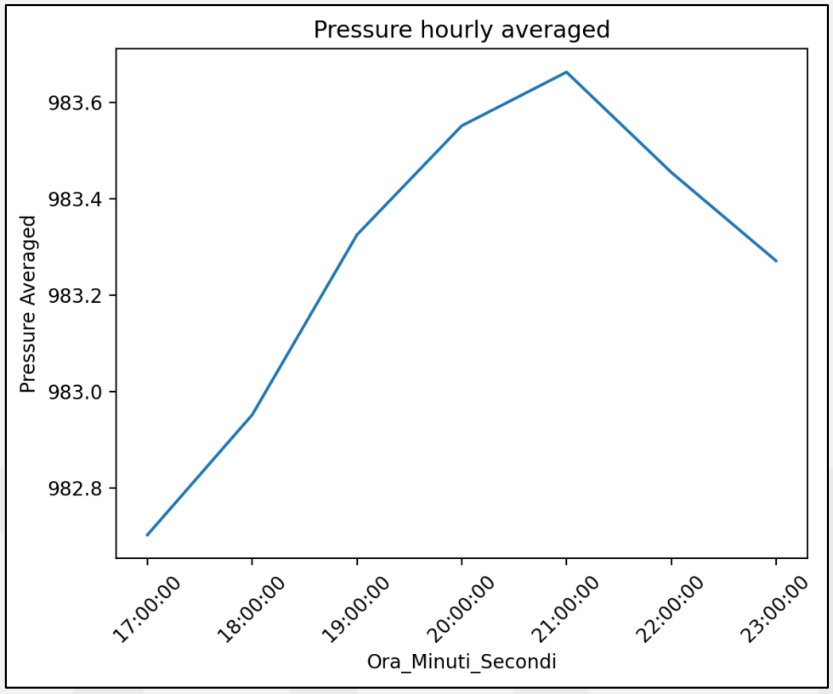
È inoltre possibile visualizzare i dati grezzi con il comando “visualize raw data”, rimuovere eventuali outlier con la tecnica del quantile “remove oulier from data”, il limite inferiore e superiore del filtro sono opportunamente modificabili in “insert minimum quantile” e “insert maximum quantile”.

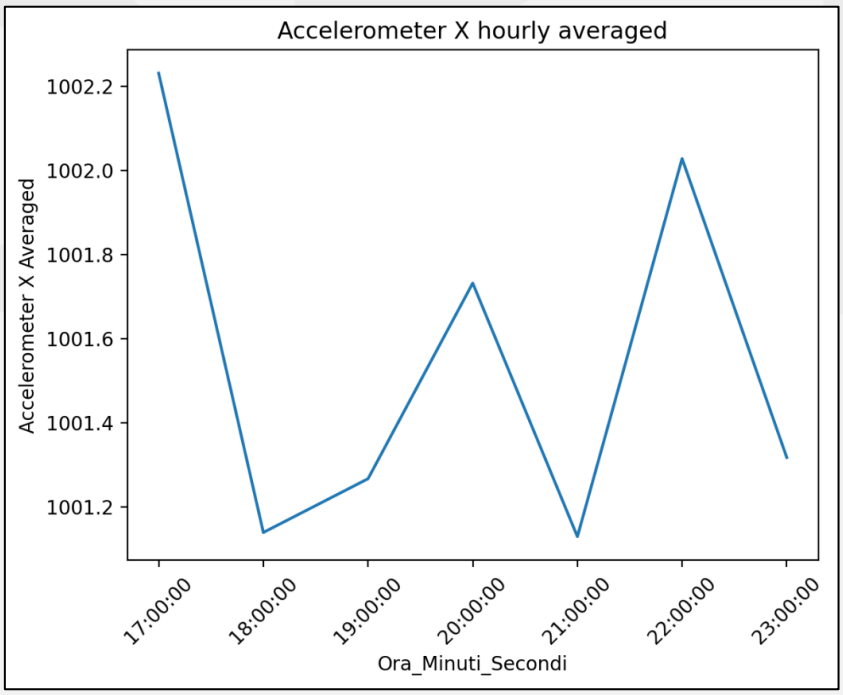
Per visualizzare i dati grezzi, così come memorizzati nel database è possibile selezionare “visualize complete data frame”, per visualizzare solo i dati filtrati come dispositivo e giorno è possibile selezionare “visualize filtered data frame”.

- **Visualizzazione dei risultati**

Di seguito alcuni dati di esempio relativi a grandezze mediate sull'ora, acquisite dalla scheda con MAC ADDRESS **e9:f6:40:fd:60:33** il giorno 2023-05-23 presso l'ospedale Cardarelli.







** Questi grafici sono riportati qui solo come esempio, tutti i dati, sia Raw che mediati o elaborati in altra forma sono disponibili tramite l'applicativo sviluppato.*

4.4. TECNICHE DI SCHERMATURA E FILTRAGGIO DEL SEGNALE

Per migliorare la qualità del segnale e ridurre l'interferenza elettromagnetica

I dati acquisiti sono stati ulteriormente filtrati digitalmente per mezzo di script in linguaggio python utilizzando un filtro ad alta frequenza e una media a finestra nobile. L'adozione di queste tecniche di filtraggio dei dati ci ha permesso di ottenere una visione più chiara e accurata delle misurazioni dei sensori, riducendo l'effetto delle variabili indesiderate (outlier) e aumentando la qualità complessiva dei dati analizzati. Questo ci ha fornito una base solida per l'interpretazione dei risultati e l'identificazione di eventuali modelli o tendenze significative.

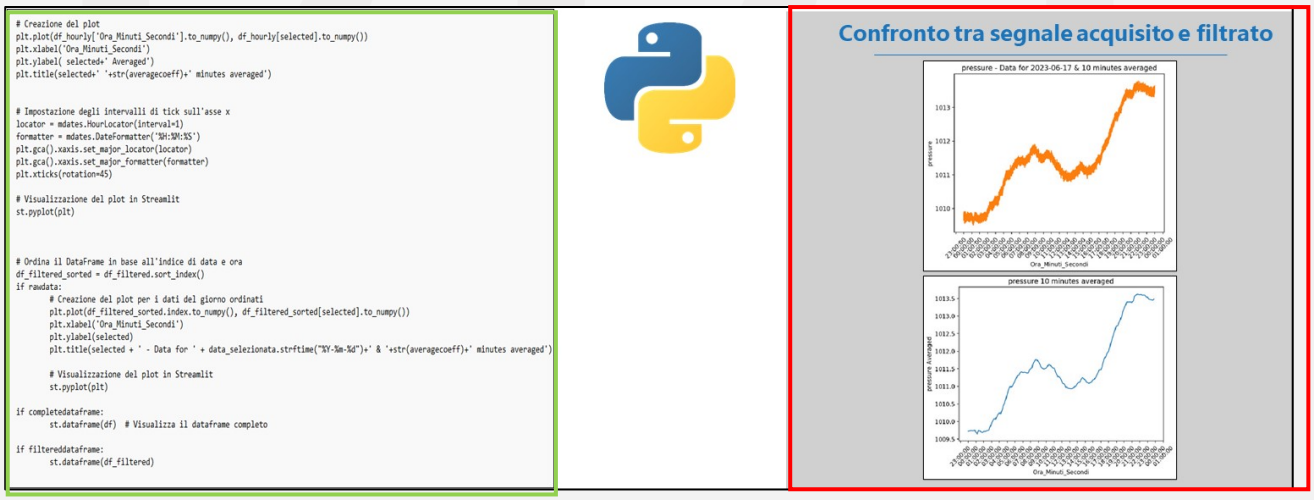


Fig.31 - Interfaccia web - Acquisizione segnale di output e filtraggio

```
# Creazione del plot
plt.plot(df_hourly['Ora_Minuti_Secondi'].to_numpy(), df_hourly[selected].to_numpy())
plt.xlabel('Ora_Minuti_Secondi')
plt.ylabel( selected+' Averaged')
plt.title(selected+' '+str(averagecoeff)+' minutes averaged')


# Impostazione degli intervalli di tick sull'asse x
locator = mdates.HourLocator(interval=1)
formatter = mdates.DateFormatter('%H:%M:%S')
plt.gca().xaxis.set_major_locator(locator)
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(formatter)
plt.xticks(rotation=45)

# Visualizzazione del plot in Streamlit
st.pyplot(plt)



# Ordina il DataFrame in base all'indice di data e ora
df_filtered_sorted = df_filtered.sort_index()
if rawdata:
        # Creazione del plot per i dati del giorno ordinati
        plt.plot(df_filtered_sorted.index.to_numpy(), df_filtered_sorted[selected].to_numpy())
        plt.xlabel('Ora_Minuti_Secondi')
        plt.ylabel(selected)
        plt.title(selected + ' - Data for ' + data_selezionata.strftime("%Y-%m-%d")+' & '+str(averagecoeff)+' minutes averaged'

        # Visualizzazione del plot in Streamlit
        st.pyplot(plt)

if completedataframe:
        st.dataframe(df)  # Visualizza il dataframe completo

if filtereddataframe:
        st.dataframe(df_filtered)
```

Fig.32 - Estratto script - Filtraggio del segnale di output

SEGNALE DI OUTPUT ACQUISITO *SEGNALE DI OUTPUT FILTRATO*

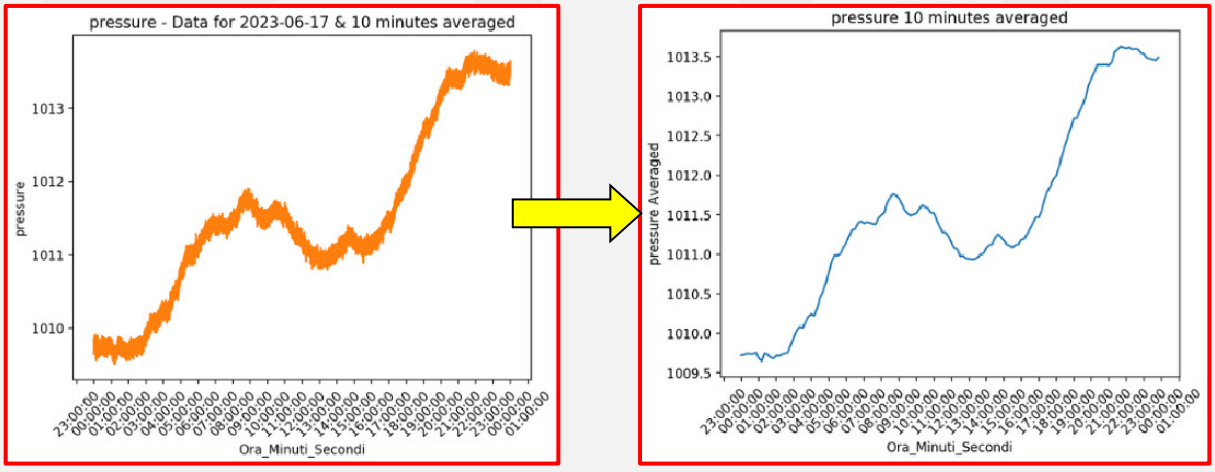


Fig34 - Elaborazione dati - Confronto tra il segnale acquisito e quello filtrato

5. OR-4: ESECUZIONE DI PROVE SPERIMENTALI

5.1. REALIZZAZIONE STRUTTURE

Per la ricerca e l'effettuazione delle prove sperimentali, il progetto ha previsto la creazione di uno sperimentatore che simuli le condizioni di un solaio parzialmente sfondellato e costituisca, quindi, effettivo campo sperimentale per l'apposizione della rete sensoriale di monitoraggio.

Struttura metallica costituita da travi in ferro a doppia T IPE 16

Lo sperimentatore, semplificando, è costituito da una idonea struttura metallica a sostegno di una sezione di solaio ammalorato e da una controsoffittatura in cartongesso con interposizione di rete in rafia sintetica, per uso edilizia, dedicata alle misure relative alla caduta di materiali.

Sperimentatore terminato

In particolare, la porzione di solaio è costituita da laterocemento, un materiale composito formato da calcestruzzo e laterizi, che combina le proprietà di resistenza del calcestruzzo con le caratteristiche di leggerezza e isolamento termico dei laterizi.

Nel caso specifico del presente progetto, il solaio, ricavato da precedente struttura esistente, costruito negli anni ‘60 ha un peso di circa 30 quintali e mostra una tipologia di tondini lisci, alcuni dei quali in stato avanzato di ossidazione, ad aderenza non migliorata, con evidenze di sfondellamento del laterizio.

Fase di posizionamento della porzione di solaio sul supporto dedicato nel sito di sperimentazione

Le dimensioni e il peso del solaio hanno richiesto l'utilizzo di attrezzature specializzate, come l'autogrù a 4 assi da 150 quintali, per sollevare e trasportare la sezione in sicurezza ed in posizione orizzontale. La messa in sicurezza della porzione di solaio da sezionare è avvenuta previo puntellamento della parte inferiore e mediante aggancio su travi a doppia T di 2,18 metri. Sono seguite le fasi di sezionatura e sollevamento della porzione di solaio ed il trasporto dello stesso al sito di destinazione.

L'utilizzo delle travi a doppia T ha evitato il rischio di collasso della porzione di solaio durante la fase di sollevamento e successivi trasporto e posizionamento sulla struttura metallica prototipale.

Una volta giunti al luogo di destinazione, il solaio è stato posizionato su una struttura metallica fornita dalla società BRT. Questa struttura è stata progettata specificamente per sostenere il peso e le dimensioni del solaio in laterocemento, garantendo un'installazione solida e sicura nella nuova posizione e progettata per le condizioni migliori di lavoro per gli operatori. L'intero processo di trasporto e installazione è stato caratterizzato da un'attenzione scrupolosa alle normative e alle misure di sicurezza, per garantire la sicurezza delle persone coinvolte.

La pianificazione e una gestione accurate, oltre a una stretta collaborazione tra tutte le parti coinvolte hanno permesso il raggiungimento degli obiettivi nei tempi brevi in riferimento agli aspetti connessi alla identificazione della parte candidabile per l'uso ed alle condizioni climatiche avverse. Grazie a questi sforzi, è stato possibile affrontare con successo le sfide presentate dai pericoli di danneggiamento, in modo da garantire un posizionamento finale sicuro e la realizzazione di una struttura funzionale e destinata a durare nel tempo.

Avvenuto il corretto posizionamento, il team coinvolto ha proceduto ad ulteriore rinforzo per garantire un livello di sicurezza ancora maggiore. Per lo scopo, sono stati utilizzati rinforzi angolari costituiti da profili pieni 50x50 S235JR.

Le successive azioni sono state anticipate dall'apposizione di regoli in acciaio per permettere il livellamento del solaio.

La foto mostra il particolare del regolo e lo stesso sul banco di riscontro

Il team di progetto ha accuratamente effettuato le verifiche e misurazioni del caso nonché provveduto al posizionamento di protezione impermeabile sovrastante con impiego di telone in PVC telato 100% impermeabile e resistente ai raggi UV dotato di occhiellatura per il fissaggio alla struttura.

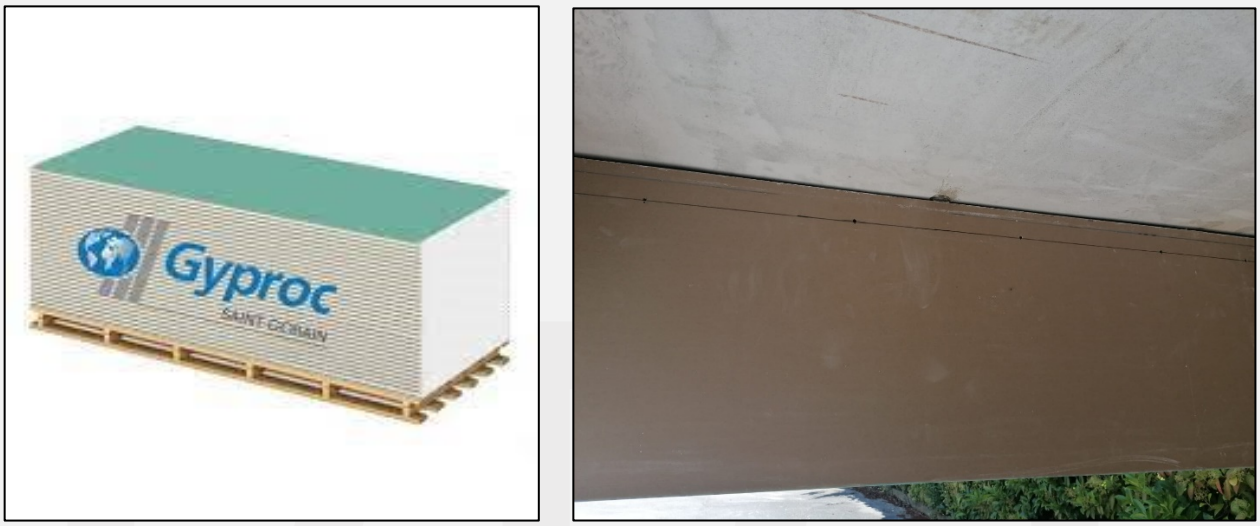
Particolare telo di protezione in PVC

Per consentire le prove di caduta materiali (calcinacci e/o laterizio) è stata posizionata una rete in rafia sintetica di poliestere a una distanza di 10 centimetri dal solaio. Lo scopo è quello di accogliere n° 2 sensori dedicati, principalmente, al rilievo gravimetrico.

Rete sintetica per il rilievo cadute di materiale

Si è proceduto, successivamente, alla costruzione di una struttura in cartongesso utilizzando il modello Hydro 13 mod. Gyproc prodotto dalla Saint-Gobain spa (codice H2 EN520A2-S1, DO(C1)).

Questo particolare tipo di cartongesso è resistente all'acqua, il che lo rende ideale per questo tipo di applicazioni che potrebbero influenzare le prestazioni del materiale.



Vista pannello laterale in cartongesso

La struttura in cartongesso, dotata di n° 4 sensori posizionati ai 4 angoli, è stata progettata per consentire la simulazione e i test sperimentali, fornendo un ambiente isolato in cui effettuare le misure di umidità, pressione, temperatura.

Il pannello di chiusura inferiore dello stesso materiale, che misura 2,75 m x 2,07 m, è stato posto ad una distanza pari a 42 cm dal sovrastante solaio e con possibilità di regolarne la distanza anche a 22cm mediante sistema di supporto a spinotti estraibili.

Particolare spinotto di blocco estraibile per le funzioni di livellamento

Particolare del sistema di posizionamento controsoffitto in 2 posizioni

Questa flessibilità nella posizione del pannello inferiore consente di testare e valutare diversi scenari e configurazioni della controsoffittatura.

Il tutto, è stato progettato tenendo conto della sicurezza e della durabilità. Per garantirne la indeformabilità è stata creata una sotto-struttura di sostegno in assi di alluminio. L'alluminio è un materiale leggero ma resistente, che fornisce un'ottima base per il pannello inferiore e contribuisce a mantenere la struttura complessiva sicura e stabile durante i test e le simulazioni.

Particolare botola ispezione con apertura a scatto

Altra caratteristica chiave del pannello inferiore della struttura in cartongesso è la presenza di una botola di 40x40 cm, che ha garantito un facile accesso all'interno della camera isolata. Questa botola ha consentito al personale di supervisionare e ispezionare facilmente le condizioni del solaio e dell'ambiente circostante, senza compromettere la sicurezza o l'integrità della struttura.

Una fase della lavorazione del pannello di chiusura inferiore in cartongesso

5.1.1. Struttura metallica di sostegno

5.1.1.1. Norme di riferimento

Si riporta l'elenco delle principali normative a cui si è fatto riferimento nella elaborazione del progetto della struttura metallica di sostegno:

- Norma UNI EN 10025-5: "Acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica";
- D.M. 17/01/2018: "Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni – N.T.C. 2018";
- Circ. Ministeriale n. 7 del 21/01/2019: "Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018".

5.1.1.2. Descrizione

Per l'esecuzione delle prove in laboratorio è stato necessario realizzare una struttura in carpenteria metallica a sostegno di un solaio esistente su cui eseguire i test di laboratorio.

In particolare, è stata progettata una struttura avente impalcato di forma rettangolare con dimensioni in pianta 3.00 x 2.30 m ed altezza netta delle colonne pari a 2.00 m. Alla base delle colonne (HEA100) è stata prevista una piastra 30 x 30 cm pre-saldata al profilo HEA100.

I collegamenti tra gli elementi strutturali sono tutti effettuati tramite connessione bullonata utilizzando bulloni M10 di classe C8.8. Per i profili in carpenteria metallica e per le piastre è stato utilizzato un acciaio S235.

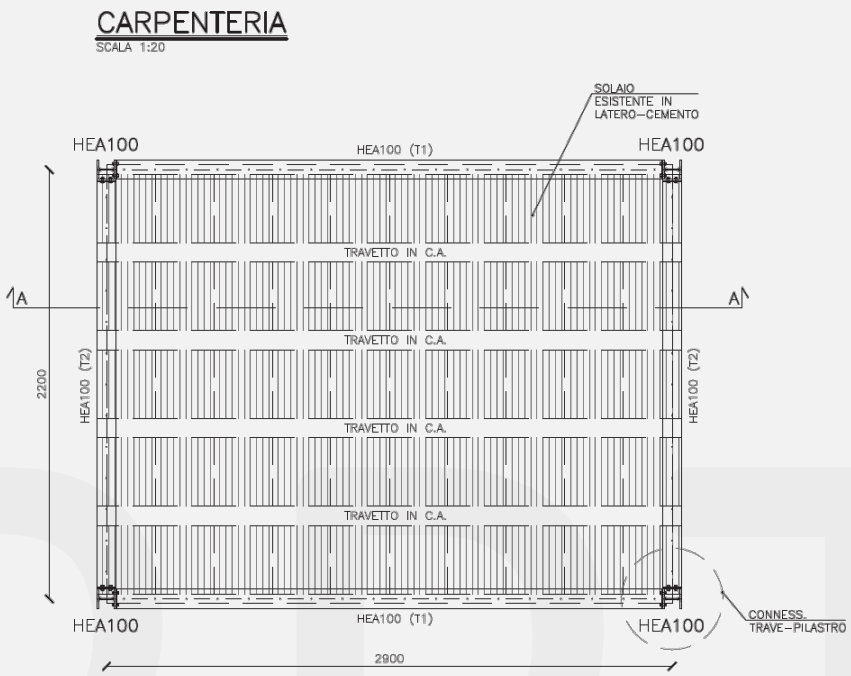


Fig.35 -Carpenteria struttura metallica

Fig.36 -Sezione A-A della struttura metallica

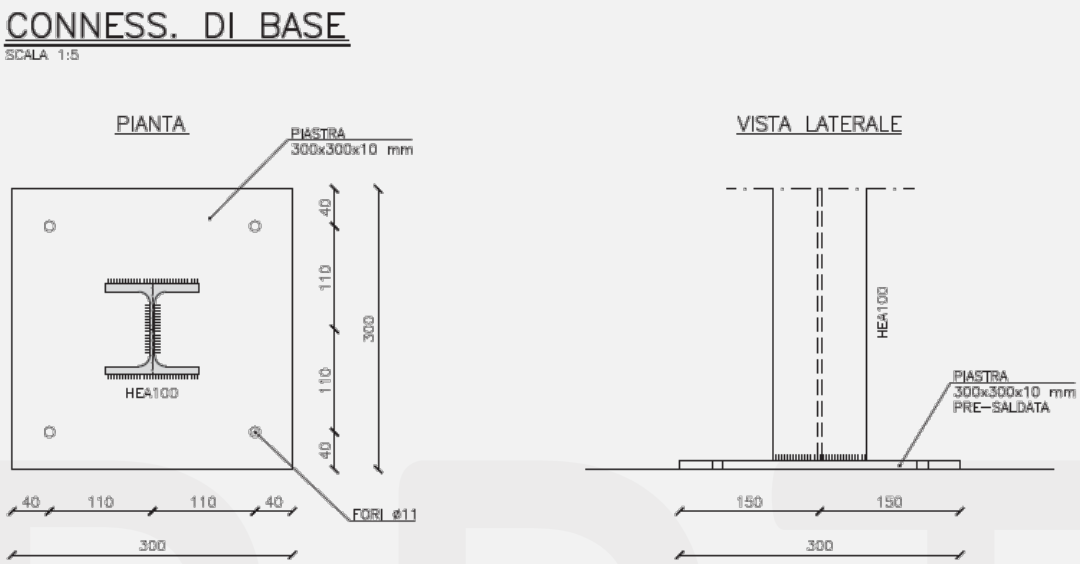


Fig.37- Connessione di base

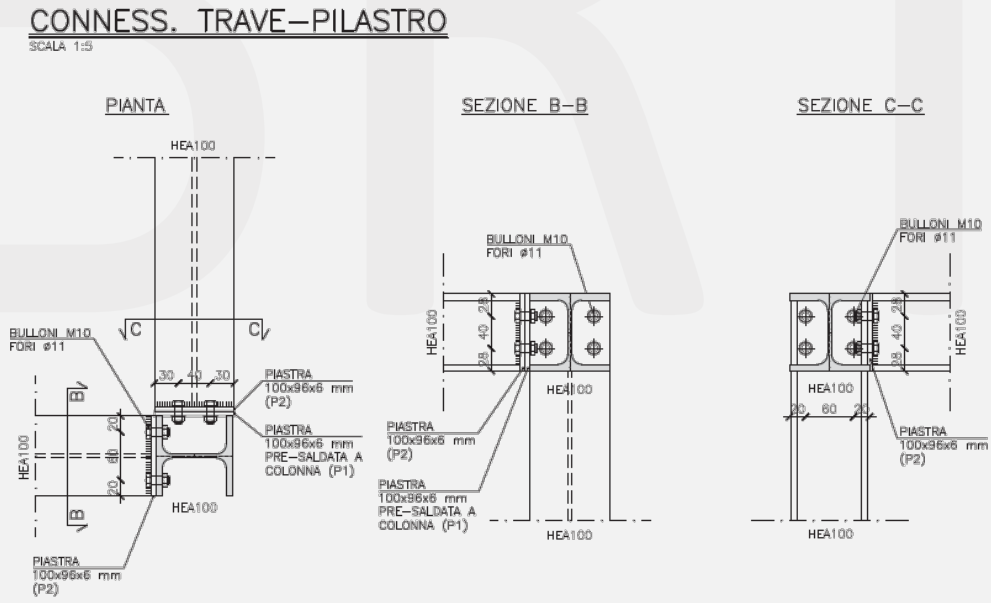


Fig.38- Connessione trave – pilastro

5.1.1.3. Materiali

Acciaio da carpenteria metallica S235 JR – S235 H JR

- Tensione caratteristica di rottura a trazione $f_{tk} \geq 360.00$ MPa

- Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk} \geq 235.00$ MPa
- Resilienza $KV \geq 27J$
- Modulo di elasticità normale $E_s = 206000$ MPa
- Modulo di elasticità tangenziale $G_s = 78400$ MPa

5.1.1.4. Modellazione strutturale

La determinazione dello stato di sollecitazione delle strutture, per effetto delle azioni di calcolo, è stata perseguita realizzando una modellazione spaziale delle strutture con l'ausilio del codice di calcolo agli elementi finiti "Sismicad" distribuito dalla "Concrete S.r.l." con sede a Padova (PD).

Dopo aver definito le proprietà intrinseche dei materiali e dopo aver assegnato, a ciascuna delle parti costituenti il modello, le relative proprietà geometriche e meccaniche, sono state applicate ad esse le relative azioni. In particolare, sono stati assegnati i carichi dovuti al peso proprio degli elementi strutturali, i carichi permanenti strutturali e non strutturali, i carichi variabili.

Il software di calcolo utilizzato è in grado di determinare il peso degli elementi strutturali a partire dalla geometria della sezione e dal peso dell'unità di volume del materiale assegnato, pertanto, alcuni carichi vengono valutati ed elaborati dallo stesso software che provvede anche ad amplificarli con i coefficienti prescritti dalla vigente normativa in funzione dello stato sollecitante analizzato ed a generare in automatico le combinazioni di carico previste dalla stessa normativa.

Infine, si precisa che per una struttura provvisoria, quale quella oggetto di analisi, non si eseguono verifiche sismiche. Pertanto, è stata eseguita soltanto una verifica per carichi statici verticali.

La struttura è stata modellata con l'utilizzo di elemento monodimensionali (beam) ed aree di carico per simulare i carichi superficiali di impalcato.

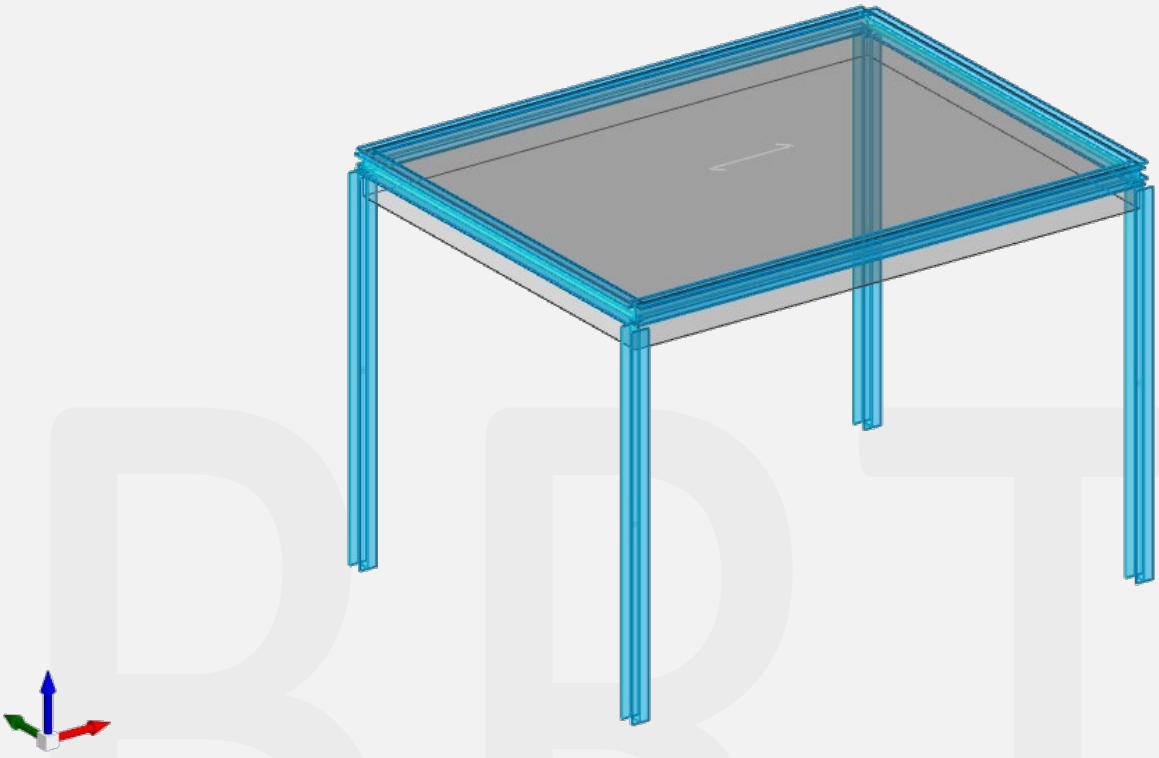


Fig.39- Modello 3D delle strutture metalliche

L'esame dei risultati e i controlli sull'affidabilità dell'elaborazione effettuata hanno riguardato:

- la compatibilità dei dati geometrici;
- l'assenza di labilità;
- l'entità dei valori delle risultanti dei carichi per le varie condizioni;
- l'equilibrio dell'intera struttura e di sue parti significative per le singole condizioni di carico;
- il rispetto delle condizioni di vincolo imposte.

Una valutazione complessiva dell'attendibilità dell'analisi strutturale automatica è stata effettuata, inoltre, confrontandone i risultati con quelli derivanti da semplici calcoli di massima, eseguiti con i metodi tradizionali.

5.1.1.5. Azioni

Gli elementi strutturali esaminati nel presente paragrafo sono stati modellati, calcolati e verificati col programma strutturale "Sismicad" dedicato all'analisi ed al calcolo di elementi strutturali con il metodo FEM agli elementi finiti (Licenza d'uso n. 9286753). Pertanto, alcuni carichi vengono valutati ed elaborati dallo stesso software che provvede anche ad amplificarli con i coefficienti prescritti dalla vigente normativa in funzione dello stato sollecitante analizzato, ed a generare in automatico le combinazioni di carico previste dalla stessa normativa.

Si riporta di seguito la stima dei carichi agenti sulle strutture allo stato di progetto. I valori delle azioni di seguito indicati sono stati considerati come valori caratteristici nelle verifiche agli Stati Limite.

Carichi di superficie

G_1 - Solaio in latero-cemento	2.72	kN/m^2
G_2 - Sovraccarichi permanenti non strutturali	3.00	kN/m^2
Q_k - Carichi variabili (cat. A)	2.00	kN/m^2

5.1.1.6. Sollecitazioni

Si riportano di seguito le sollecitazioni agenti negli elementi strutturali.

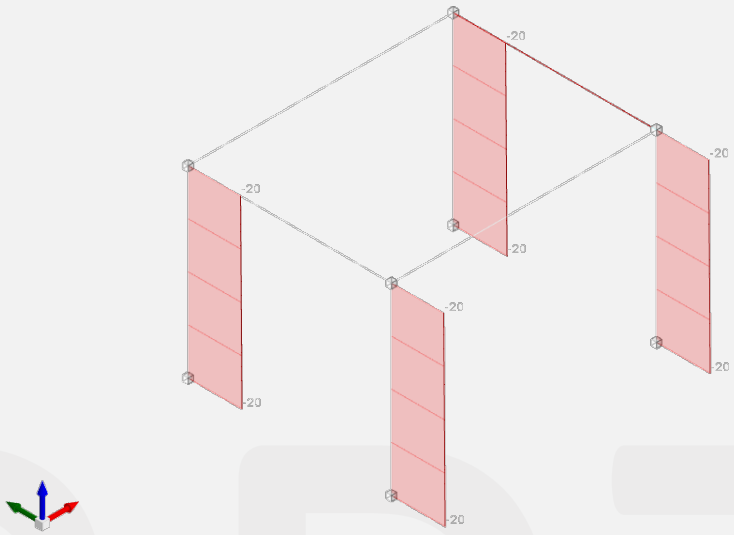


Fig.40- Inviluppo SLU – Sforzo normale N (kN)

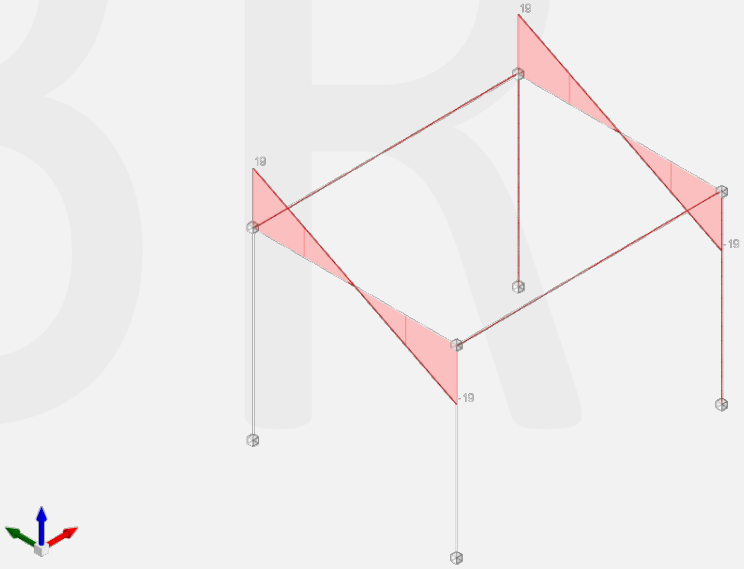


Fig41- Inviluppo SLU – Taglio V2 (kN)

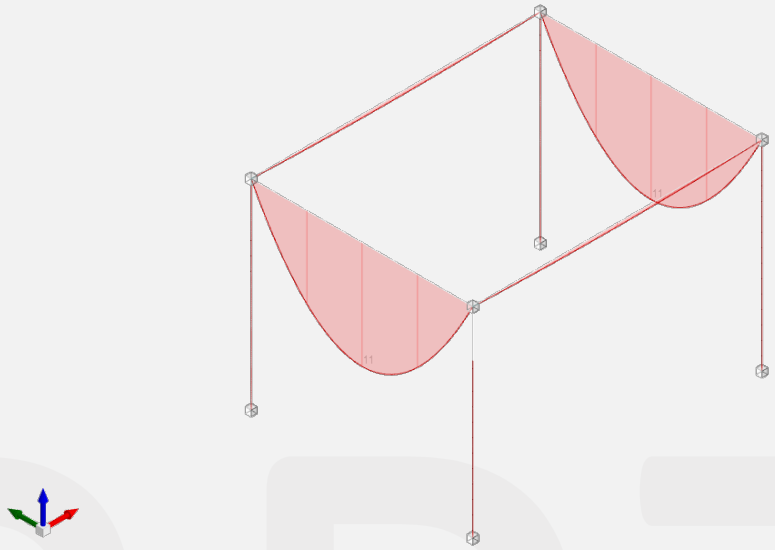


Fig.42- Inviluppo SLU – Momento M3 (kNm)

5.1.1.7. Verifiche strutturali

Si riportano, di seguito, i grafici relativi ai fattori di sicurezza FS_{SLU} per i diversi elementi strutturali, ovvero le verifiche più gravose di resistenza.

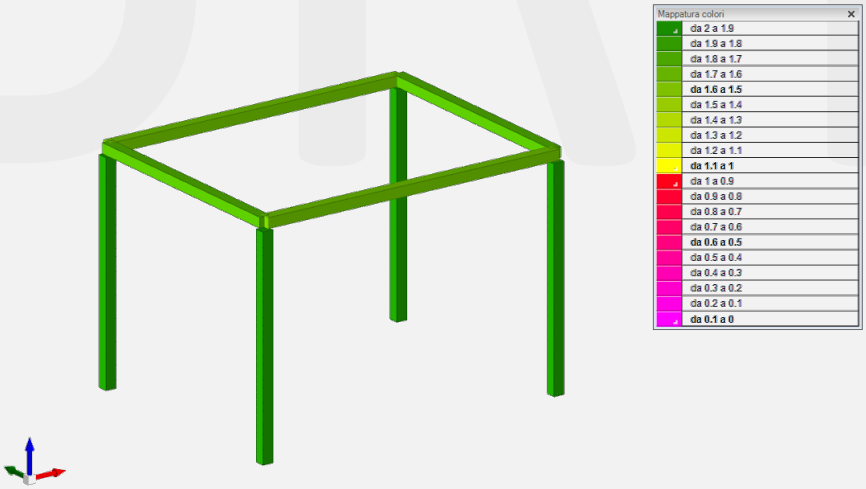


Fig.43- Verifiche – Sicurezza minima

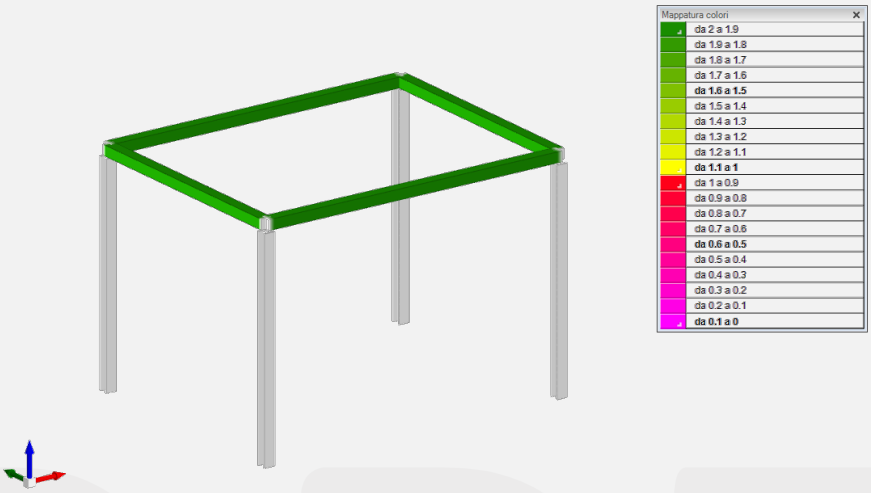


Fig.44- Verifica a flessione

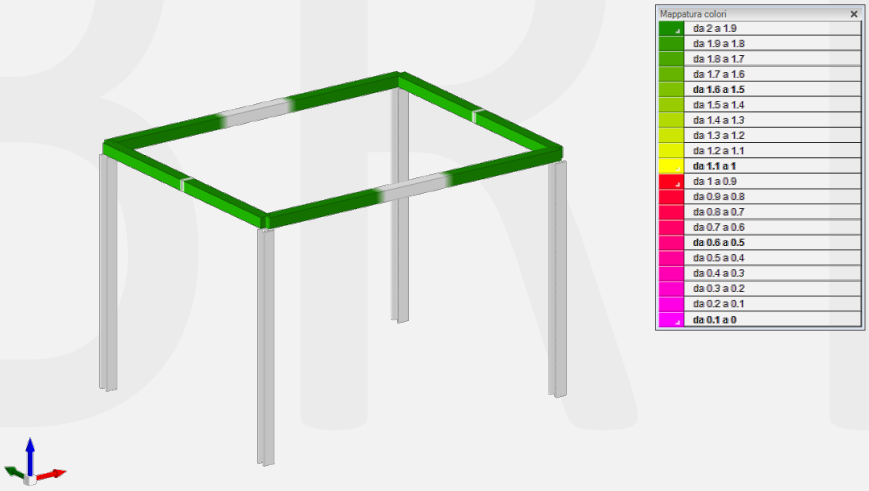


Fig.45- Verifica a taglio

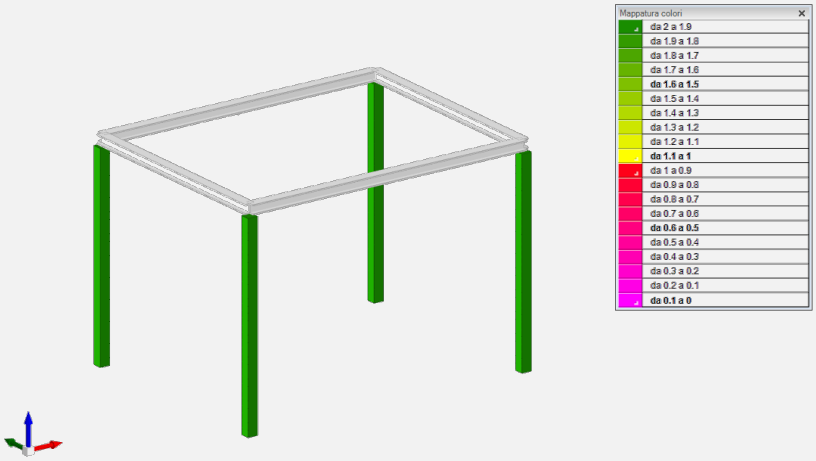
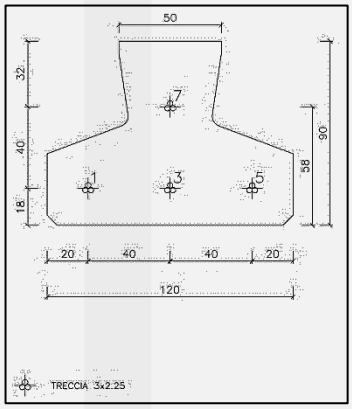


Fig.46- Verifica a stabilità per compressione

Quanto sviluppato in precedenza è finalizzato alla valutazione della sicurezza ai sensi del D.M. 17/01/2018 della struttura provvisoria per l'esecuzione dei test di laboratorio inerenti il Sistema HMD. Le verifiche di sicurezza hanno permesso di constatare che le sollecitazioni di calcolo sono compatibili con le resistenze degli elementi. Le analisi condotte, dunque, confermano che tutte le verifiche prescritte dalla normativa vigente risultano soddisfatte e le strutture risultano sicure per l'esecuzione delle attività previste.

5.2. ANALISI SOLAIO ESISTENTE



Per effettuare la sperimentazione in laboratorio, è stato eseguito il taglio di un solaio esistente che è stato trasportato in laboratorio e poggiato sulla struttura metallica progettata e realizzata appositamente.

In particolare, è stato eseguito il taglio di un solaio in latero-cemento costituito da travetti prefabbricati in cls aventi sezione 9x12, con forma a "T" rovescia e con anima a coda di rondine, armati con trecce in acciaio ciascuna di dimensioni 3x2.25mm; conclude la struttura un getto di completamento in cls armato con n.2 Ø12/travetto lisci. Le pignatte, con le alette appoggiate sui travetti prefabbricati, hanno larghezza pari a 37 cm, altezza pari a 12 cm e lunghezza pari a 25 cm. Al di sopra dell'impalcato strutturale, è stato rilevato un massetto cementizio di spessore 8 cm, mentre all'intradosso era presente uno strato di intonaco di circa 1 cm di spessore.

Il taglio del solaio è stato eseguito, dapprima puntellando l'intradosso dell'intero impalcato e, successivamente, operando una demolizione localizzata e controllata, intervenendo all'estradosso con l'ausilio di un martello demolitore.

Fig.47- Tipologia di solaio utilizzato per le prove in laboratorio

Di seguito si riportano alcune foto riprese in sito.

Particolare solaio esistente

Particolare sperimentatore

Particolare travetto in Cls e trecce in acciaio

Particolare travetto in Cls con trecce in acciaio e barre lisce

5.3. UBICAZIONE SENSORI

Si è proceduto all'installazione di n°9 sensori con relativi identificativi basati su MAC address secondo il seguente schema:

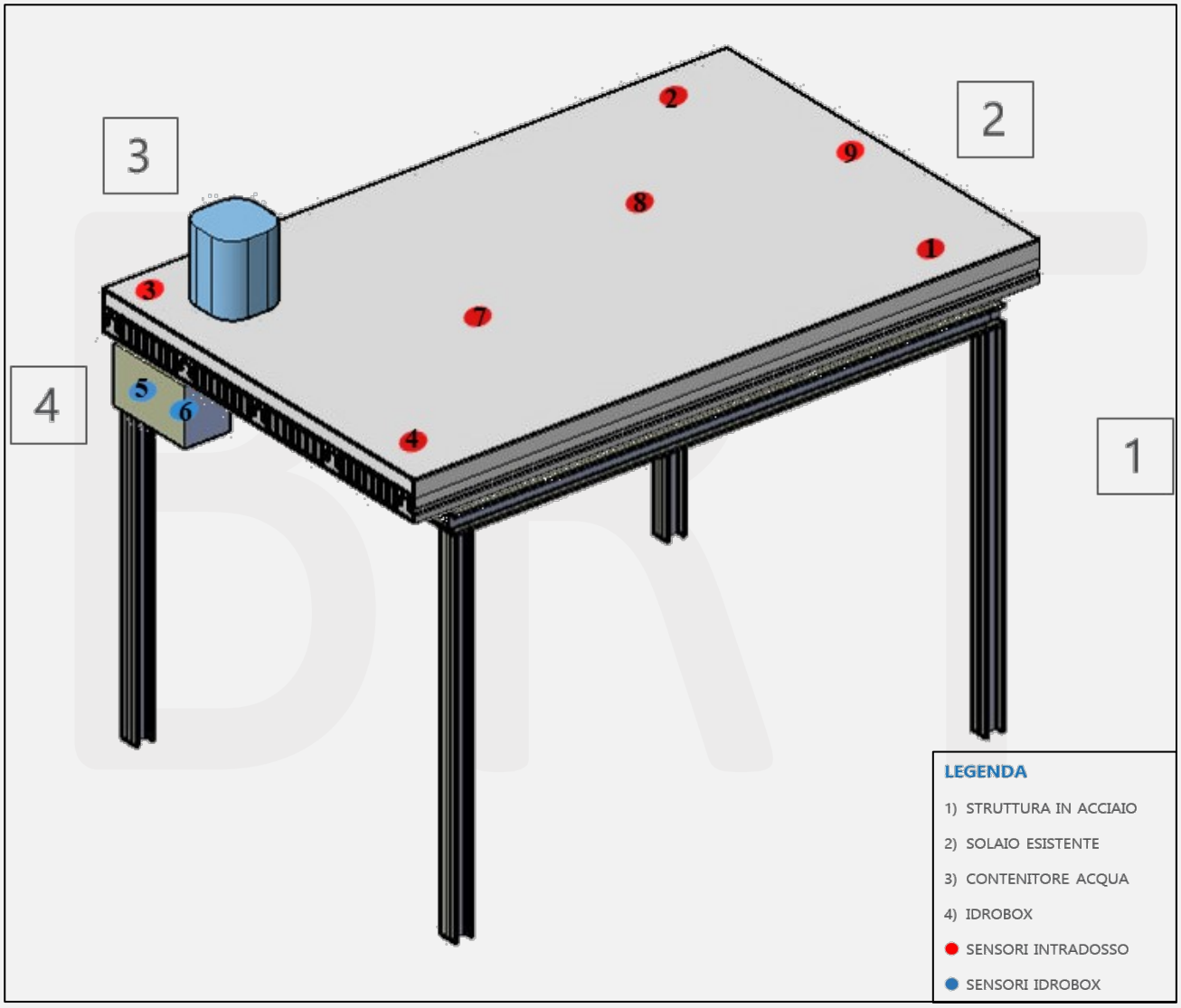
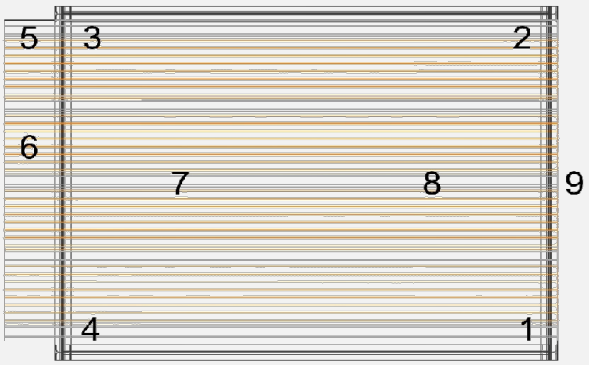


Fig.48 - Modello 3d sperimentatore



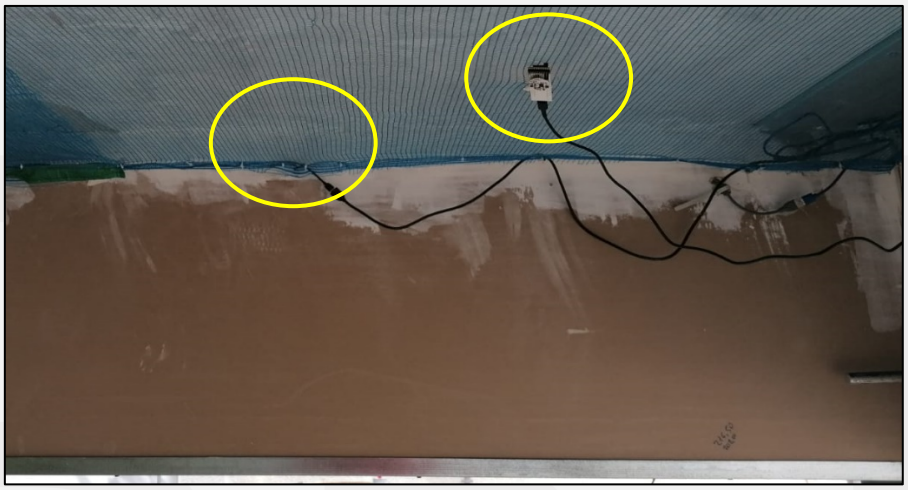
n. sensore	MAC address
1	da:54:ea:43:49:61
2	f1:14:0c:1a:70:1d
3	f7:b4:11:5e:22:91
4	f0:aa:4e:23:d8:45
5	d5:b6:f5:cf:65:37
6	e8:0b:94:28:da:21
7	ee:0b:b4:07:11:e8
8	dd:42:42:2d:ee:1e
9	e3:8c:e9:88:b5:c0

Fig.49 - Ubicazione sensori1_Planimetria solaio e MAC address identificativi

- N° 4 quattro sensori angolari (sensori 1-2-3-4), disposti all'intradosso della struttura, con la finalità di misurare la pressione, l'umidità, la temperatura e il tempo di volo (misurazione distanza) posizionati ad arte per avere il miglior cono di visibilità nella zona di interesse.

Ubicazione sensori angolari

- N° 2 due sensori (sensori 7 e 8) gravimetrici disposti sulla rete in rafia sintetica di poliestere - accelerometro, giroscopio, magnetometro, Time of Flight (distanza) - in grado di misurare la distanza relativa dei sensori alla fine della controsoffittatura, rilevare eventuale caduta di materiale e utili per registrare le deformazioni della rete.



Ubicazione sensori gravimetrici sulla rete in rafia sintetica

- N° 2 sensori (sensori 5 e 6) in sezione isolata, costituita da due camere indipendenti ognuna con un proprio sensore. Nelle due camere sono simulati due differenti livelli di umidità che i sensori sono in grado di rilevare lavorando in continuo. Questa configurazione permette di valutare l'impatto di diversi livelli di grado di umidità provenienti dal sovrastante solaio. La porzione di solaio cui sono agganciate le 2 camere è stata costantemente bagnata con un sistema a gocce (acqua) con una frequenza di 0.28 litri l'ora.

Camera a 2 celle a contatto con parte di solaio inumidita artificialmente

N° 1 sensore (sensore n. 9) esterno frontale per rilievo temperatura, pressione e umidità ambientale con lo scopo di rilevare le condizioni ambientali circostanti. Le misurazioni ambientali effettuate sul sensore n.9 hanno consentito un confronto con le rilevazioni effettuate internamente.

Ubicazione sensore multiparametro esterno

Il monitoraggio di questi parametri è fondamentale per valutare le prestazioni del solaio, come evidenziato in letteratura.

Per alimentare e gestire tutti i sensori installati sia all'interno che all'esterno della struttura, il team di progetto ha implementato un sistema di cablaggio composto da due hub USB, sei dongle Bluetooth e tre cavi di alimentazione. Questo sistema è stato progettato per garantire una connessione costante e affidabile tra i sensori e il dispositivo di monitoraggio centrale.

I dongle Bluetooth servono per mantenere una connessione Bluetooth costante con i sensori, consentendo la trasmissione continua dei dati raccolti senza interruzioni o perdite di informazioni. Gli hub USB, invece, sono utilizzati per collegare i dongle al sistema di monitoraggio centrale.

Per garantire un costante flusso di corrente e prevenire eventuali interruzioni di alimentazione che potrebbero compromettere la raccolta e l'analisi dei dati, gli hub USB sono collegati a un sistema di alimentazione di emergenza (UPS). Questo sistema di alimentazione ininterrotta assicura che i sensori e il dispositivo di monitoraggio centrale continuino a funzionare anche in caso di interruzioni di corrente o di altri problemi elettrici.

Il progetto della struttura giunge infine alla fase conclusiva con l'applicazione di n° 1 strato isolante ferro-micaceo sulle parti in ferro della struttura con funzioni di antiossidante per la prevenzione dalla formazione di ruggine e a mantenere l'integrità strutturale del ferro.

L'utilizzo di idropittura sulle parti in cartongesso migliora l'aspetto estetico della struttura, ma offre anche ulteriori benefici in termini di protezione e manutenzione.

6. OR-5: VALIDAZIONE DEL SISTEMA IN LABORATORIO

6.1. SPERIMENTAZIONE ESEGUITA

Nel contesto della nostra sperimentazione in laboratorio, è stata realizzata una solida struttura metallica appositamente progettata. Questa struttura è stata studiata per sostenere il peso e le dimensioni del solaio in esame, garantendo la sua stabilità e sicurezza durante le prove.

Il solaio oggetto di analisi è del tipo laterocemento, un materiale composito che unisce le proprietà del calcestruzzo armato con quelle dei laterizi. Questa combinazione offre al solaio una buona resistenza strutturale, unita alla leggerezza e alle caratteristiche isolanti dei laterizi. In passato, il solaio in laterocemento era ampiamente utilizzato nella costruzione di edifici residenziali e commerciali.

Tuttavia, nel corso del tempo, possono insorgere problemi strutturali a causa dell'ossidazione dei ferri interni. Nel caso specifico del solaio preso in esame, è stata riscontrata la presenza di ferri lisci, alcuni dei quali mostravano un avanzato stato di ossidazione. Questo fenomeno può compromettere la stabilità e l'integrità del solaio, manifestandosi anche attraverso fenomeni di sfondellamento visibili nelle pignatte.

Per consentire la sperimentazione in un ambiente controllato, abbiamo realizzato un controsoffitto utilizzando una struttura in cartongesso specifica della Gyproc Saint-Gobain, il modello idro 13 (codice H2 EN520A2-S1, DO(C1)). Questo tipo di cartongesso è stato progettato appositamente per resistere all'acqua, garantendo prestazioni ottimali anche in ambienti umidi o soggetti a condizioni che potrebbero influenzarne la qualità.

La struttura in cartongesso, combinata con la robusta struttura metallica, ha fornito un ambiente controllato e sicuro per simulare e sperimentare sul solaio in laterocemento. Grazie alle caratteristiche idrorepellenti del cartongesso, il controsoffitto ha garantito una protezione adeguata al solaio durante le prove, consentendo di valutarne accuratamente le prestazioni e rilevare eventuali fenomeni di sfondellamento. Questa metodologia ha permesso di ottenere informazioni dettagliate per lo sviluppo di sistemi di rilevamento dello sfondellamento, contribuendo così alla comprensione e alla soluzione dei potenziali problemi strutturali del solaio in laterocemento.

Per valutare le prestazioni del solaio e identificare potenziali problemi, è stato realizzato un box appositamente progettato. Questo box è stato concepito per simulare una problematica di infiltrazione causata da un danno a una tubatura idrica. All'interno del box sono presenti due camere, ognuna con accesso a una porzione del solaio.

Camera a 2 celle a contatto con parte di solaio inumidita artificialmente. Sensori 5 e 6

Camera a 2 celle a contatto con parte di solaio inumidita artificialmente

Questa configurazione consente di valutare l'effetto di diversi livelli di umidità sul solaio e di individuare eventuali criticità o aree che richiedono miglioramenti. Al fine di simulare condizioni di umidità varie, il solaio all'interno delle due camere viene costantemente bagnato con una quantità di acqua pari a 0,28 litri all'ora.

Al fine di monitorare le condizioni ambientali circostanti, è stato posizionato un ulteriore sensore all'esterno della struttura. Questo sensore esterno riveste un ruolo fondamentale nel rilevare fattori quali temperatura, umidità e pressione atmosferica, che possono influenzare direttamente o indirettamente le prestazioni del solaio in laterocemento e del controsoffitto in cartongesso.

Gli altri sensori sono stati distribuiti sulla struttura in posizioni strategiche. In particolare, i sensori **#3** e **#4** sono stati collocati nelle immediate vicinanze dell'area in cui viene simulata l'infiltrazione d'acqua causata da una conduttura danneggiata. Questi sensori sono stati posizionati anche per rilevare la presenza di infiltrazioni che potrebbero seguire le fessurazioni causate dall'ammaloramento del solaio.

Attraverso questa configurazione di sensori e il box di simulazione, è possibile raccogliere dati accurati e monitorare attentamente le condizioni del solaio e delle aree soggette a infiltrazioni. Questo ha permesso di valutare l'impatto delle diverse condizioni di umidità, identificare eventuali danni o problemi strutturali e sviluppare soluzioni adeguate atte a migliorare le prestazioni complessive del solaio in laterocemento e del controsoffitto in cartongesso.

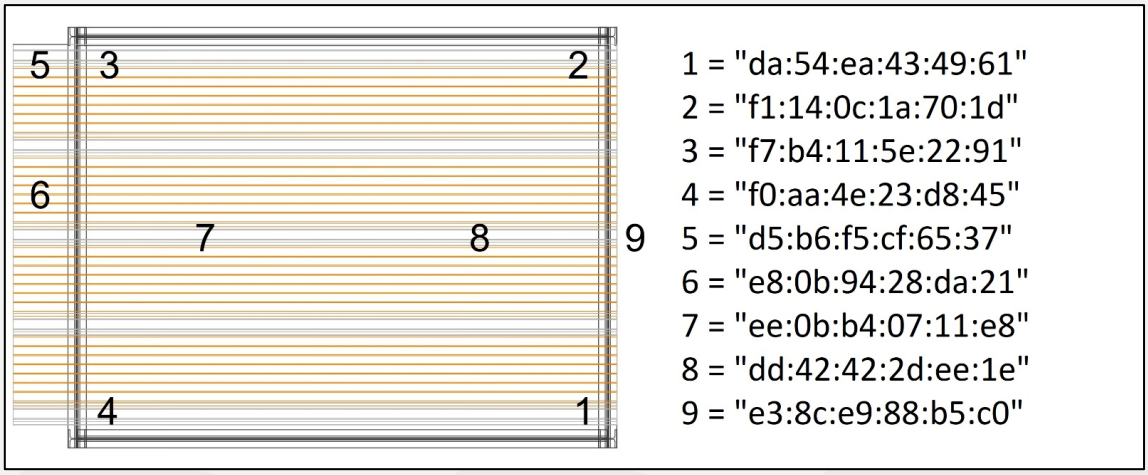


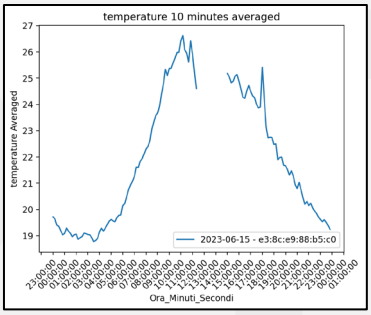
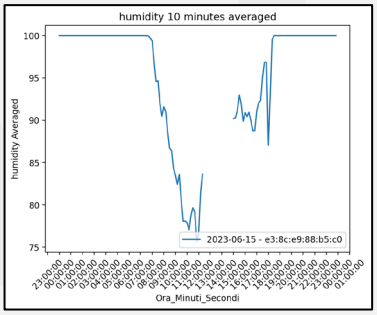
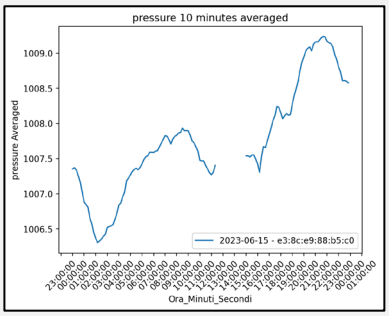
Fig.50 - Planimetria solaio di laboratorio e ubicazione sensori.

I sensori di temperatura, umidità e pressione hanno il ruolo di monitoraggio delle condizioni ambientali locali, fornendo informazioni per la valutazione delle condizioni del solaio e della controsoffittatura. Il sensore **#9**, posizionato all'esterno del dimostratore, svolge la funzione di riferimento per gli altri sensori, fornendo dati sulle condizioni ambientali circostanti "esterne".

Il sensore di umidità utilizzato nella sperimentazione, come già precedentemente esposto, è di tipo non invasivo e legge l'umidità dell'aria circostante e non direttamente quella presente nell'intonaco ammalorato. Pertanto, la sua sensibilità è limitata rispetto a altre tipologie di sensori che si inseriscono in maniera maggiormente invasiva nel solaio. Tuttavia, è stato osservato che il sensore **#5** e il sensore **#4** rilevano un incremento di umidità dovuto all'infiltrazione artificialmente prodotta durante la sperimentazione, indicando la presenza di fessurazioni e quindi ammaloramento in quelle specifiche zone.

Questa osservazione evidenzia anche il ruolo particolare dei sensori nel rilevare cricche in maniera localizzata. Ciò solleva la questione del numero e del tipo di sensori di umidità da installare per ottenere una copertura completa della struttura. Diventa quindi di fondamentale importanza valutare

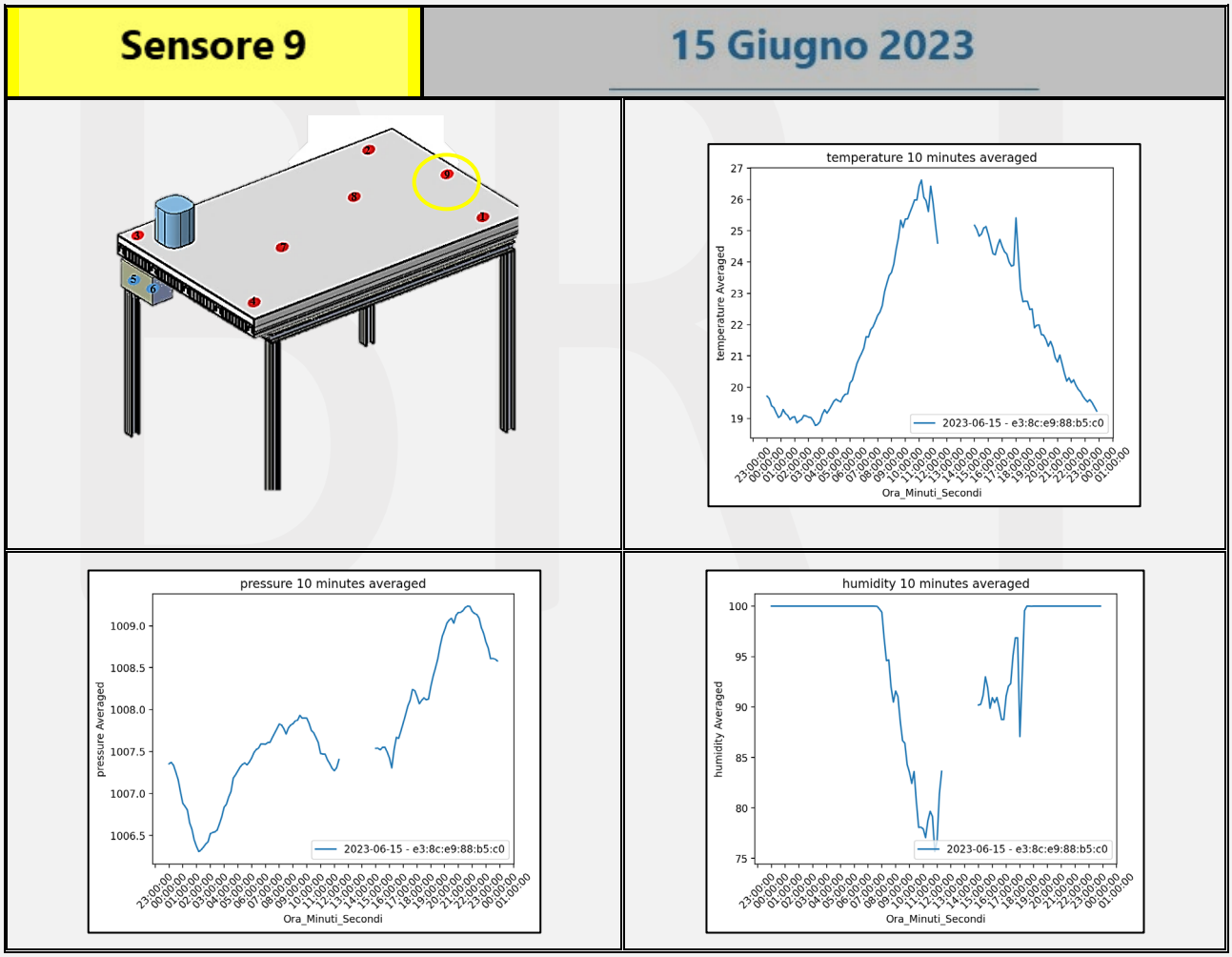
attentamente la distribuzione e l'ubicazione dei sensori di umidità al fine di identificare aree critiche e garantire una rilevazione accurata dei punti di ammaloramento o infiltrazione. Una strategia adeguata potrebbe prevedere l'installazione di sensori di umidità in prossimità delle potenziali aree a rischio, consentendo una valutazione dettagliata e localizzata delle condizioni di umidità lungo tutto la superficie del solaio.

Sensore	Unità di misura	Grafico
Temperature	milligravity (mg)	
Humidity	%	
Pressure	mBar	

6.1.1.1. Monitoraggio ambientale non controllato

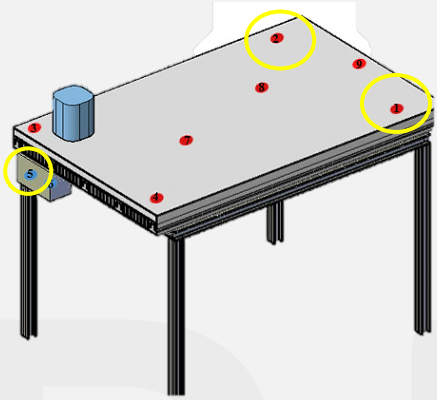
Tra le varie sperimentazioni condotte durante il periodo di prova si è “approfittato” delle condizioni metereologiche avverse per eseguire il test sull’intera superficie esponibile, eliminando il telone di protezione posto sopra lo sperimentatore dal giorno 14 al giorno 16 di Giugno.

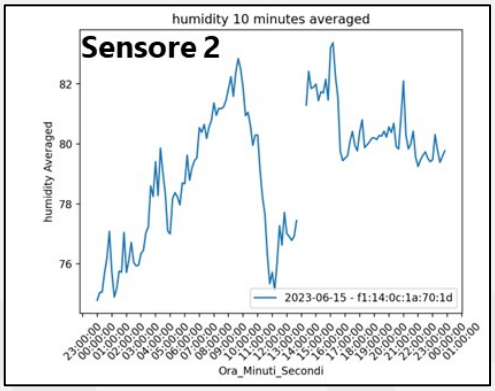
Il sensore **#9** (esterno) indica che il giorno 15 Giugno è piovuto per gran parte della giornata, come si evince dalla saturazione del sensore di umidità:

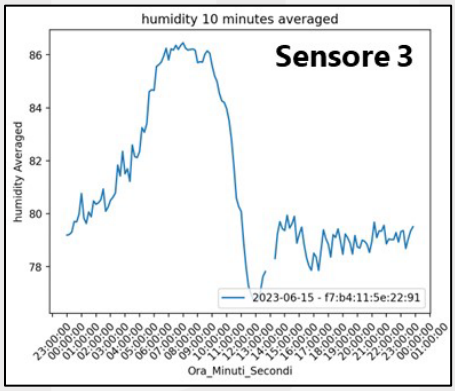


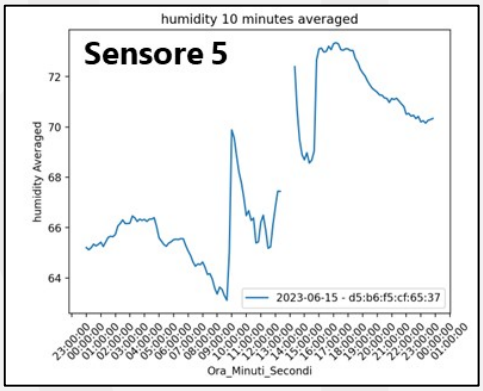
Di seguito si riportano le umidità percepite dei sensori **#5 #3** e **#2**

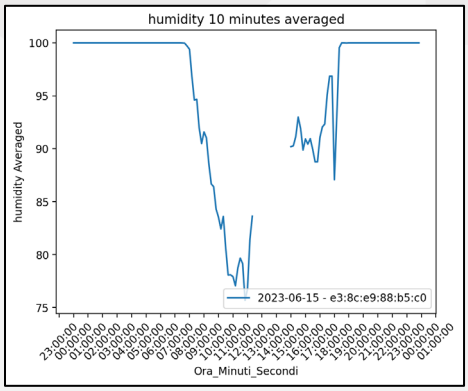
Sensore 2-3-5	15 Giugno 2023





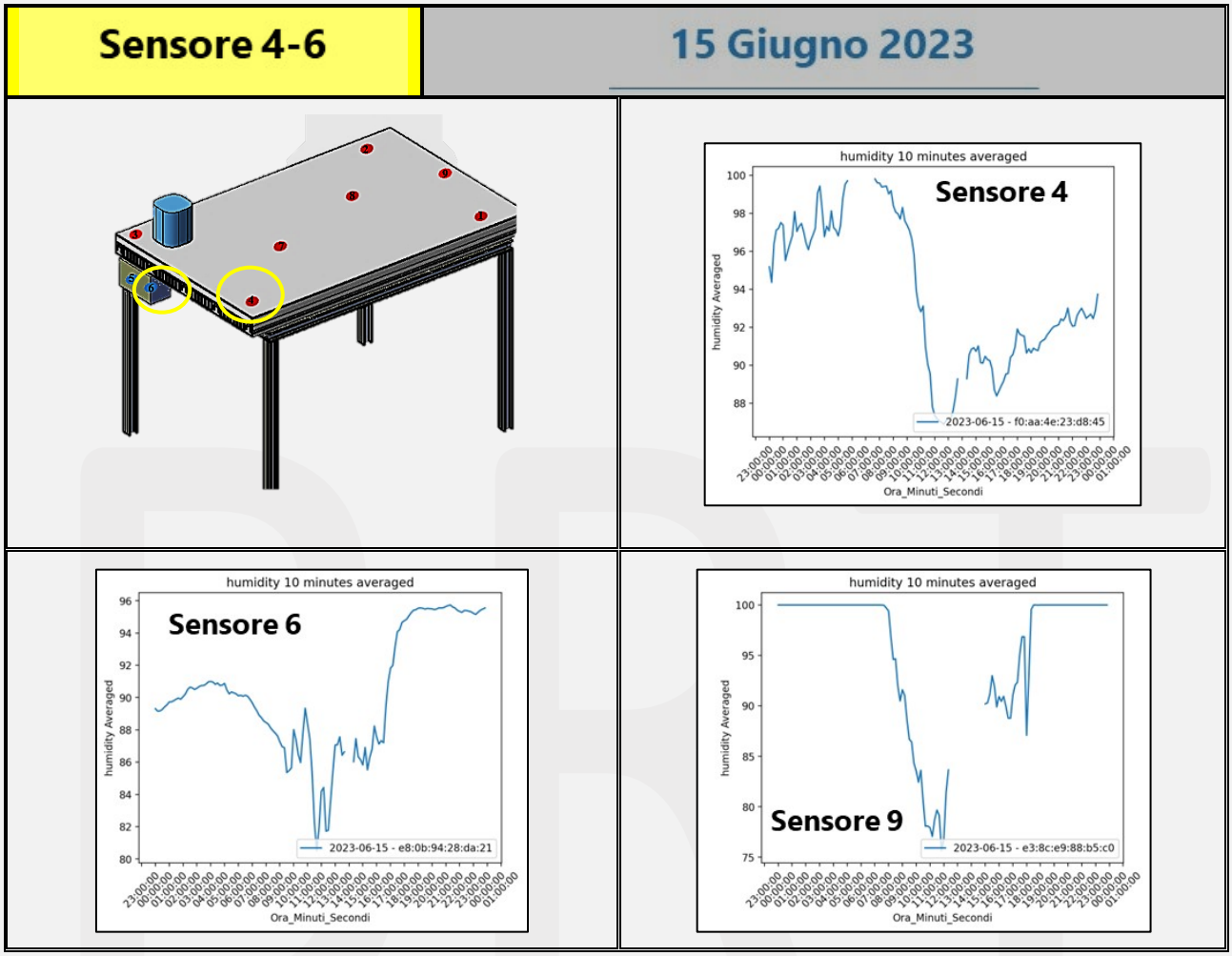






Essi non rilevano significativi cambiamenti di umidità, indicando l'assenza di infiltrazioni significative in quelle zone del solaio.

Invece i sensori **#6** e **#4** rilevano correttamente l'aumento della umidità:

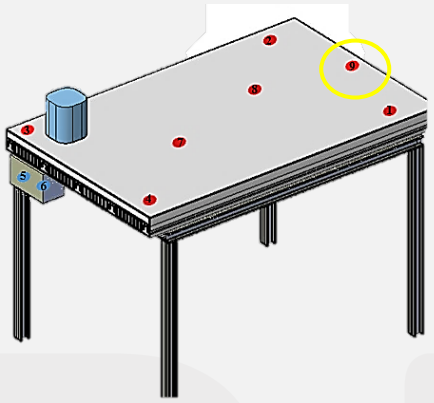


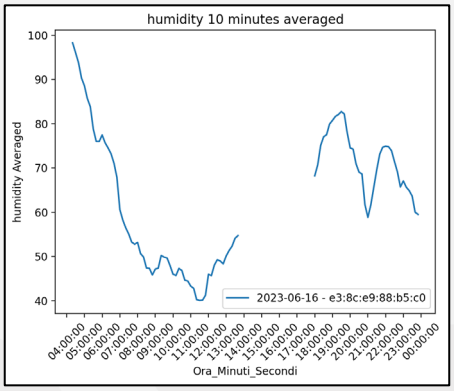
L'esperimento condotto in condizioni non controllate, con la pioggia che ha colpito l'intera superficie del solaio, ha permesso di osservare il comportamento dei sensori **#3**, **#5**, **#4** e **#6** durante l'infiltrazione, evidenziando le zone ammalorate della struttura.

6.1.1.2. Monitoraggio ambientale controllato (idrobox)

La sperimentazione successiva ha previsto la simulazione di una infiltrazione dovuta a una conduttura danneggiata, sfruttando la idro-box appositamente costruita. Il sensore **#9** è stato utilizzato come riferimento per le condizioni ambientali esterne.

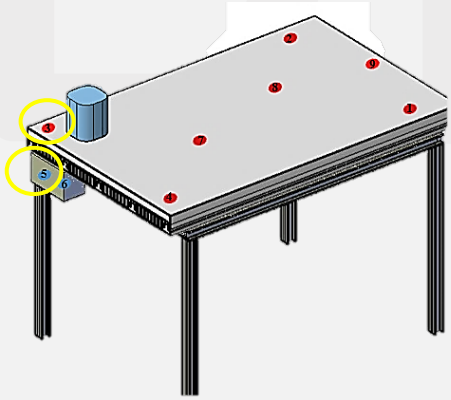
Sensore 9	16 Giugno 2023

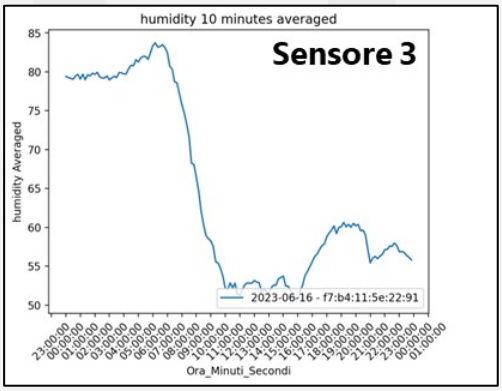


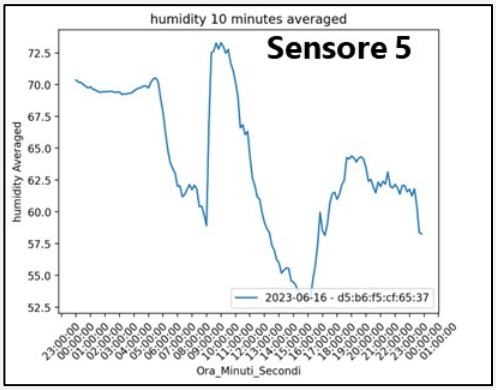


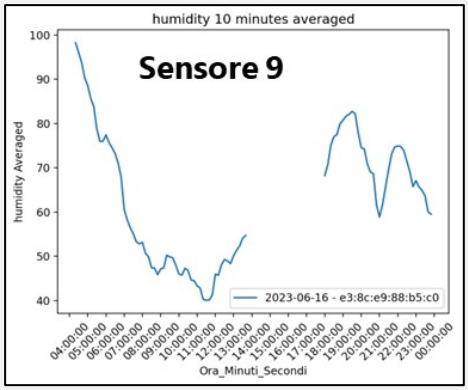
Come nei casi precedenti, si è notato un comportamento simile: i sensori **#3** e **#5** sono risultati immuni all'infiltrazione e hanno seguito l'andamento dell'umidità esterna, indicando l'assenza di ammaloramento nelle rispettive zone.

Sensore 3-5	16 Giugno 2023	INFILTRAZIONE CONTROLLATA



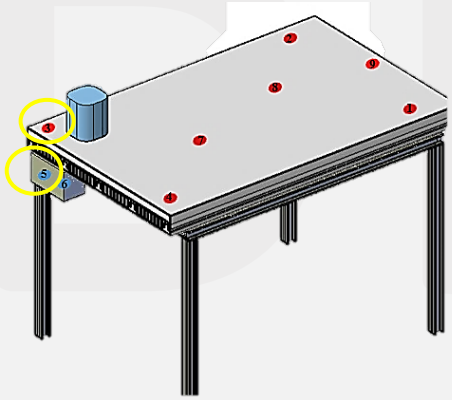


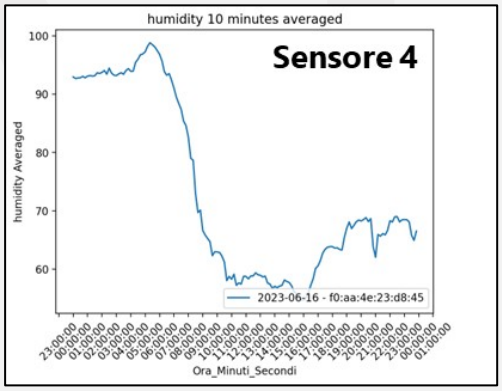


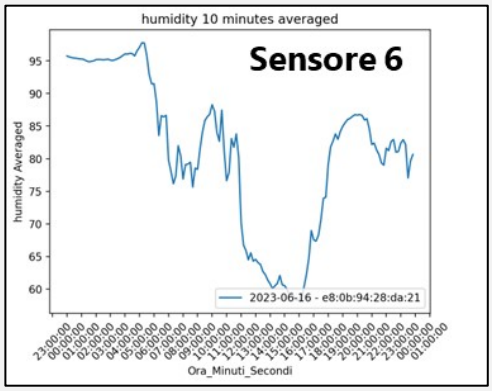


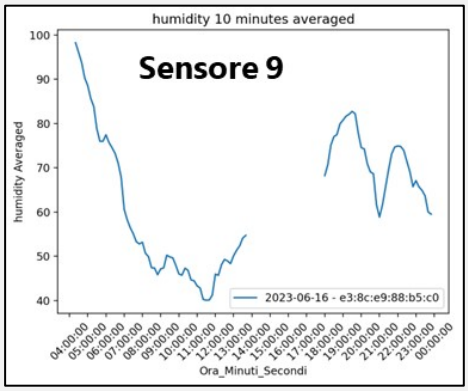
Al contrario, i sensori **#6** e **#4** hanno rilevato correttamente un aumento dell'umidità, evidenziando una zona di ammaloramento nelle loro vicinanze, successivamente verificata e confermata tramite ispezione visiva come dimostrano le foto in calce.

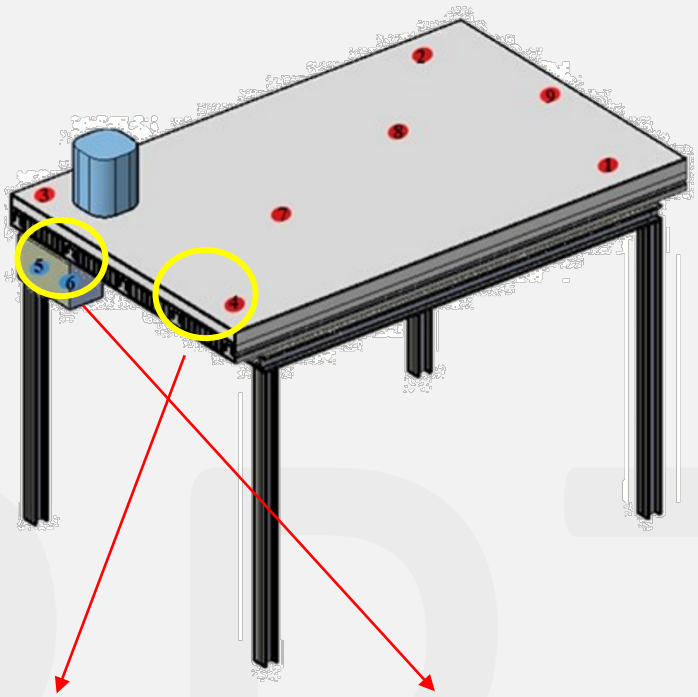
Sensore 4-6	16 Giugno 2023	INFILTRAZIONE CONTROLLATA











Intradosso solaio in prossimità del sensore 4

Intradosso solaio in prossimità del sensore 6

6.1.1.3. Risultanze monitoraggio ambientale

Questi risultati confermano una buona capacità dei sensori di umidità di rilevare con una accettabile precisione le variazioni delle condizioni ambientali e di identificare le zone di ammaloramento. È interessante notare che i sensori **#3** e **#5**, hanno fornito informazioni preziose per valutare la salute strutturale del solaio, evidenziando la mancanza di ammaloramento in quelle specifiche aree.

La combinazione di questi dati fornisce una visione dettagliata delle condizioni di ammaloramento e permette di prendere provvedimenti tempestivi per la manutenzione e la riparazione del solaio, contribuendo alla prevenzione di potenziali danni strutturali.

È importante considerare che tali sensori possono essere influenzati da fattori come la temperatura, la ventilazione, la presenza di altre fonti di umidità e altri parametri ambientali, in quanto la struttura (solaio+controsoffitto) non è a chiusura stagna e quindi soggetto comunque ai fenomeni ambientali esterni. Questi fattori possono ridurre la sensibilità dei sensori di umidità e rendere più complessa l'interpretazione dei dati provenienti da essi.

6.1.2. Monitoraggio vibromeccanico

Tuttavia, è altrettanto importante sottolineare i notevoli risultati ottenuti dalla rete dotata di sensori accelerometrici e giroscopici. Questi sensori hanno dimostrato un'accuratezza elevata e una sensibilità eccellente nel rilevare le cadute di piccoli pezzi di intonaco dal solaio ammalorato.

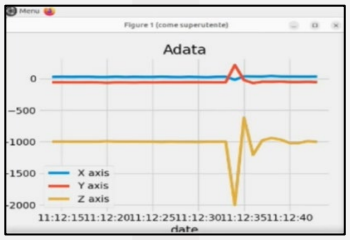
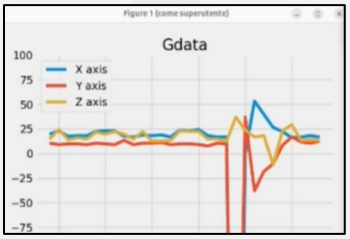
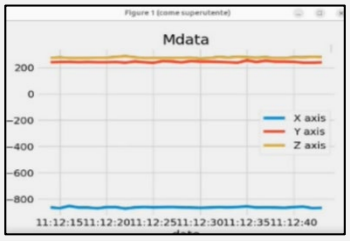
Grazie alla loro capacità di rilevare anche oggetti di dimensioni ridotte, come evidenziato nei grafici di seguito mostrati, questi sensori sono stati in grado di fornire informazioni dettagliate sugli istanti di caduta e sulle vibrazioni associate.

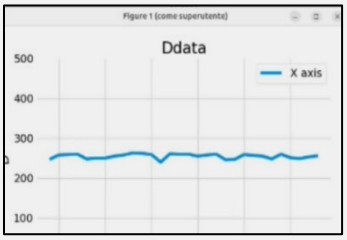
L'utilizzo combinato dei sensori giroscopici, accelerometrici e magnetometrici permette quindi di ottenere una valutazione accurata dei fenomeni di sfondellamento e caduta di pezzi dal solaio

ammalorato. Questi strumenti offrono una soluzione efficace per monitorare e prevenire potenziali danni strutturali, fornendo informazioni preziose per l'analisi e la manutenzione del solaio.

6.1.2.1. Monitoraggio vibromeccanico controllato

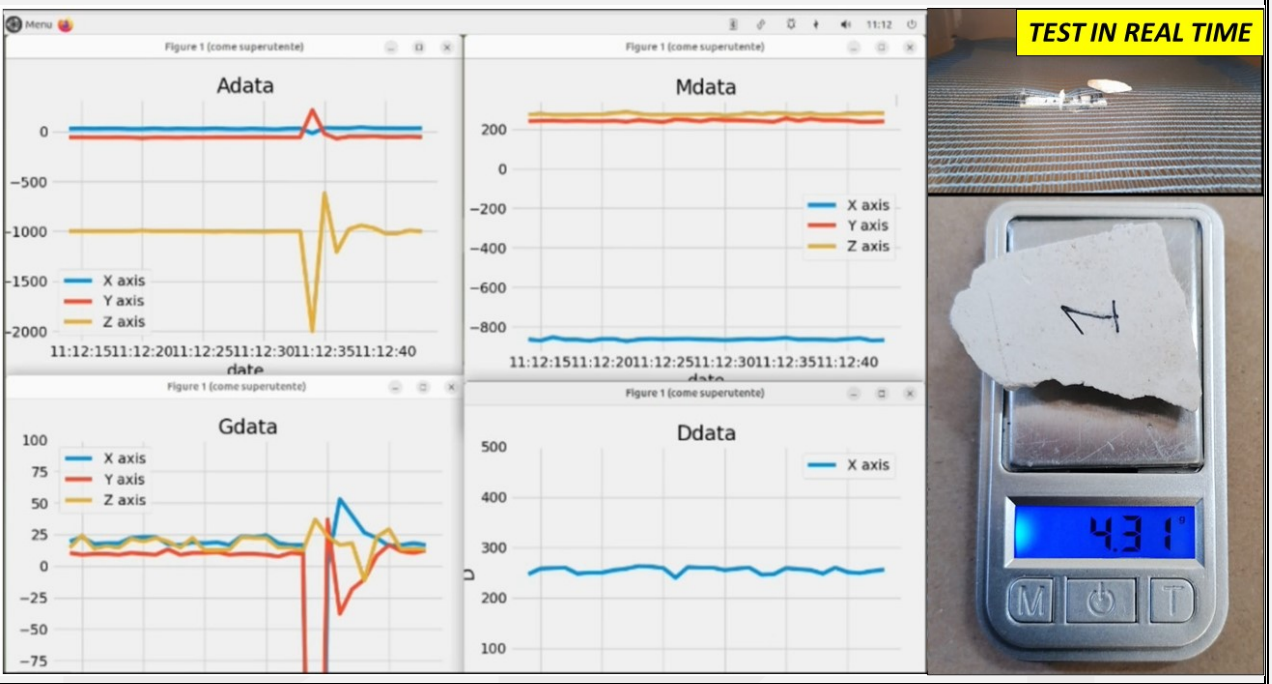
Gli esperimenti condotti riguardano la caduta "controllata" di materiale campione. La sperimentazione eseguita, con sassi di varia pezzatura, ha consentito di ottenere informazioni dettagliate sugli istanti di caduta, sulle vibrazioni associate, sulla definizione delle soglie di "alert", permettendo lo sviluppo di un applicativo di allarmistica automatizzata al superamento di soglie preimpostate.

Sensore	Unità di misura	Interfaccia web
Adata (Accelerometro);	milligravity (mg) X: mg Y: mg Z: mg	
Gdata (Giroscopio);	"degree per second" (dps) X: dps Y: dps Z: dps	
Mdata (Magnetometro);	milliGauss (mGa) X: mGa Y: mGa Z: mGa	

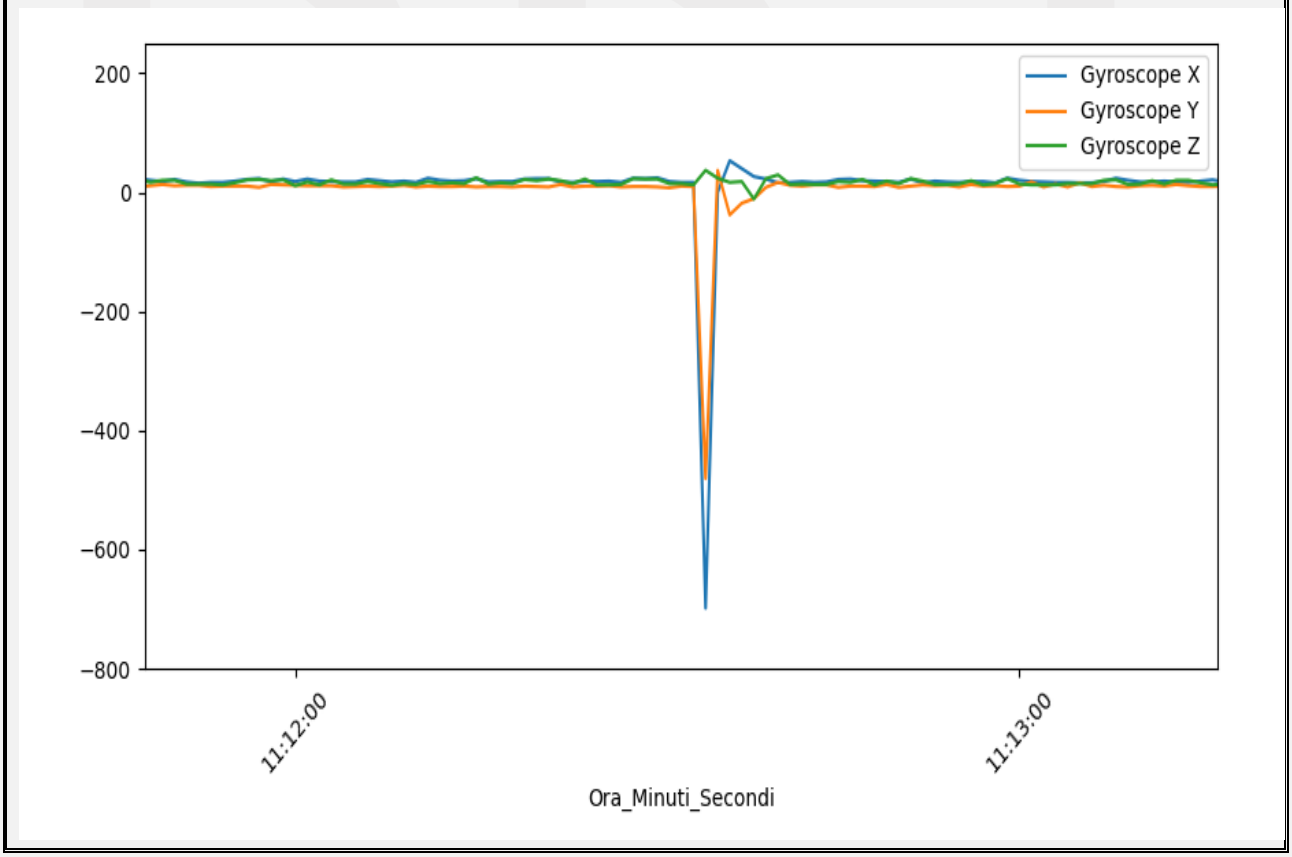
Ddata (Time of Flight, Distanziometro).	millimetri (mm) X: mm	

Di seguito si elevano una serie di test, condotti durante la fase di sperimentazione in laboratorio:

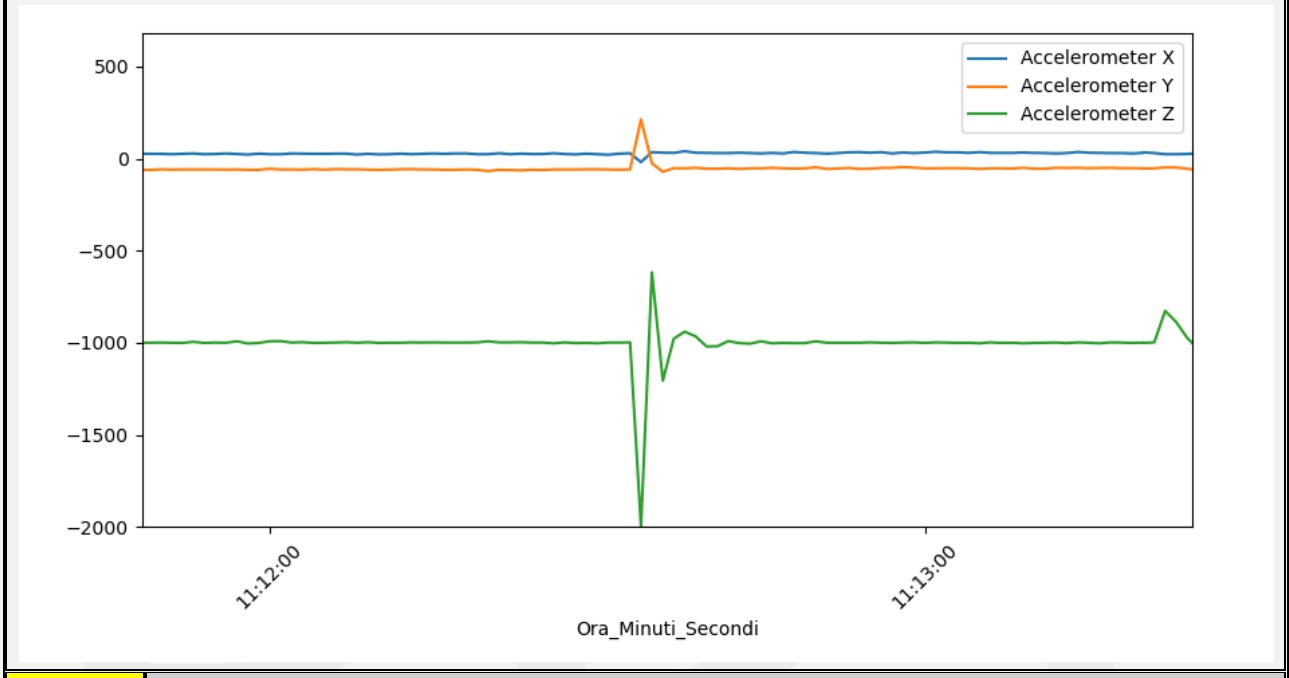
1	TEST N. 1	h =10 cm	p=4,31 gr



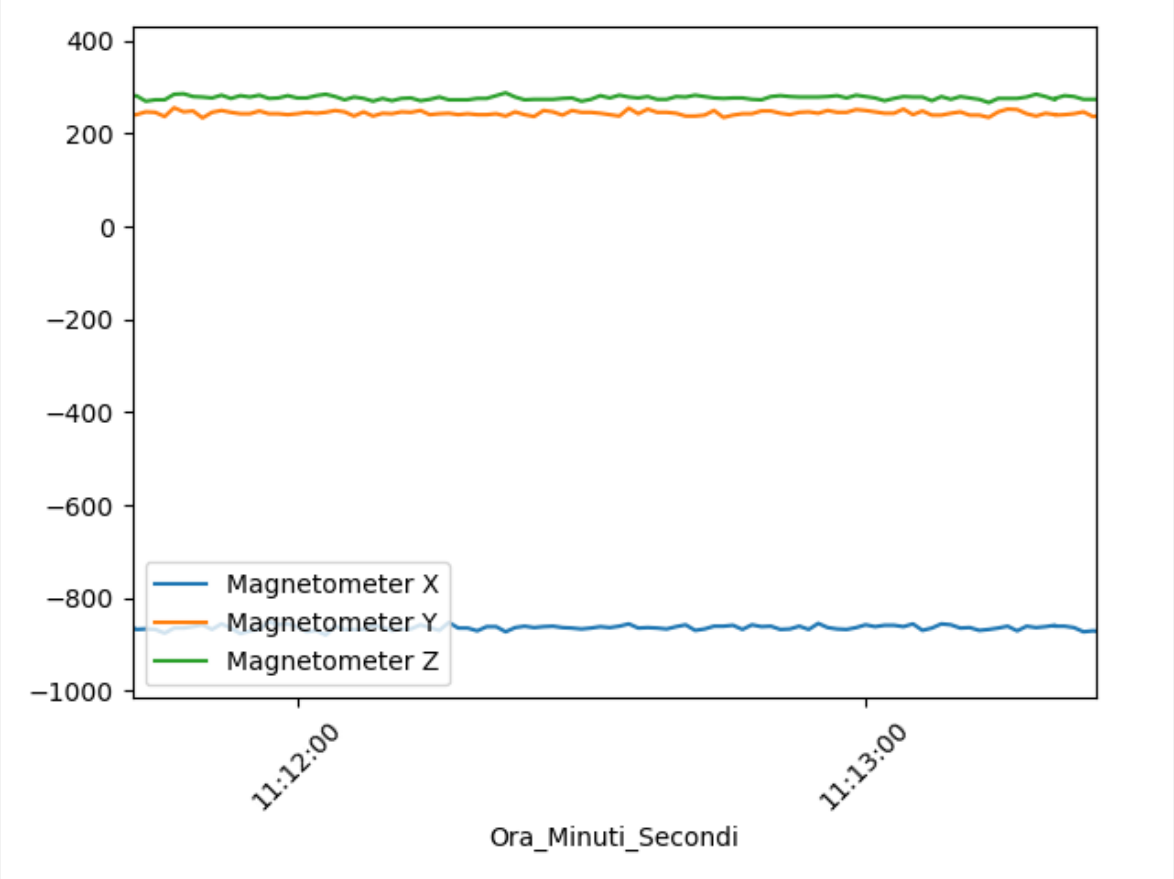
1	GIROSCOPIO



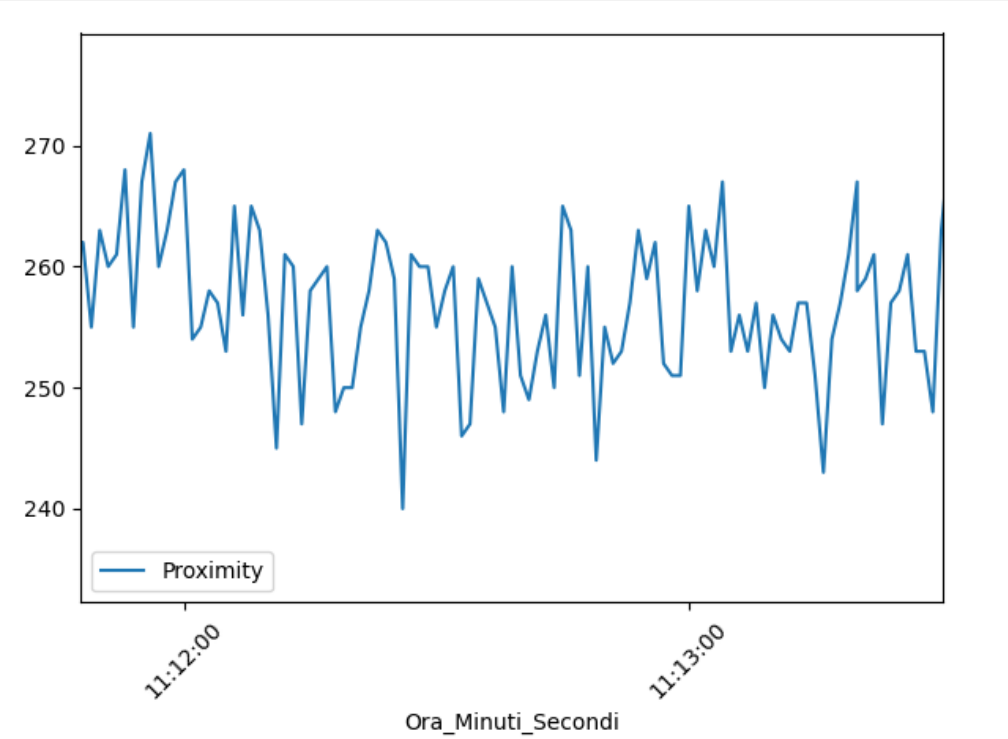
1	ACCELEROMETRO



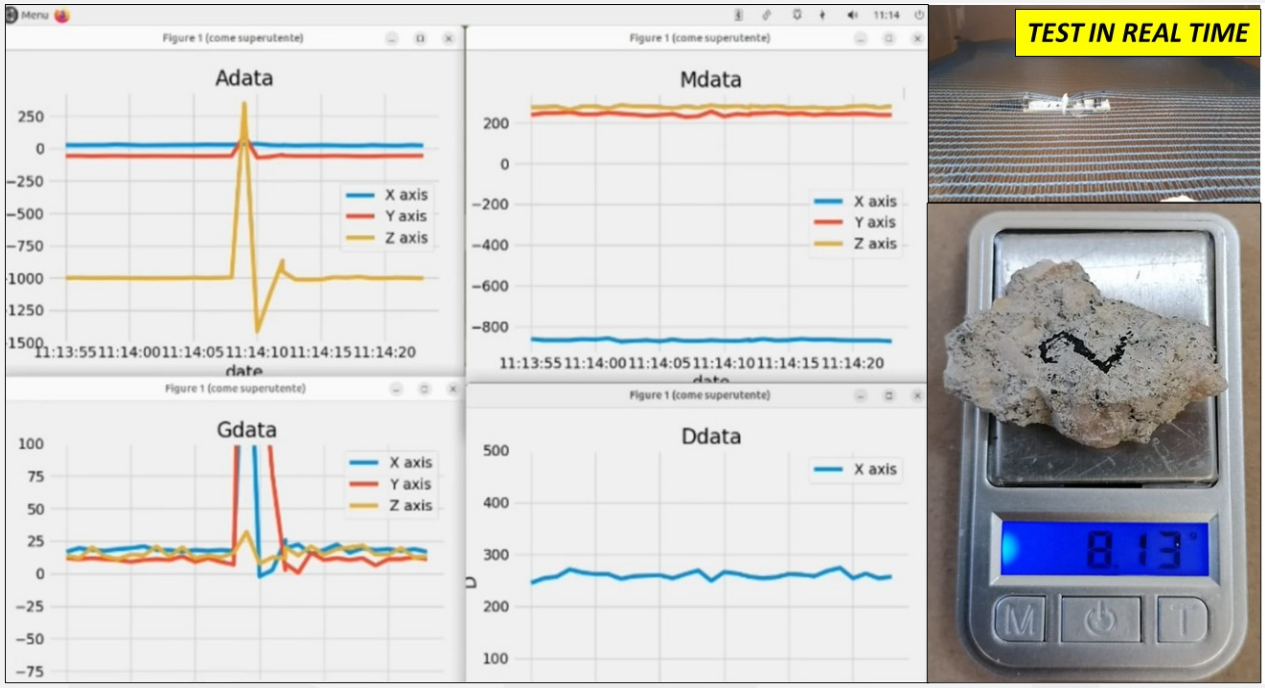
1	MAGNETOMETRO



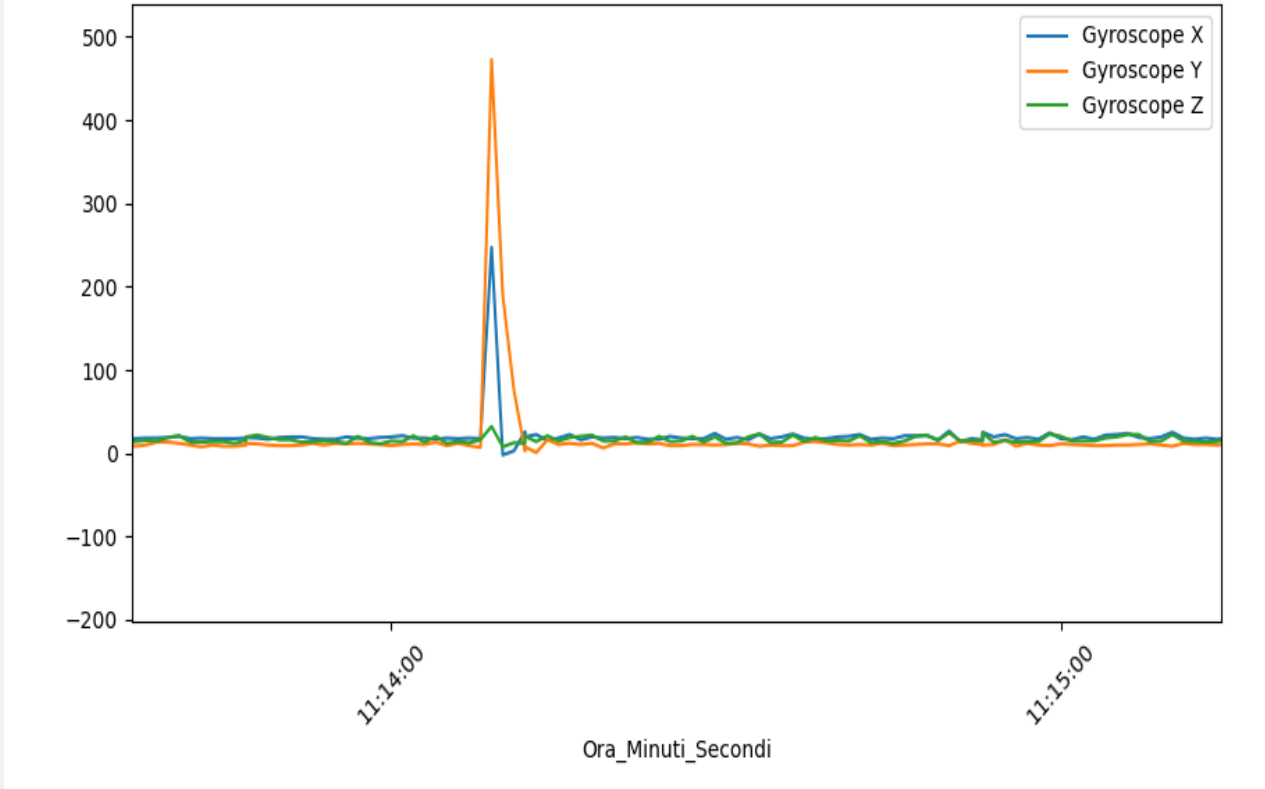
1	TOF



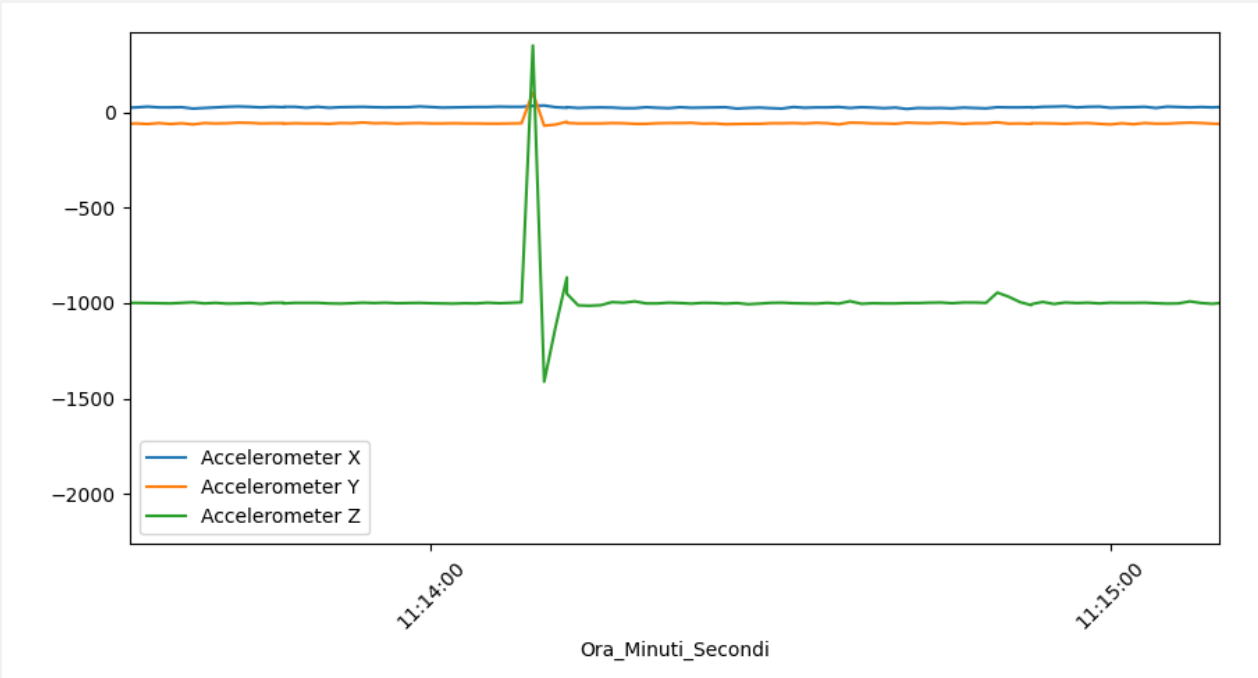
2	TEST N. 2	h =10 cm	p=8,13 gr



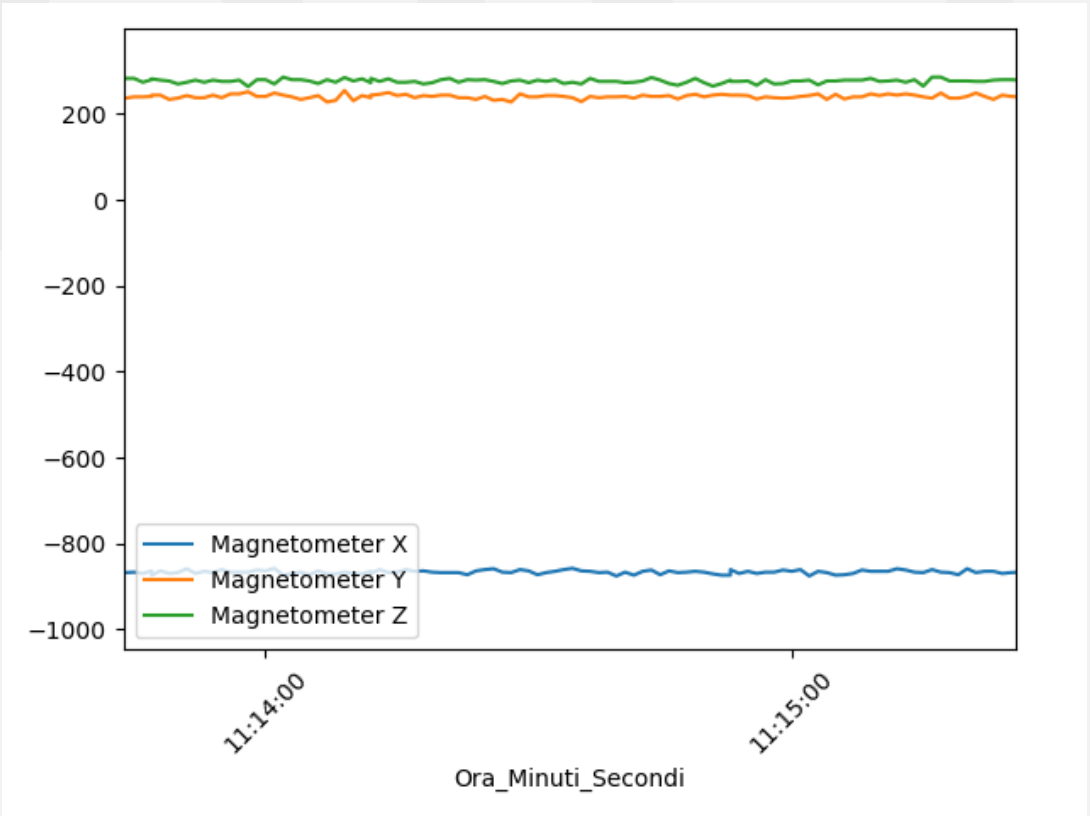
2	GIROSCOPIO



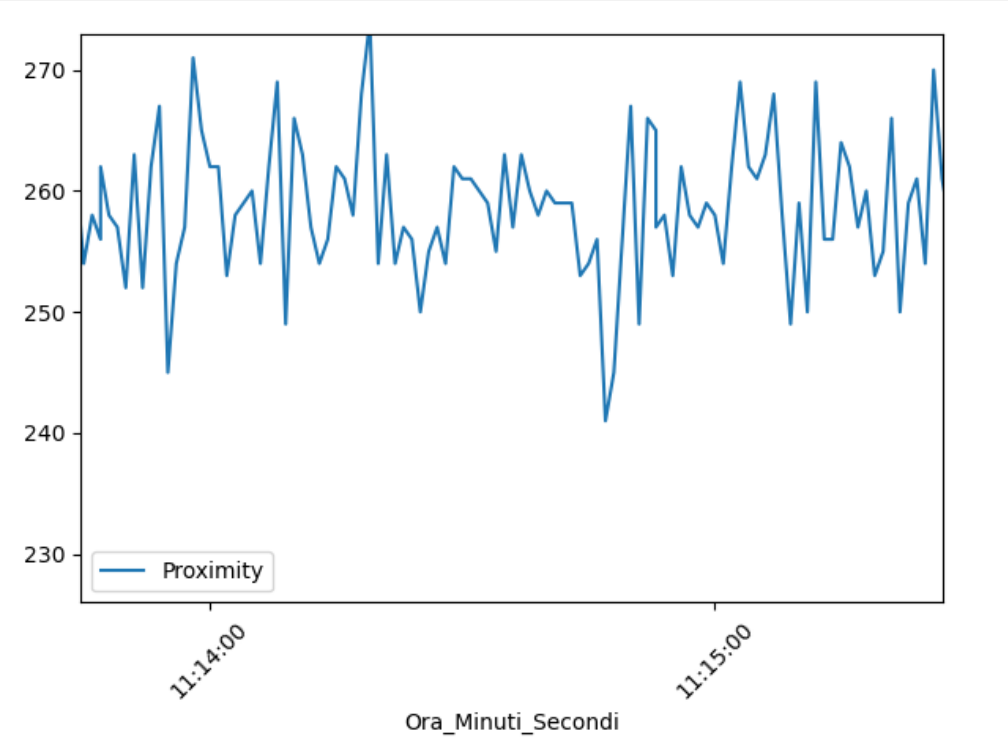
2	ACCELEROMETRO



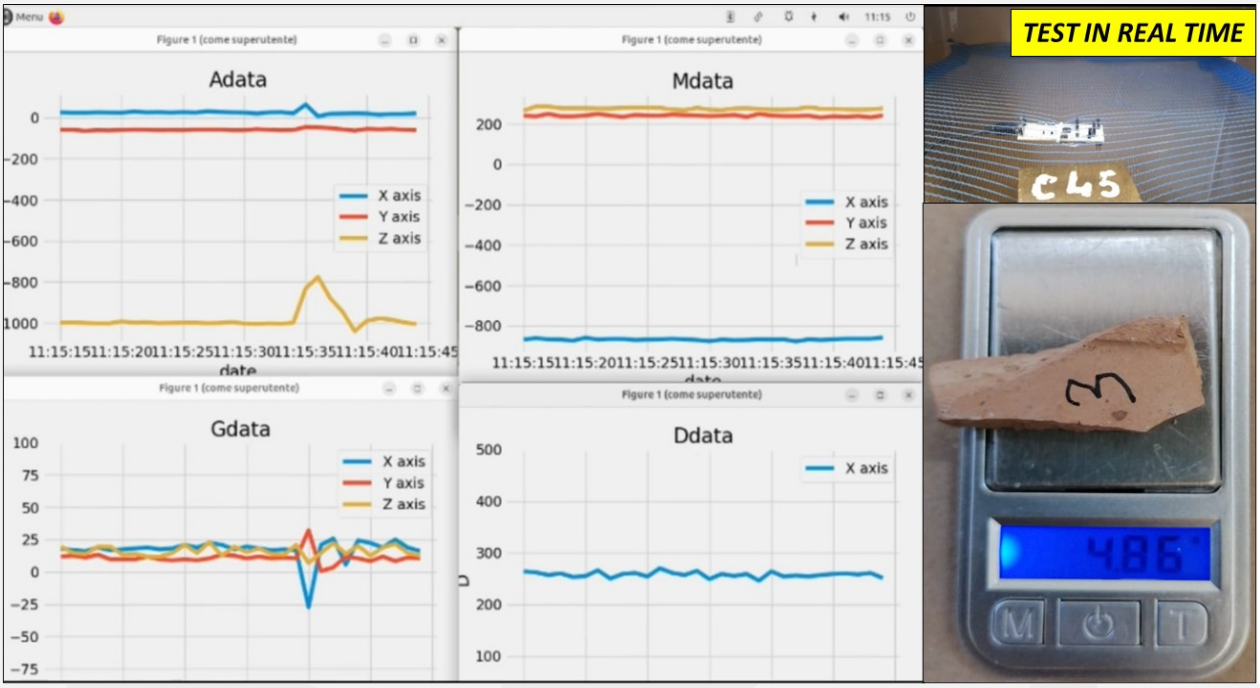
2	MAGNETOMETRO



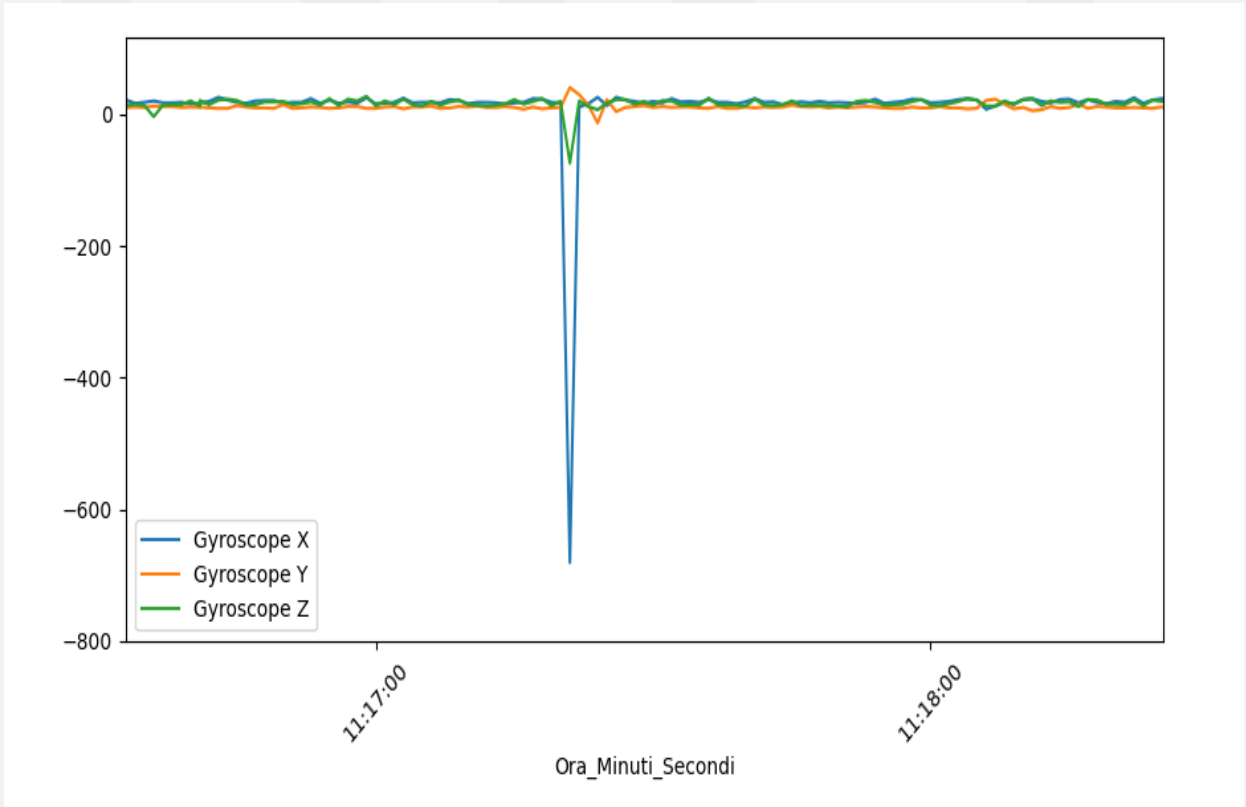
2	TOF


270
260
250
240
230
Proximity
11:14:00
11:15:00
Ora_Minuti_Secondi

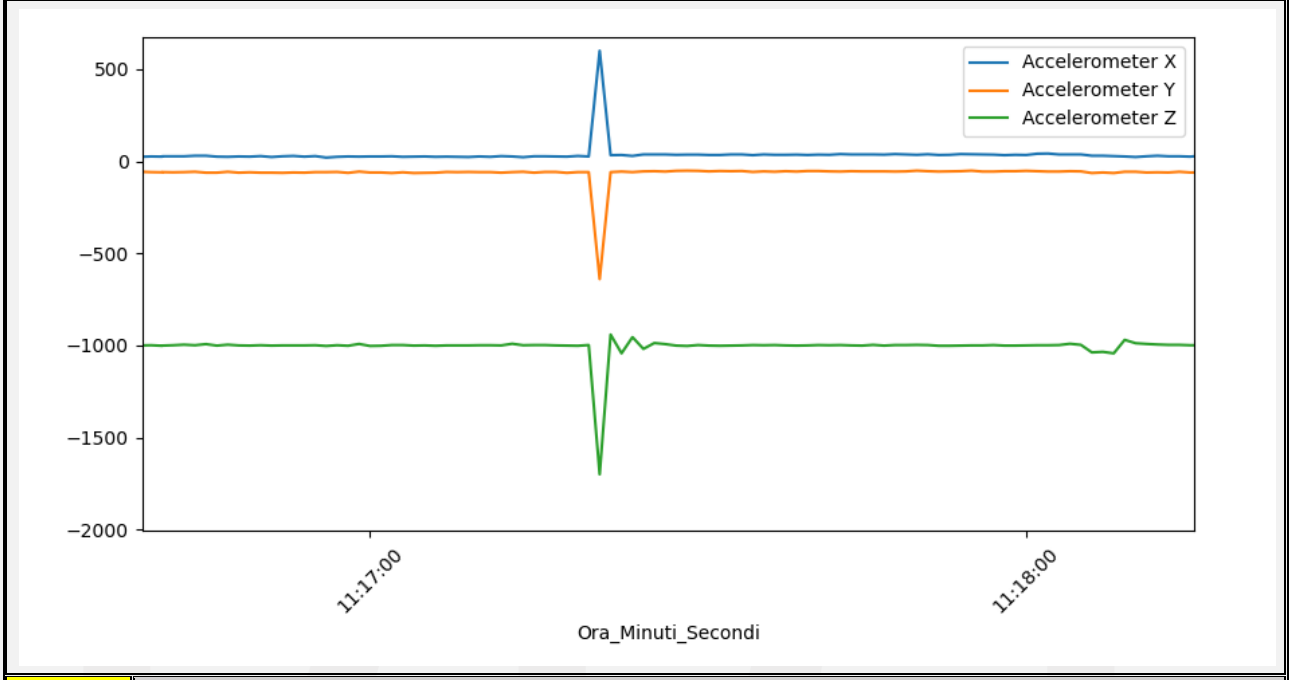
3	TEST N. 3	h =10 cm	p=4,86 gr



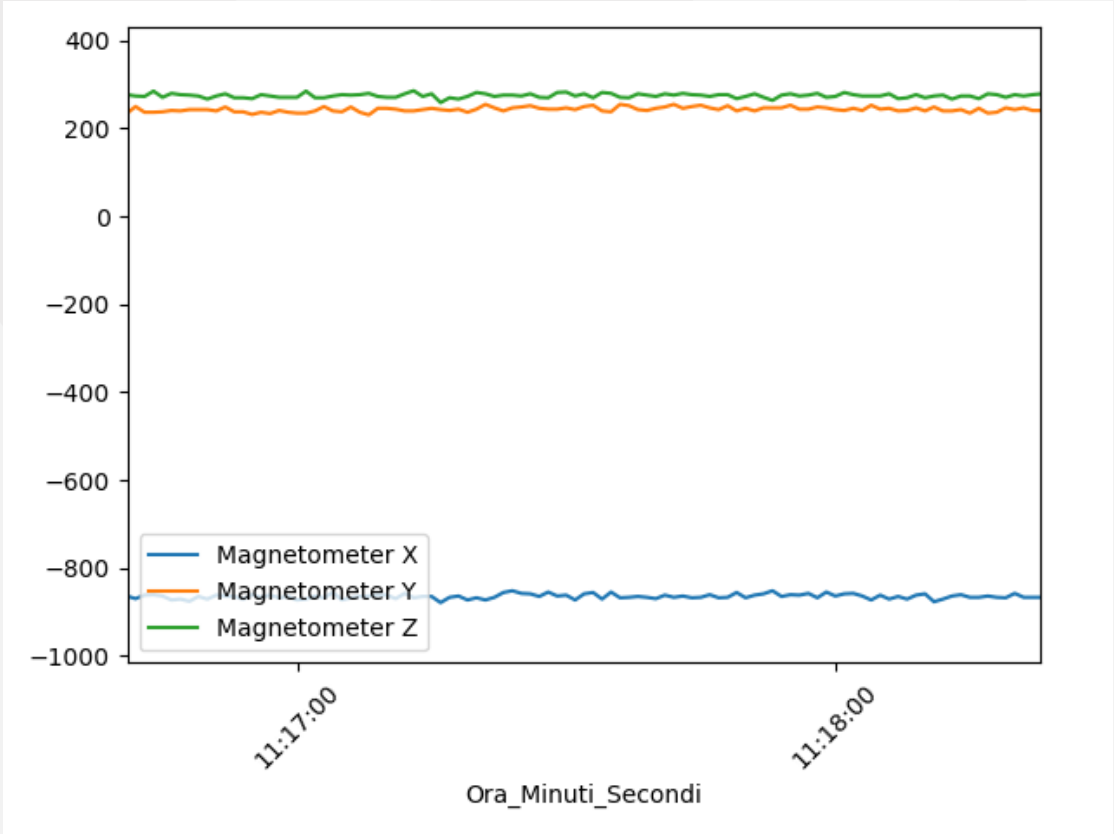
3	GIROSCOPIO



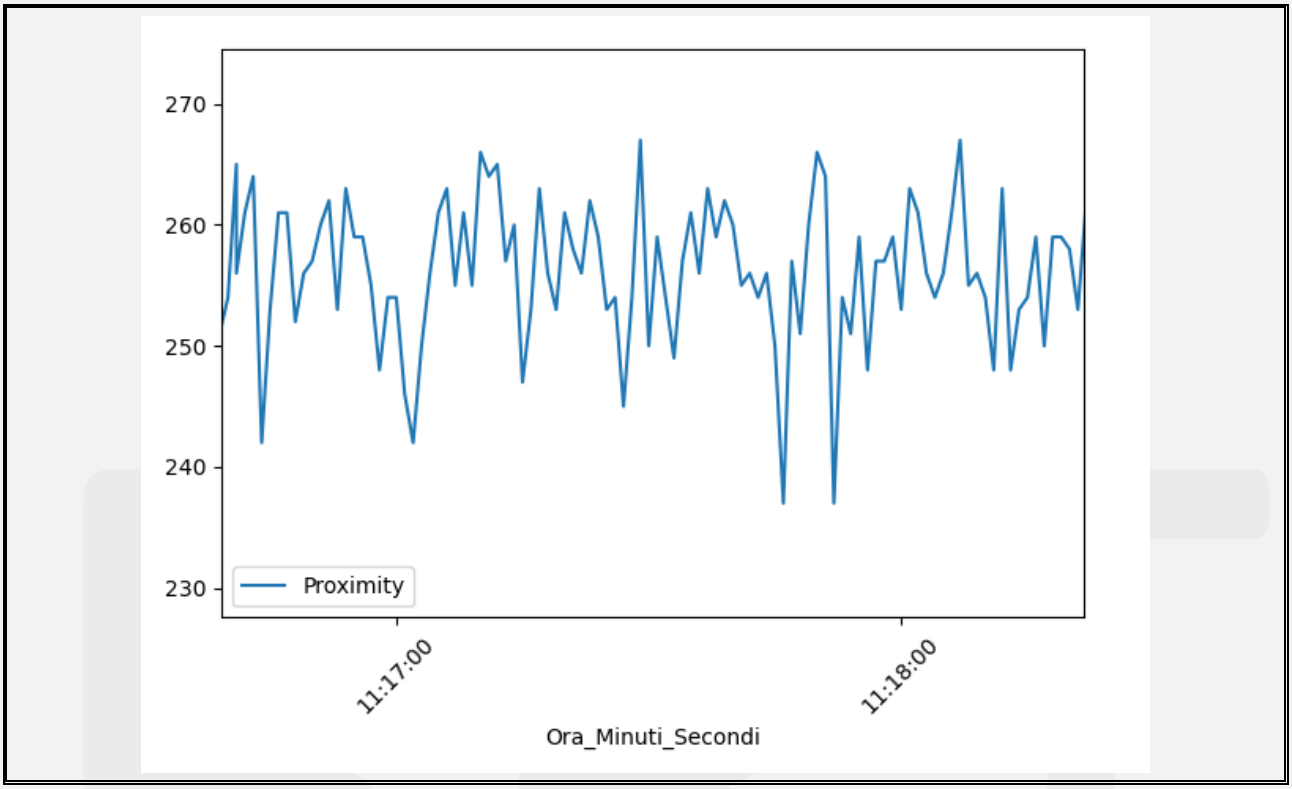
3	ACCELEROMETRO



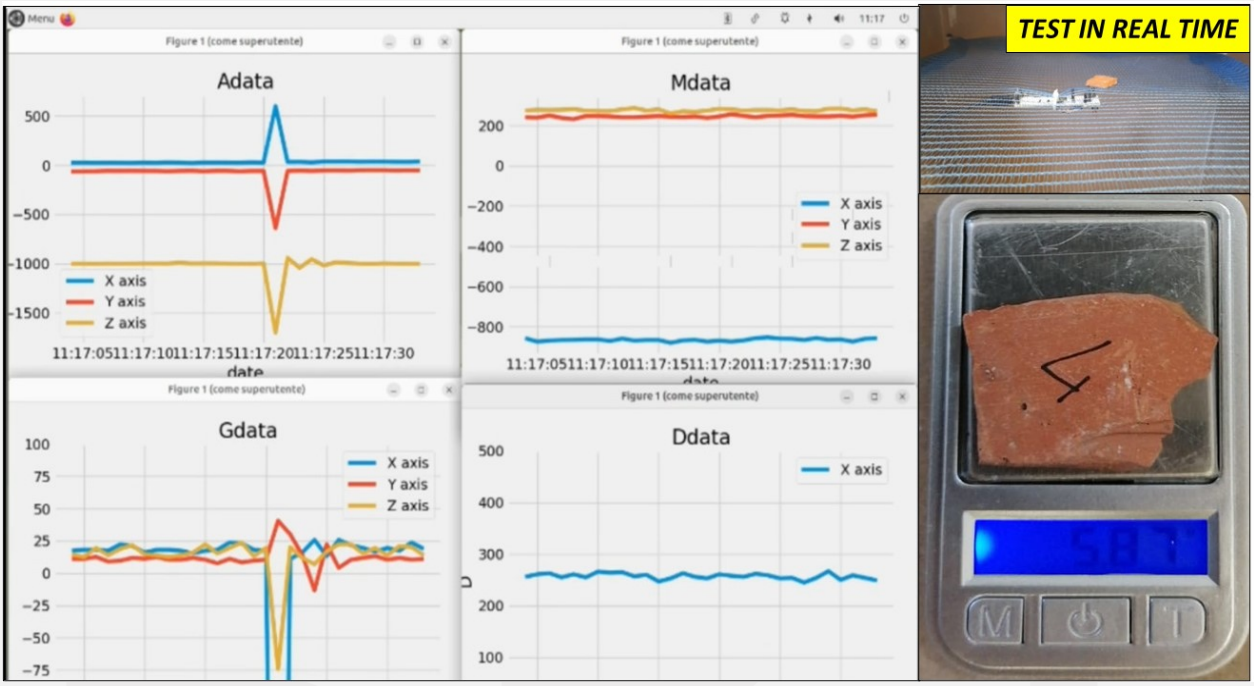
3	MAGNETOMETRO



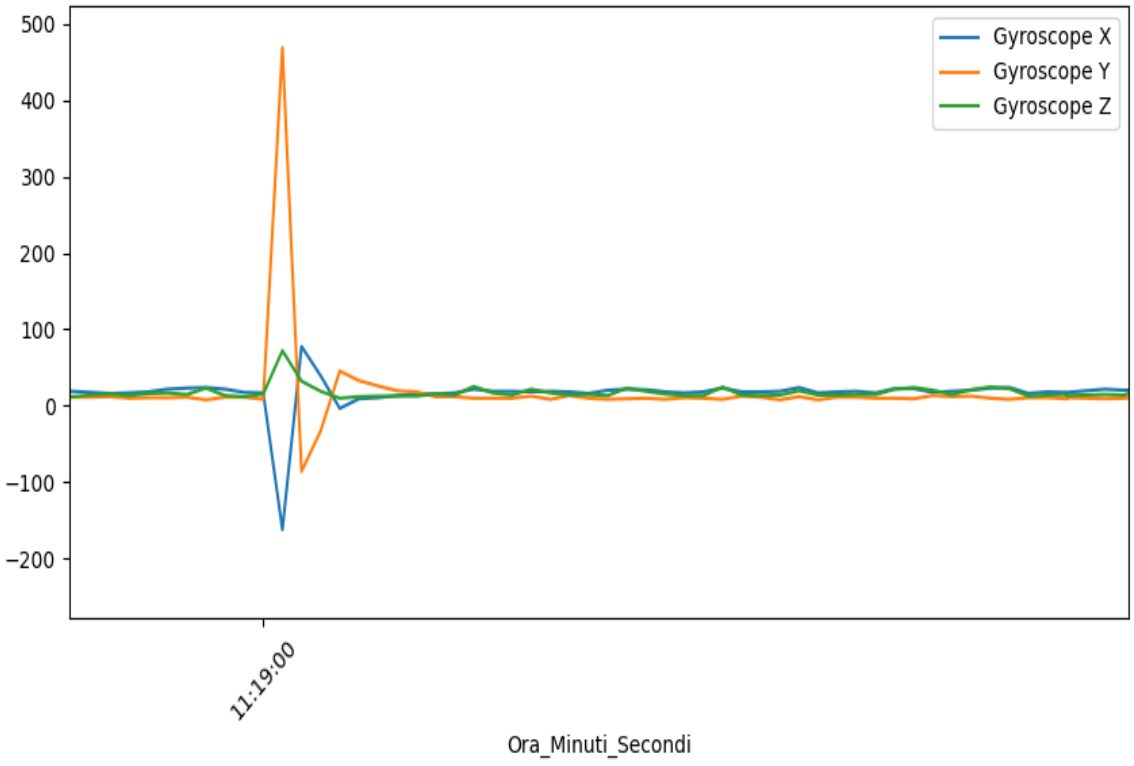
3	TOF


270
260
250
240
230
Proximity
11:17:00
11:18:00
Ora_Minuti_Secondi

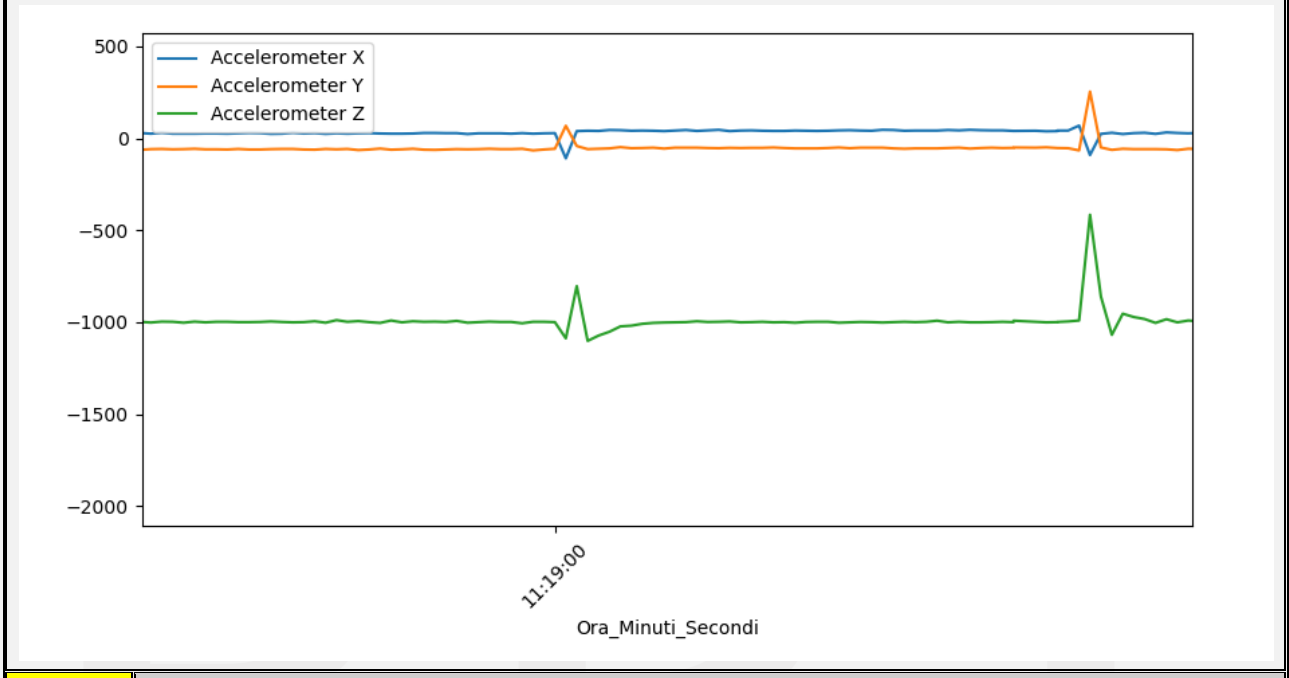
4	TEST N. 4	h =10 cm	p=5,87 gr



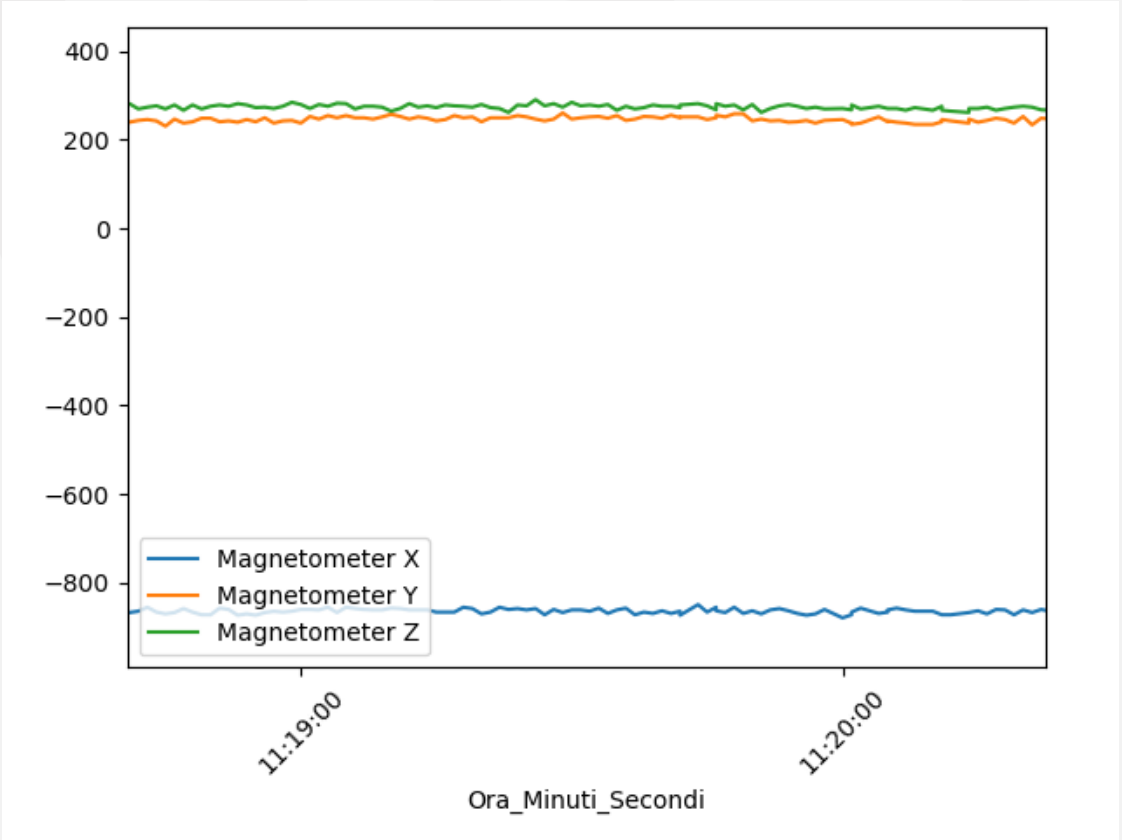
4	GIROSCOPIO



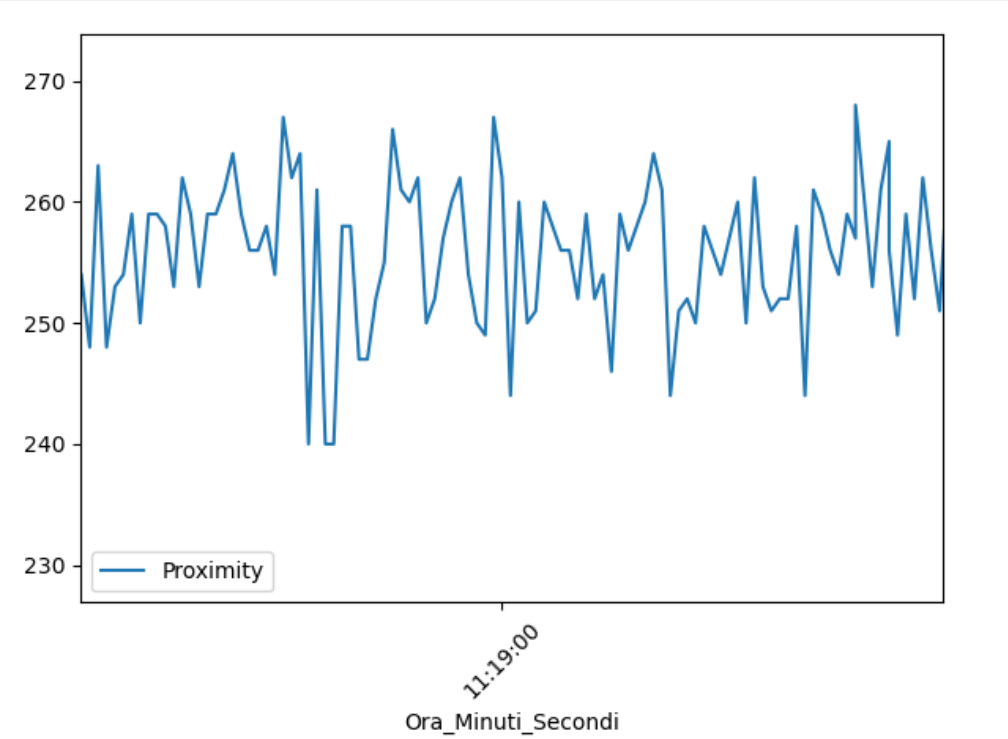
4	ACCELEROMETRO



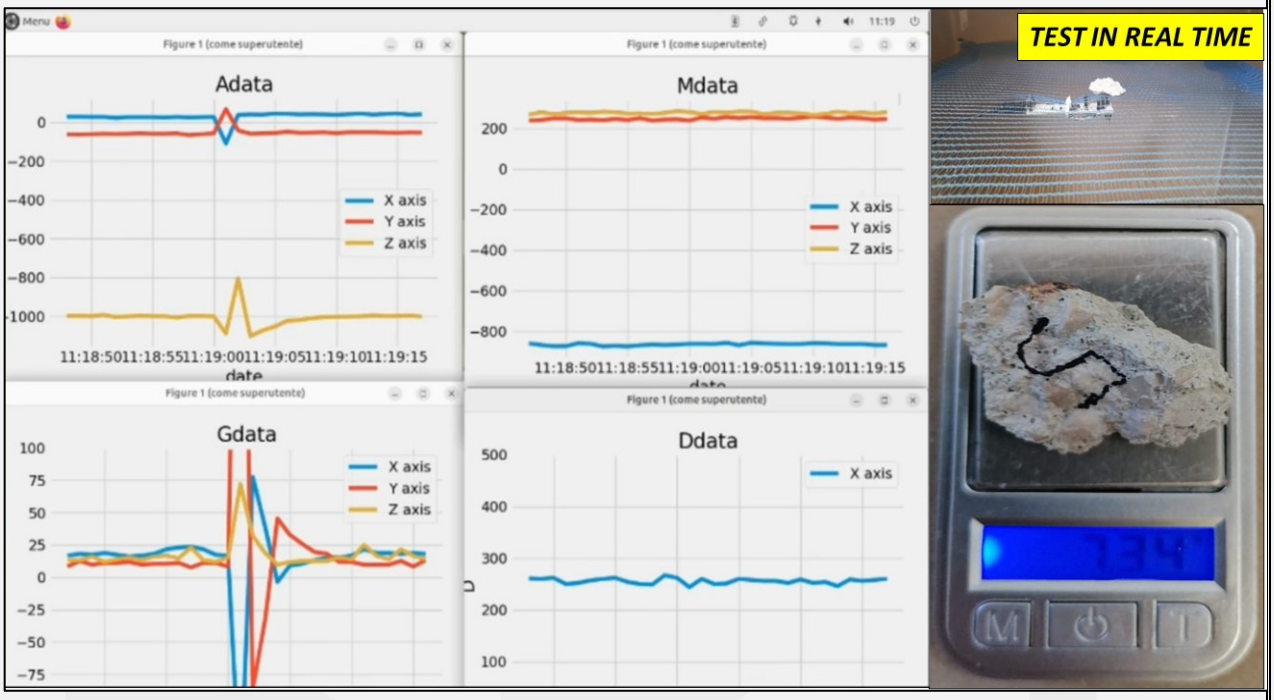
4	MAGNETOMETRO



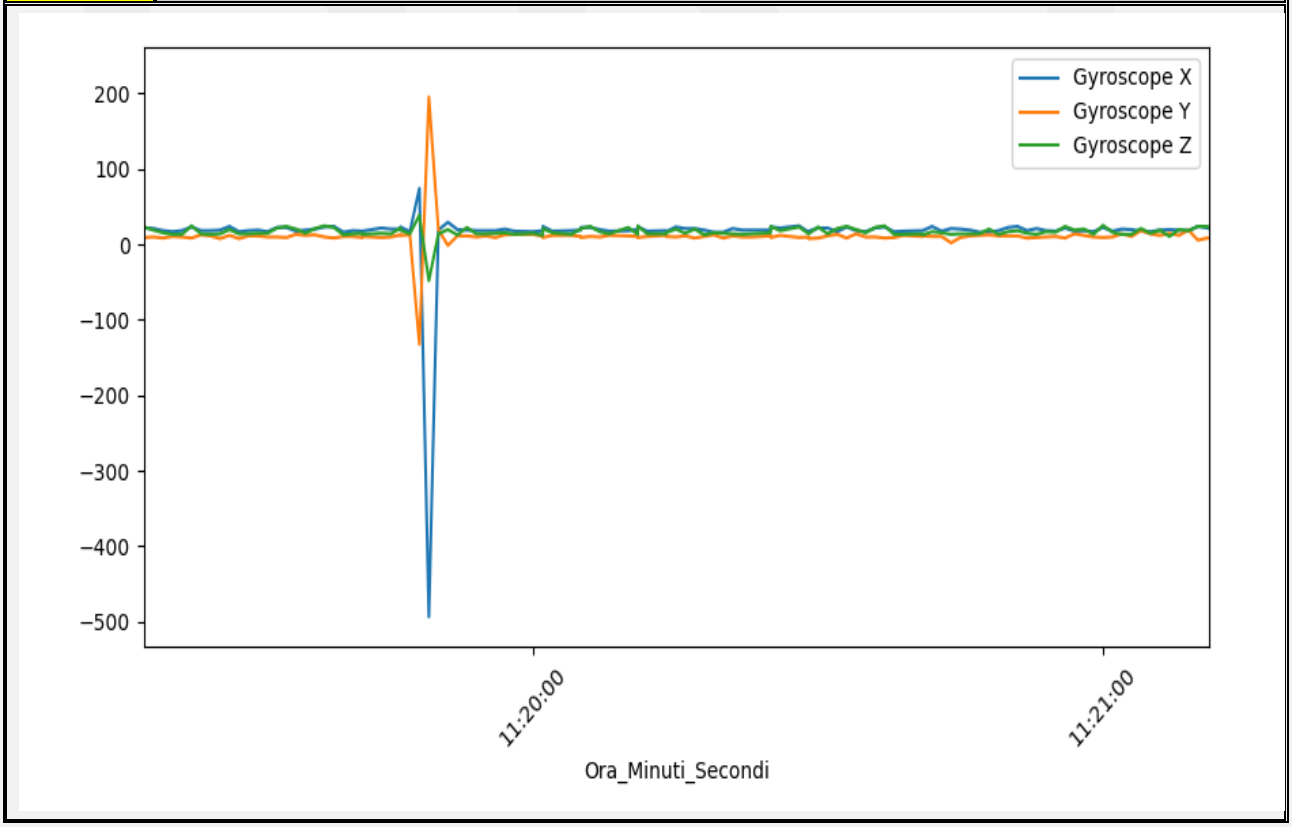
4	TOF



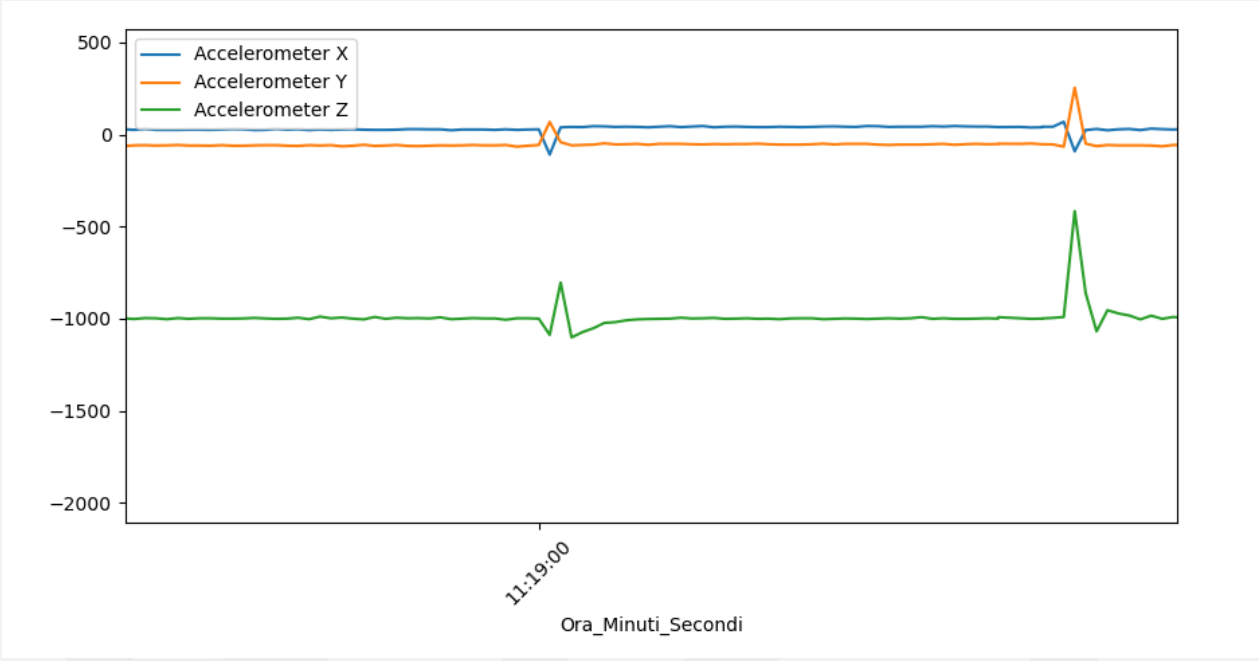
5	TEST N. 5	h =10 cm	p=7,34 gr



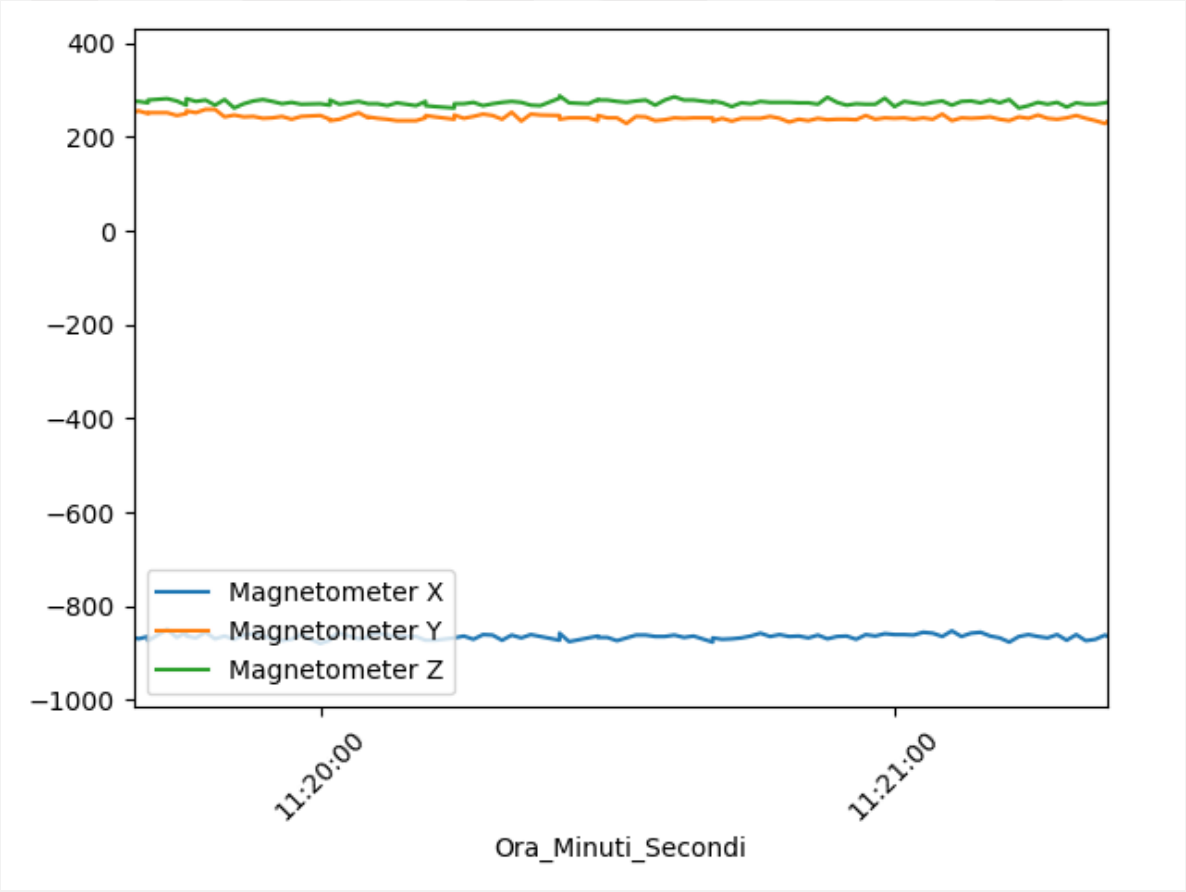
5	GIROSCOPIO



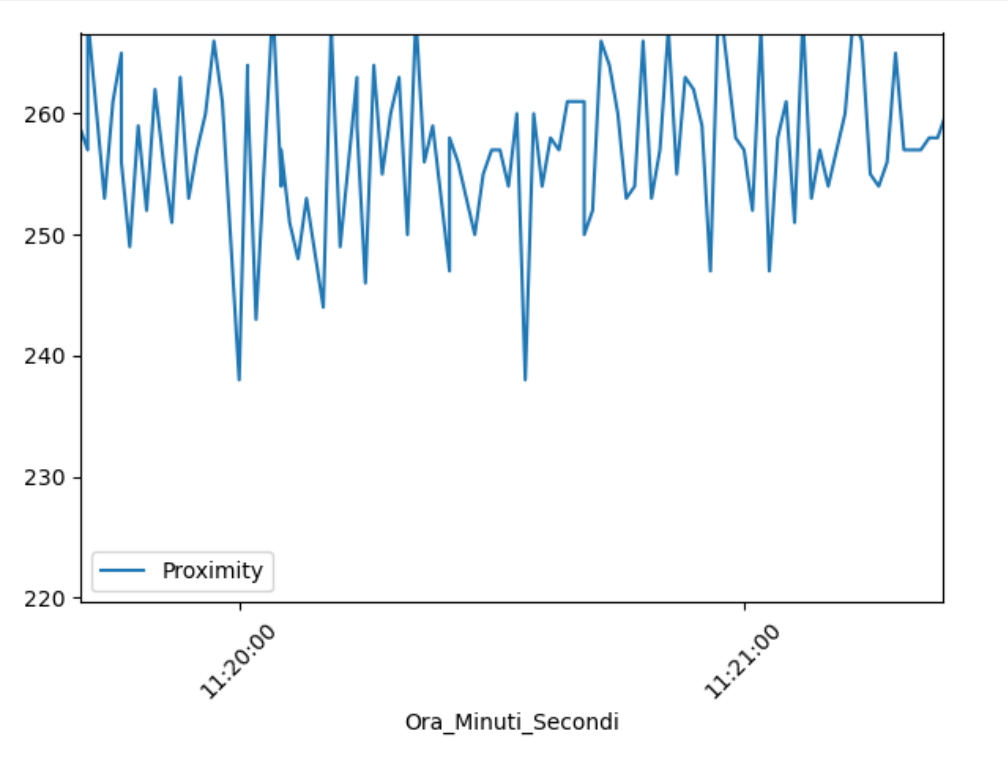
5	ACCELEROMETRO



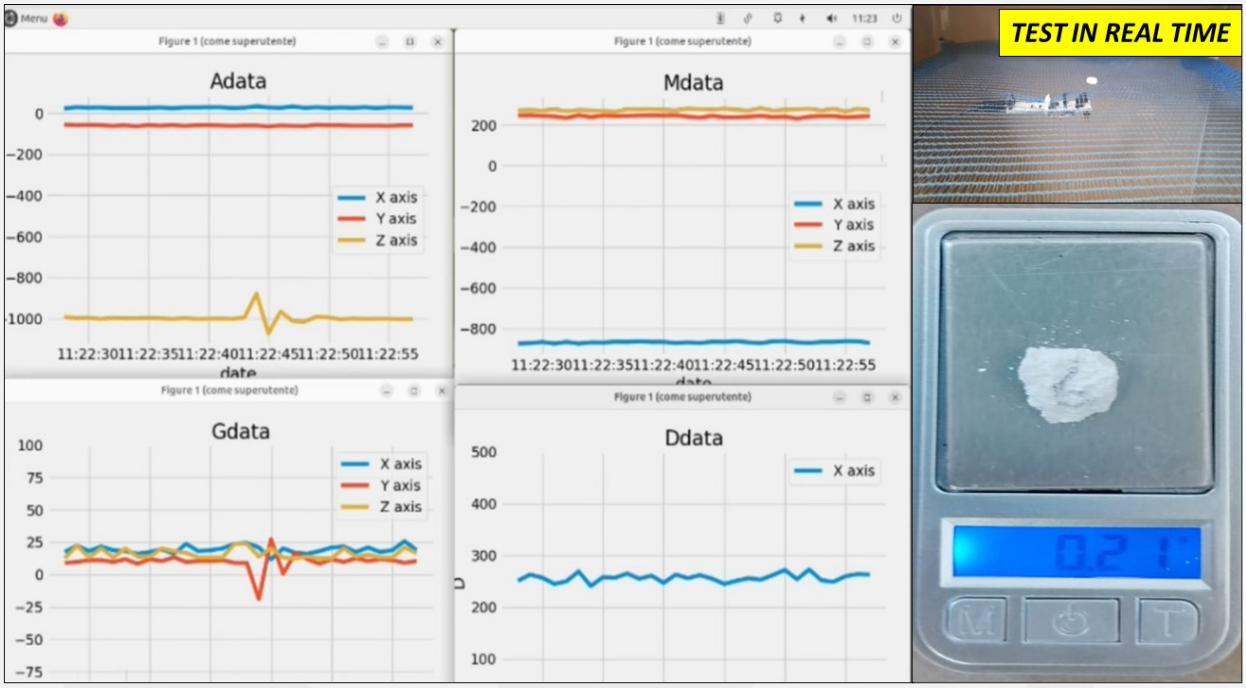
5	MAGNETOMETRO



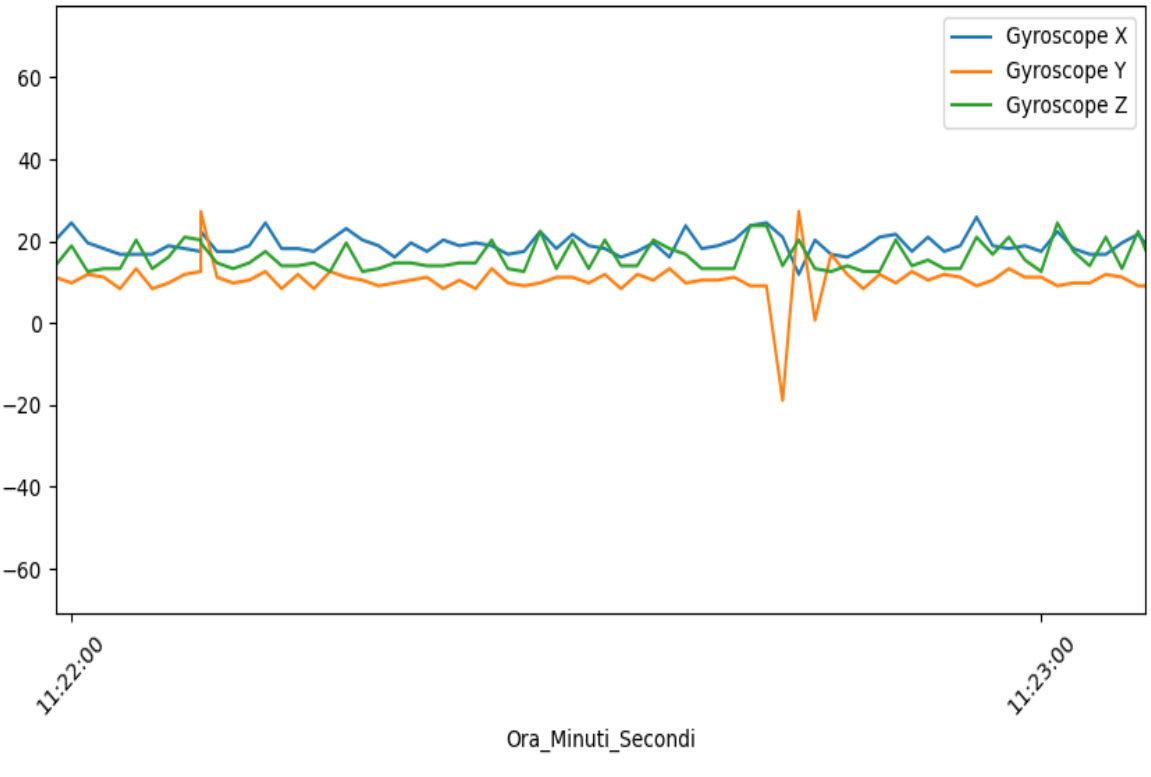
5	TOF


260
250
240
230
220
Proximity
11:20:00
11:21:00
Ora_Minuti_Secondi

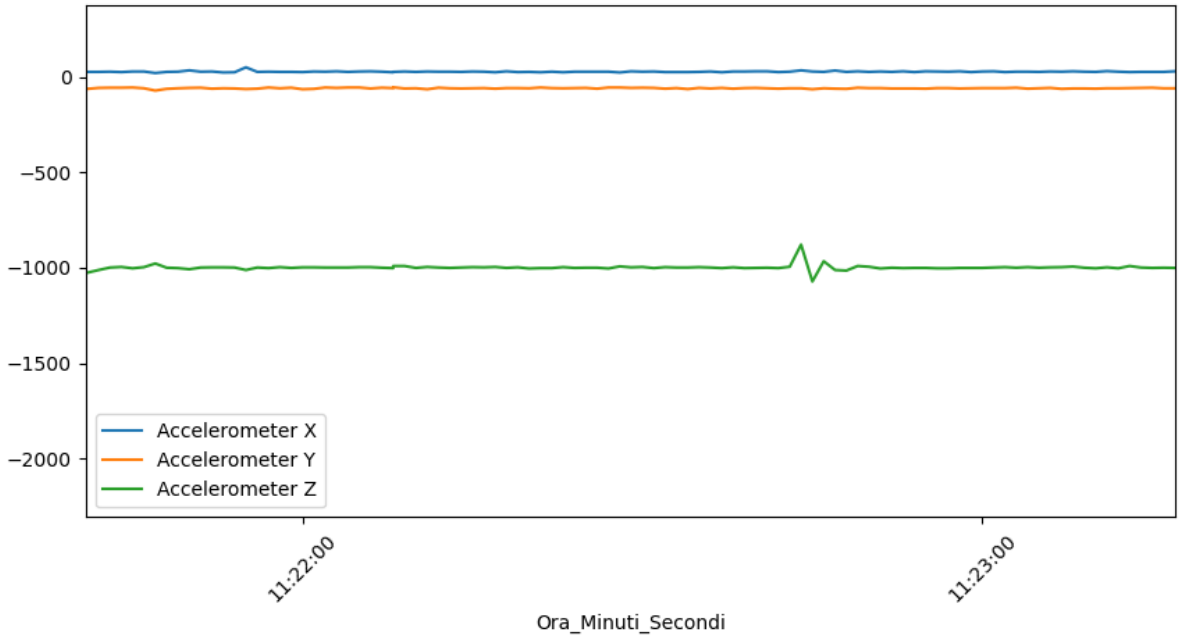
6	TEST N. 6	h =10 cm	p=0,21 gr



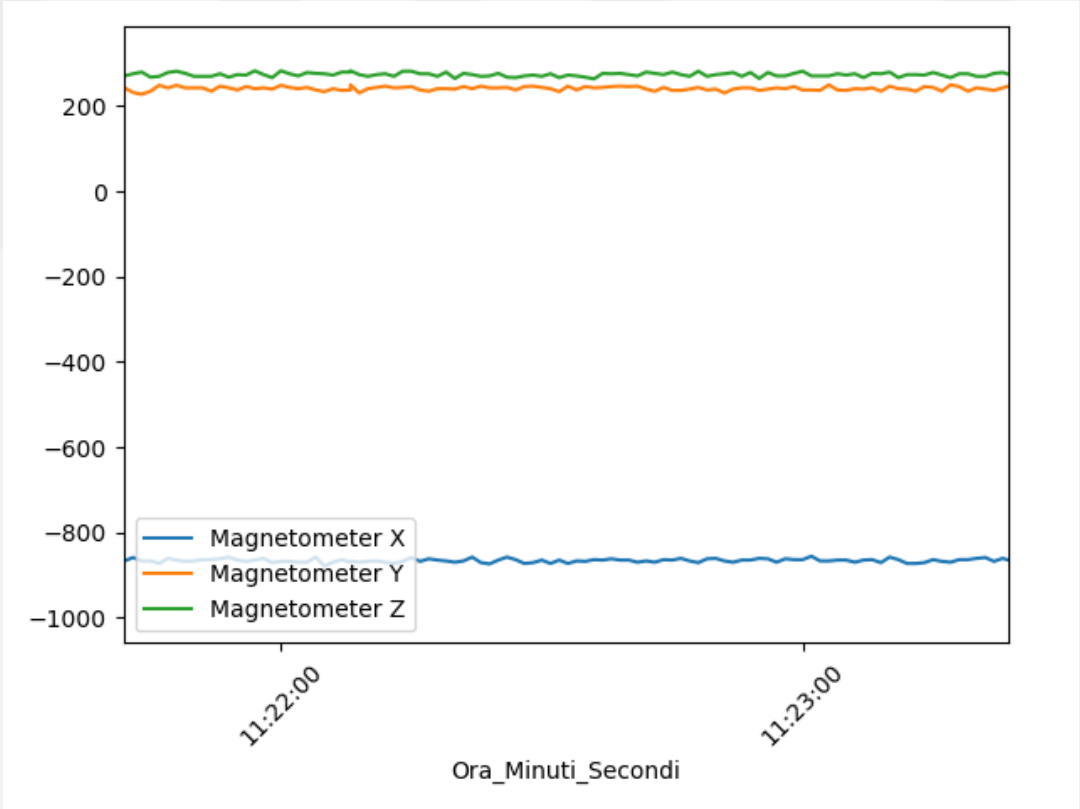
6	GIROSCOPIO



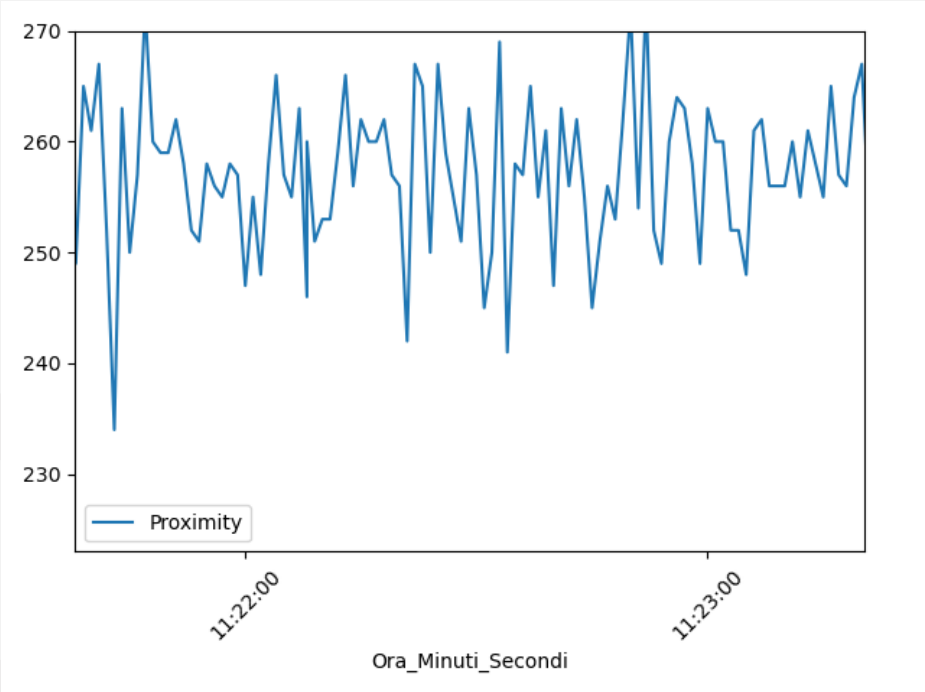
6	ACCELEROMETRO



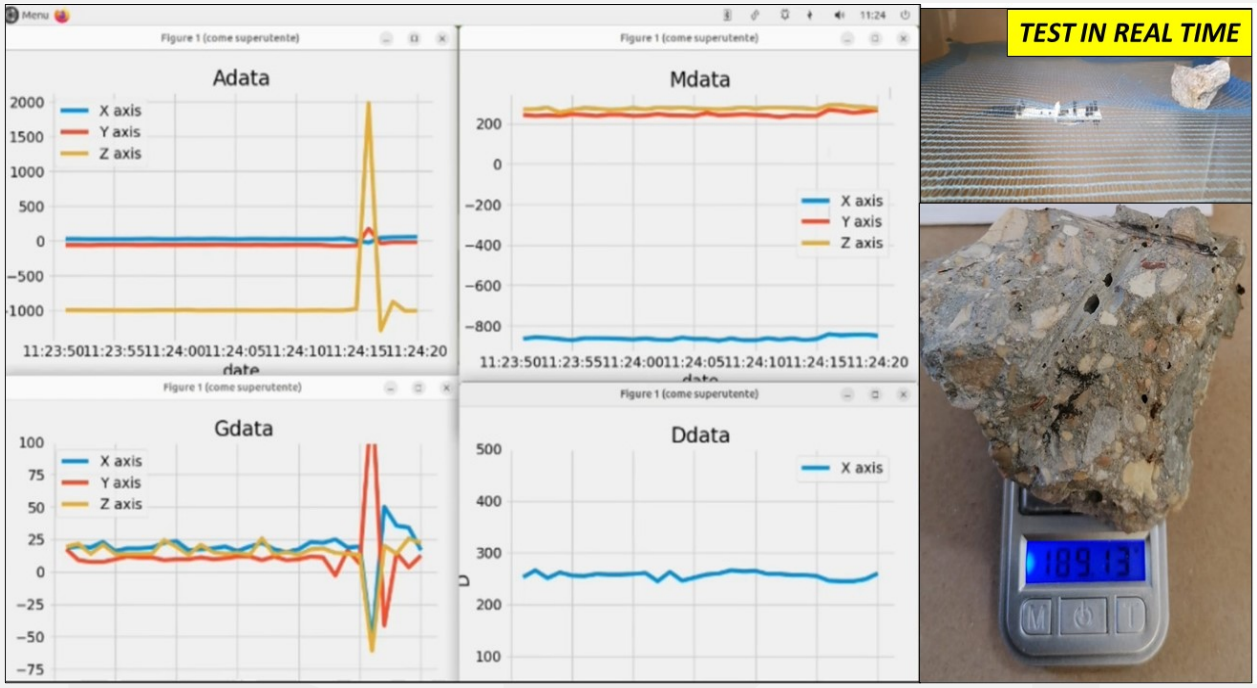
6	MAGNETOMETRO



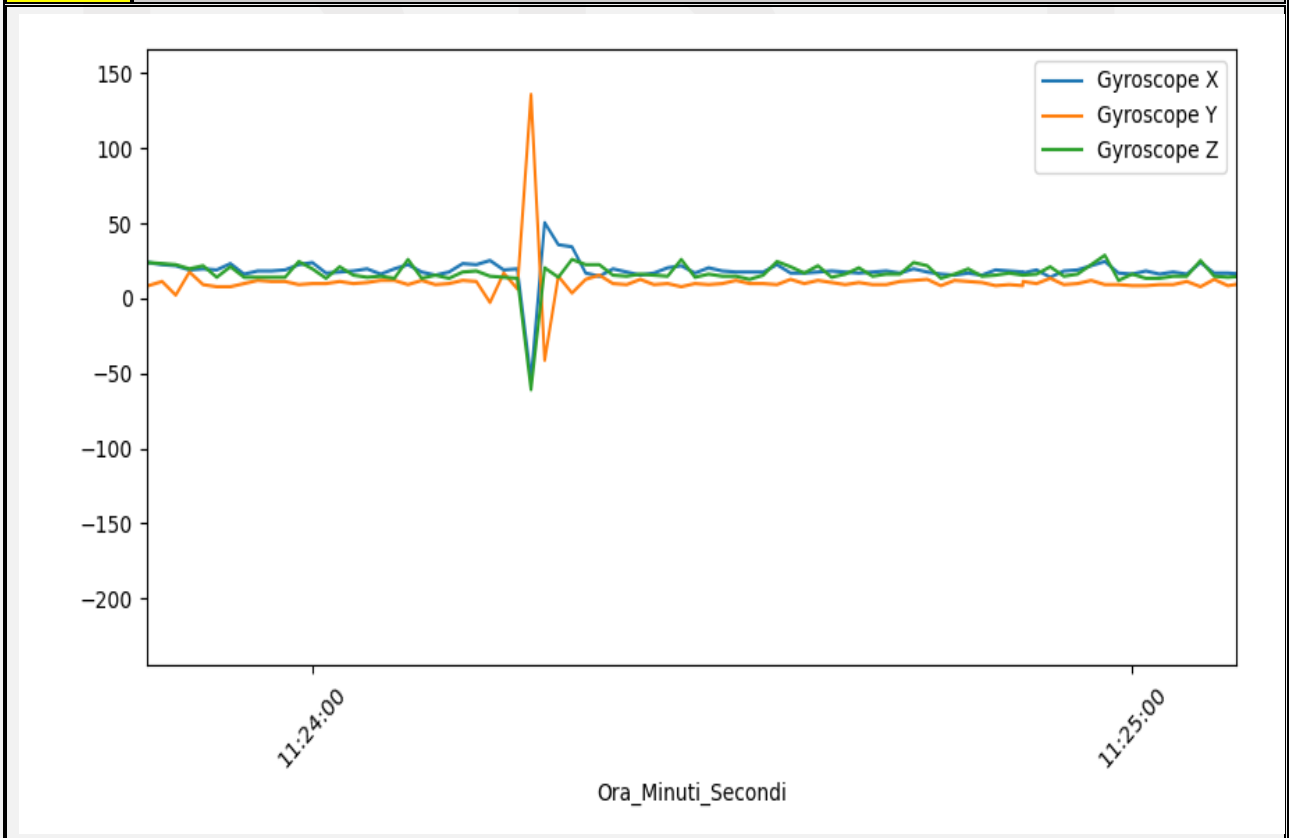
6	TOF


270
260
250
240
230
Proximity
11:22:00
11:23:00
Ora_Minuti_Secondi

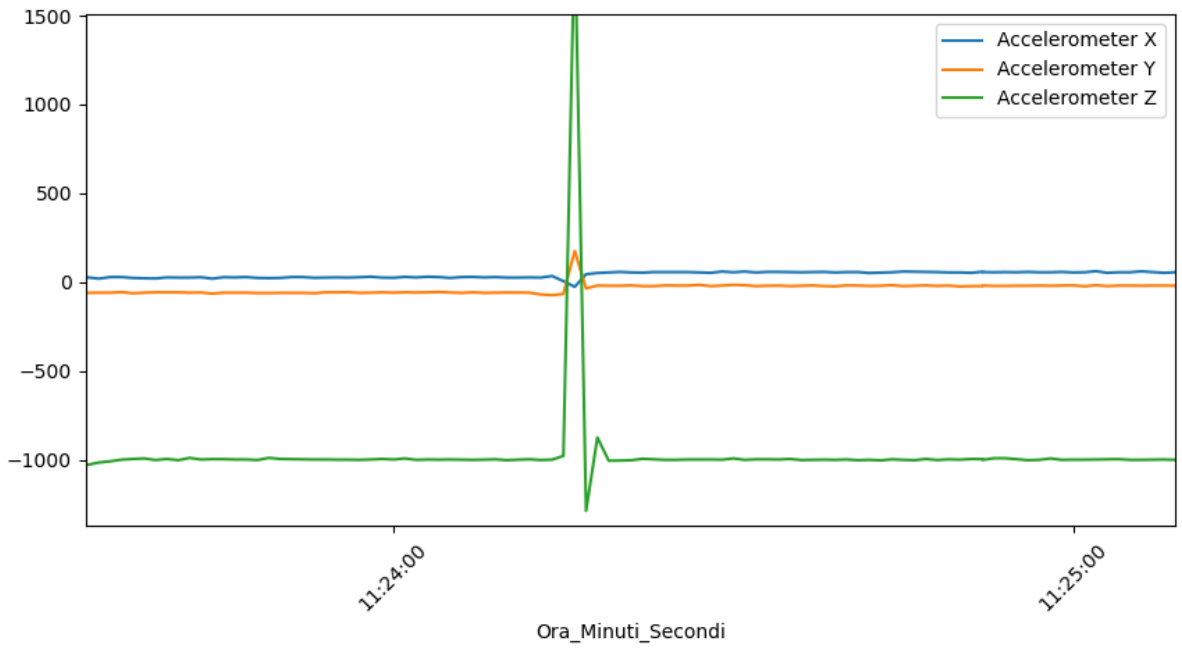
7	TEST N. 7	h =10 cm	p=189,13 gr



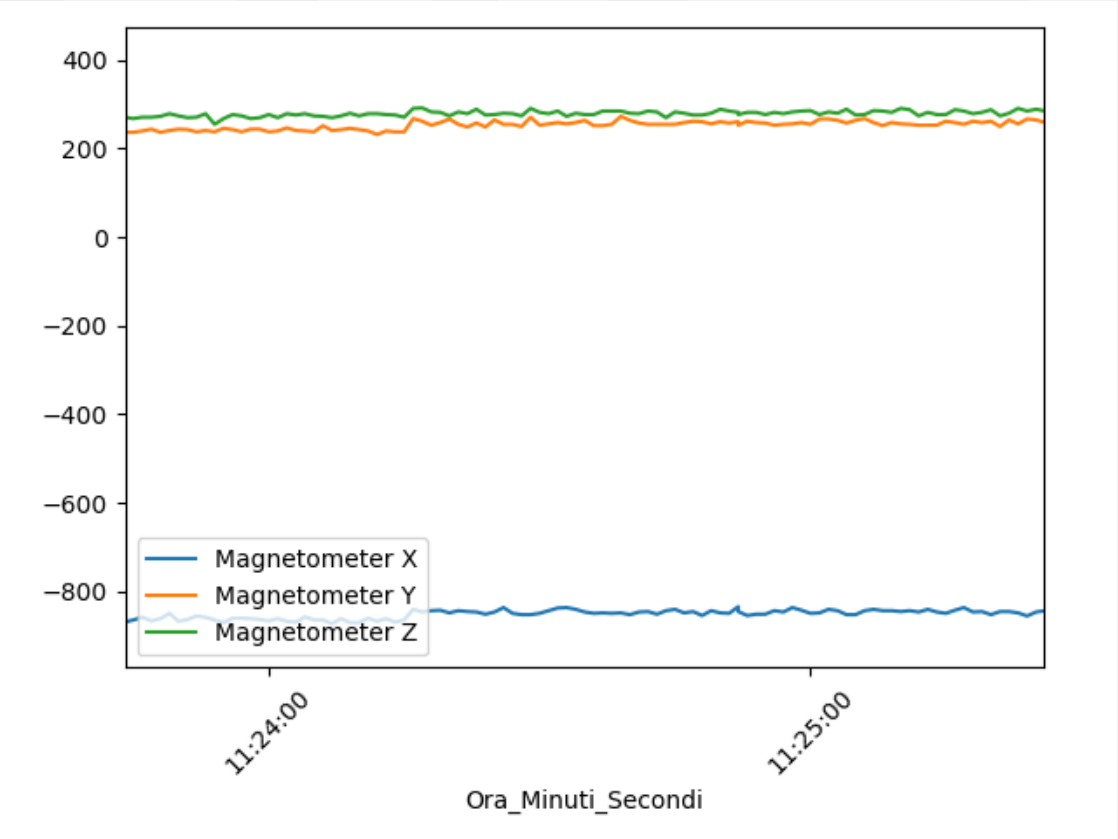
7	GIROSCOPIO



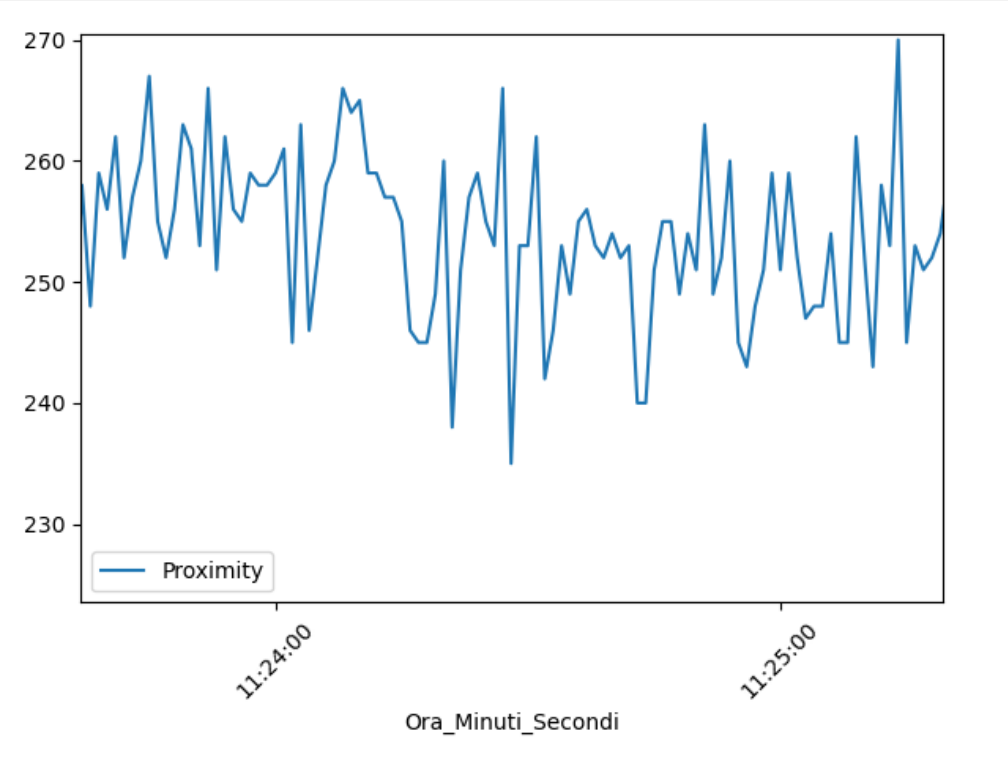
7	ACCELEROMETRO



7	MAGNETOMETRO

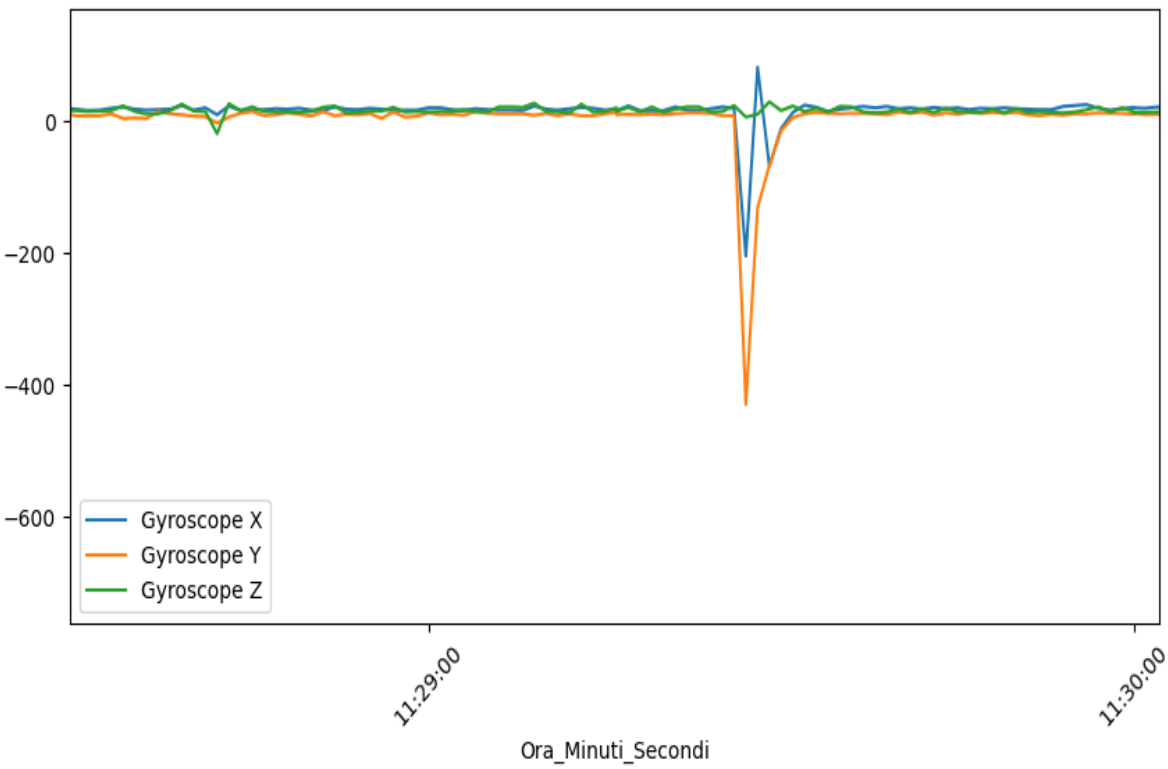


7	TOF

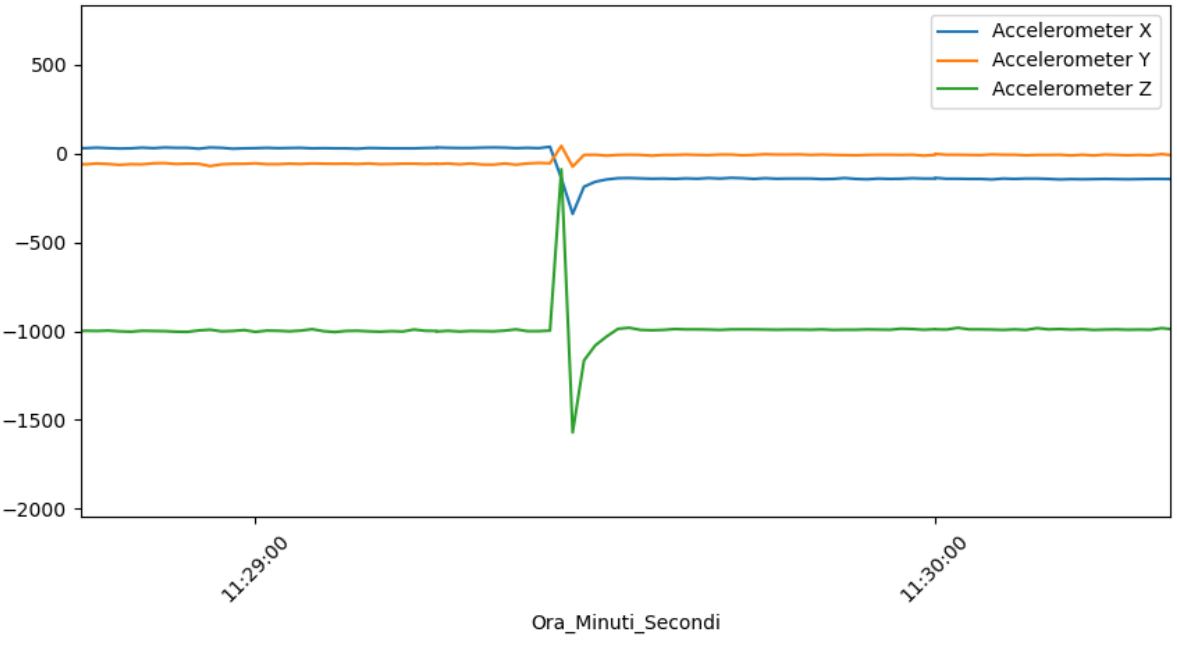


8	TEST N. 8	h =10 cm	p=240 gr

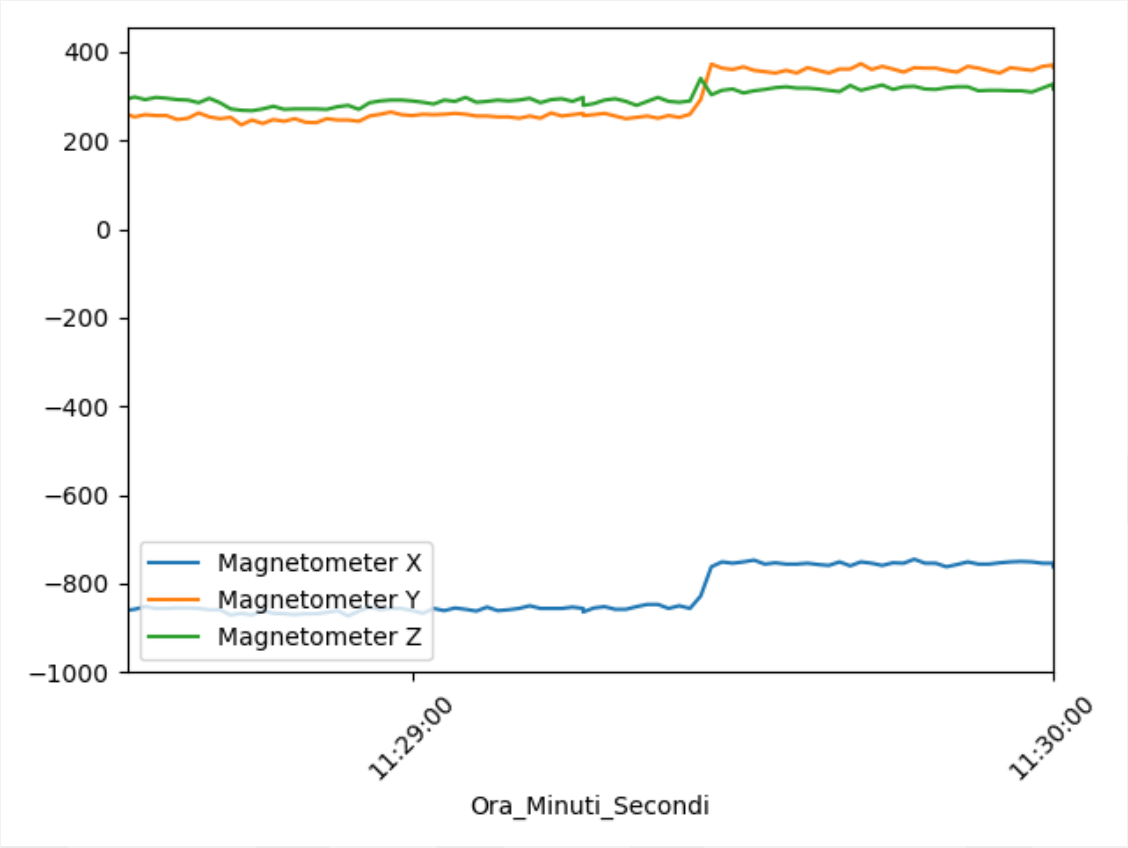
8	GIROSCOPIO



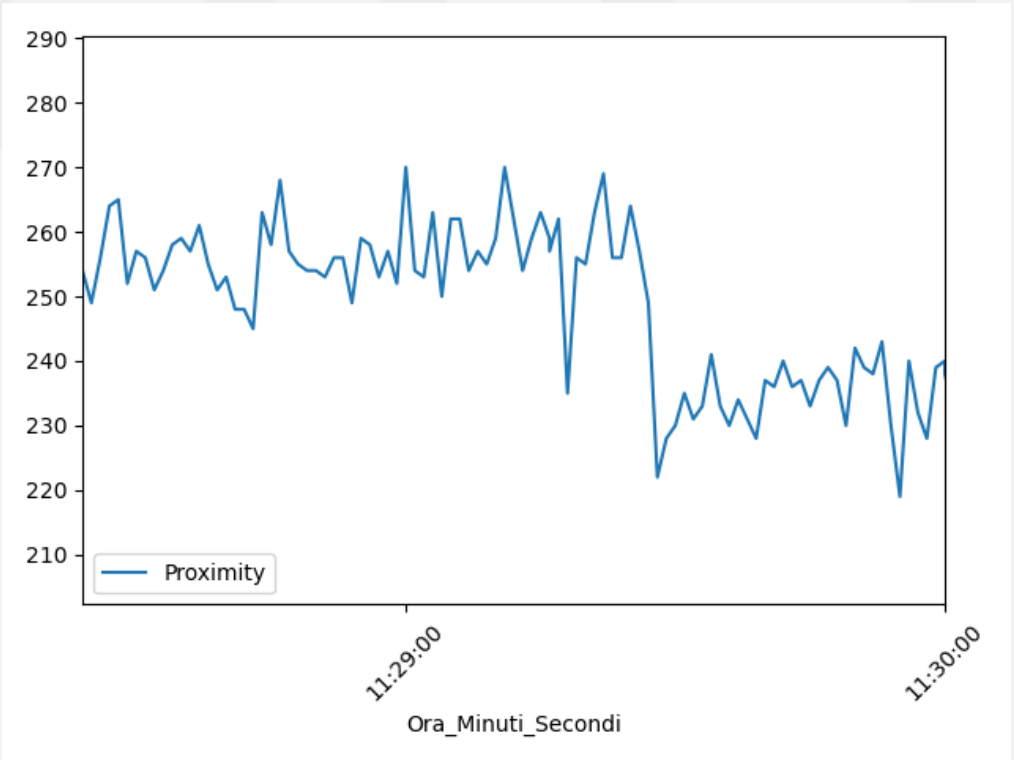
8	ACCELEROMETRO



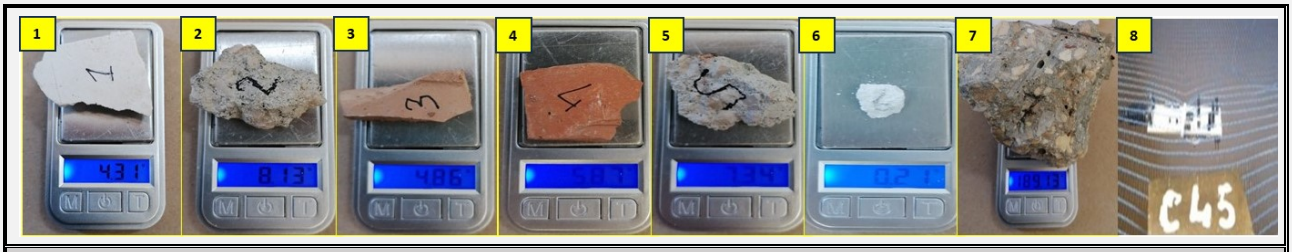
8	MAGNETOMETRO


400
200
0
−200
−400
−600
−800
−1000
Magnetometer X
Magnetometer Y
Magnetometer Z
11:29:00
11:30:00
Ora_Minuti_Secondi

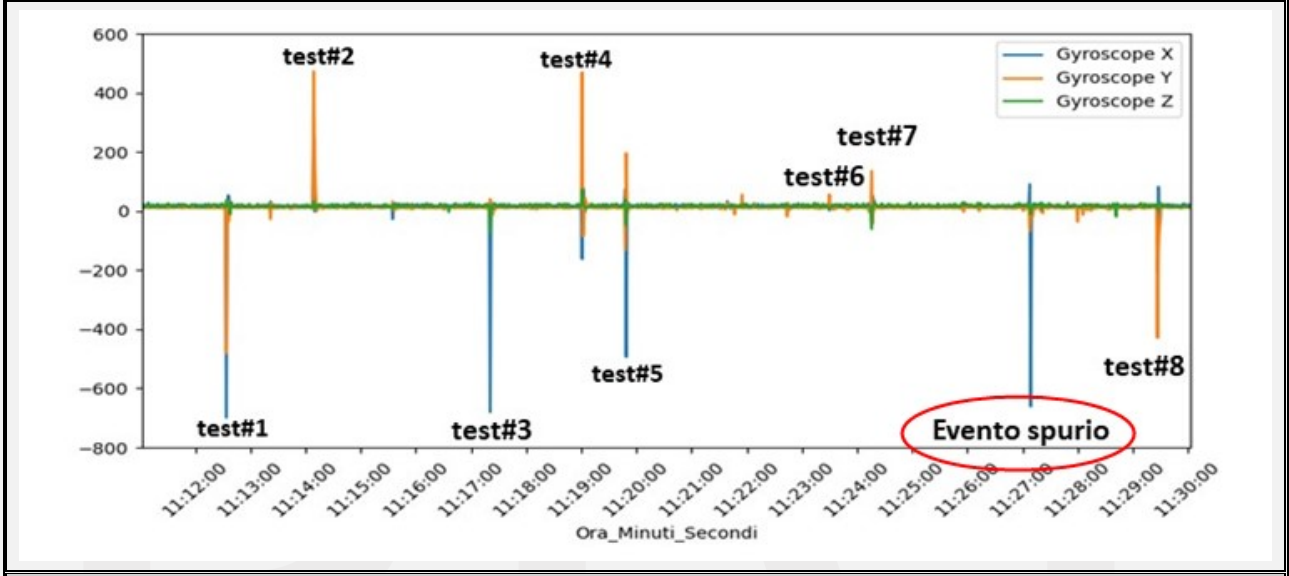
8	TOF


290
280
270
260
250
240
230
220
210
Proximity
11:29:00
11:30:00
Ora_Minuti_Secondi

Al minuto 11:27 è riportato un evento spurio non collegato alla caduta da un masso ma alle attività di rimozione dei precedenti sassi dalla rete.

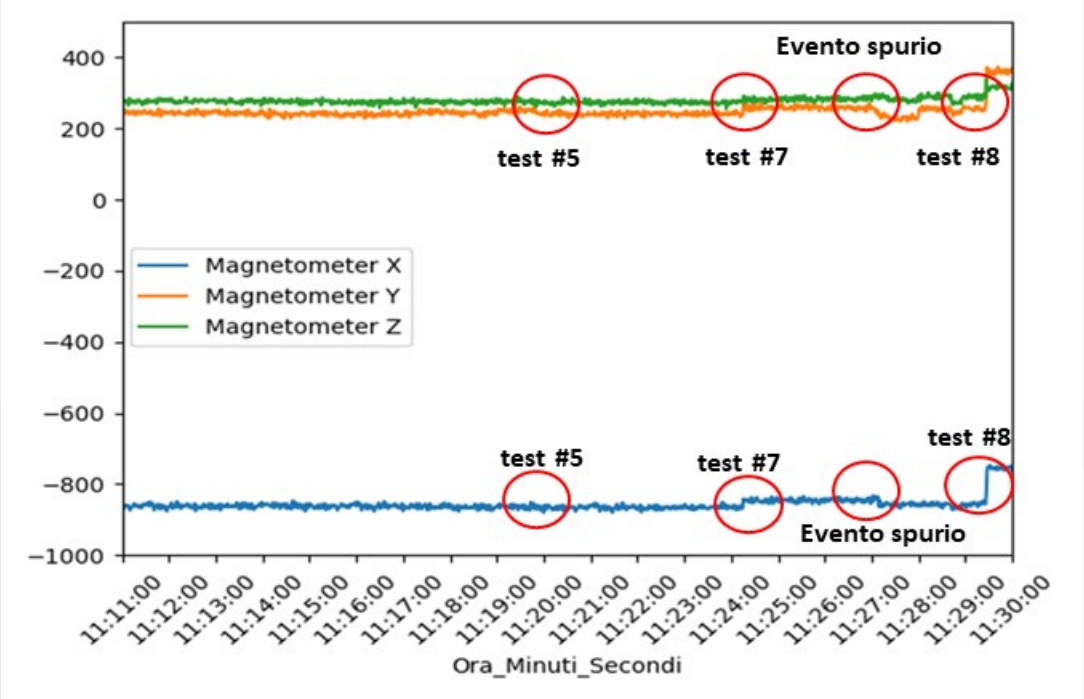


GIROSCOPIO

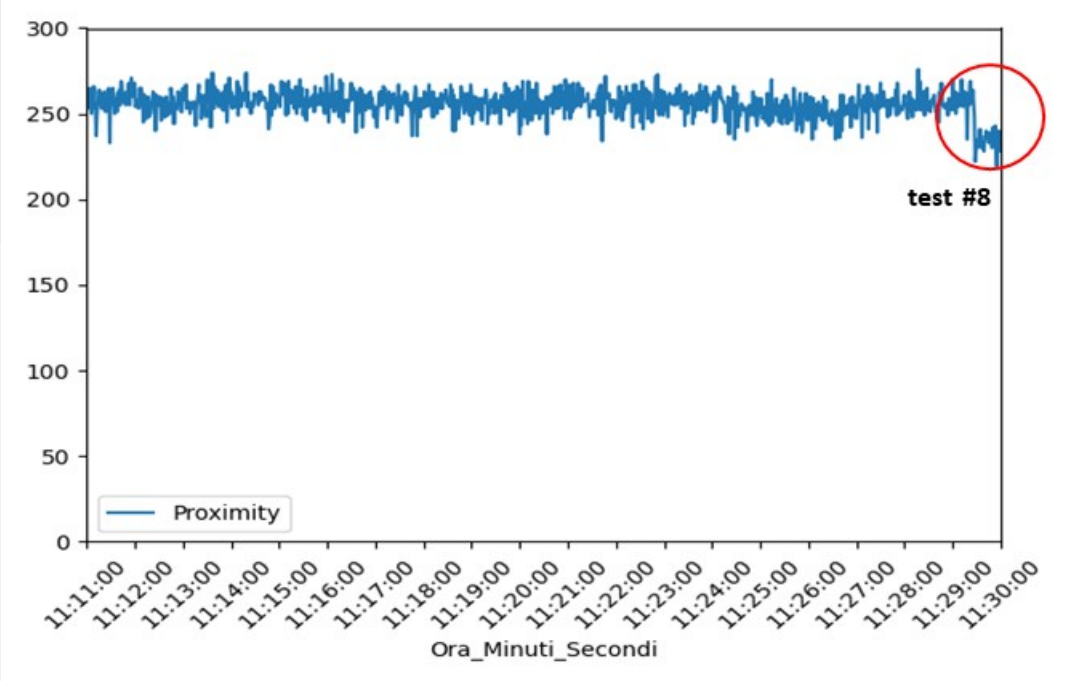


ACCELEROMETRO

MAGNETOMETRO



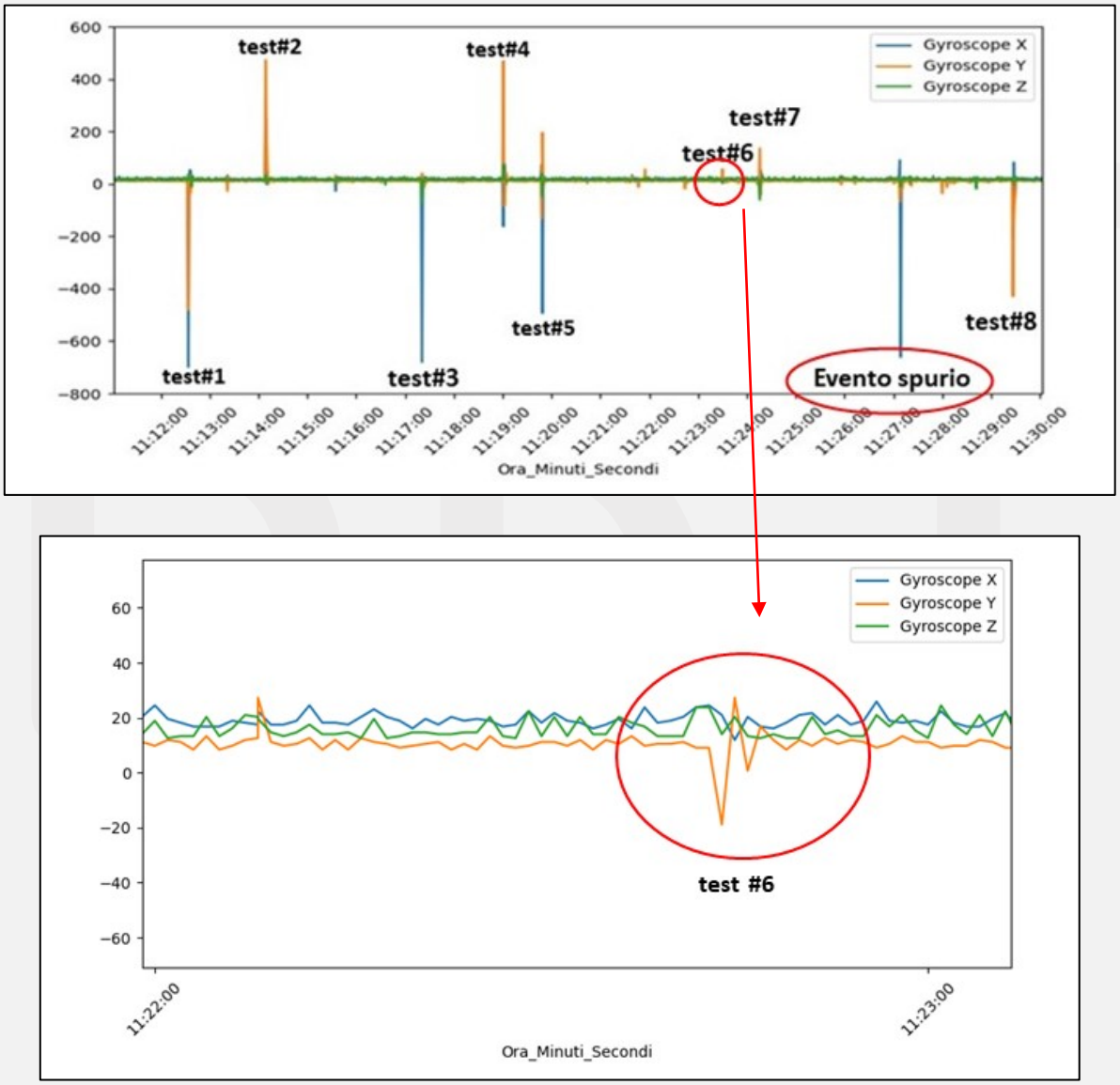
TOF



Gli esperimenti condotti riguardano la caduta di sassi e l'utilizzo di un giroscopio per misurare e rilevare tale caduta. In tutti i test, ad eccezione del **test #6**, è stato osservato un chiaro cambiamento

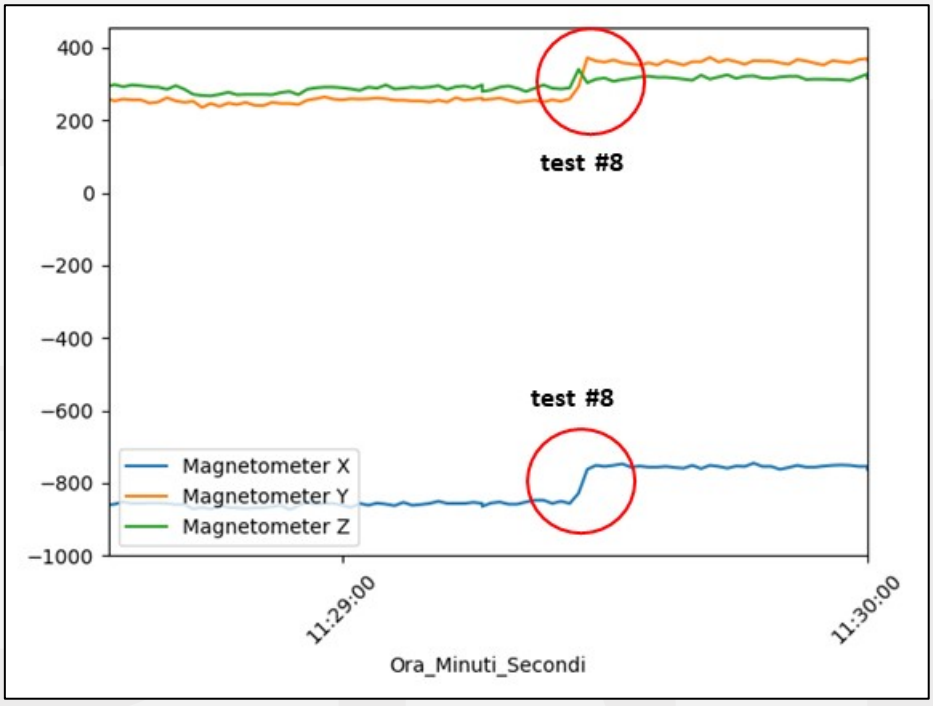
nella grandezza misurata dal giroscopio rispetto al rumore di fondo. Questo cambiamento permette di distinguere l'evento della caduta del sasso.

Tuttavia, nel caso del **test #6**, in cui il peso del campione era di soli 0,21 grammi, la variazione della grandezza misurata è stata minima e dell'ordine di grandezza del rumore presente nelle misurazioni.



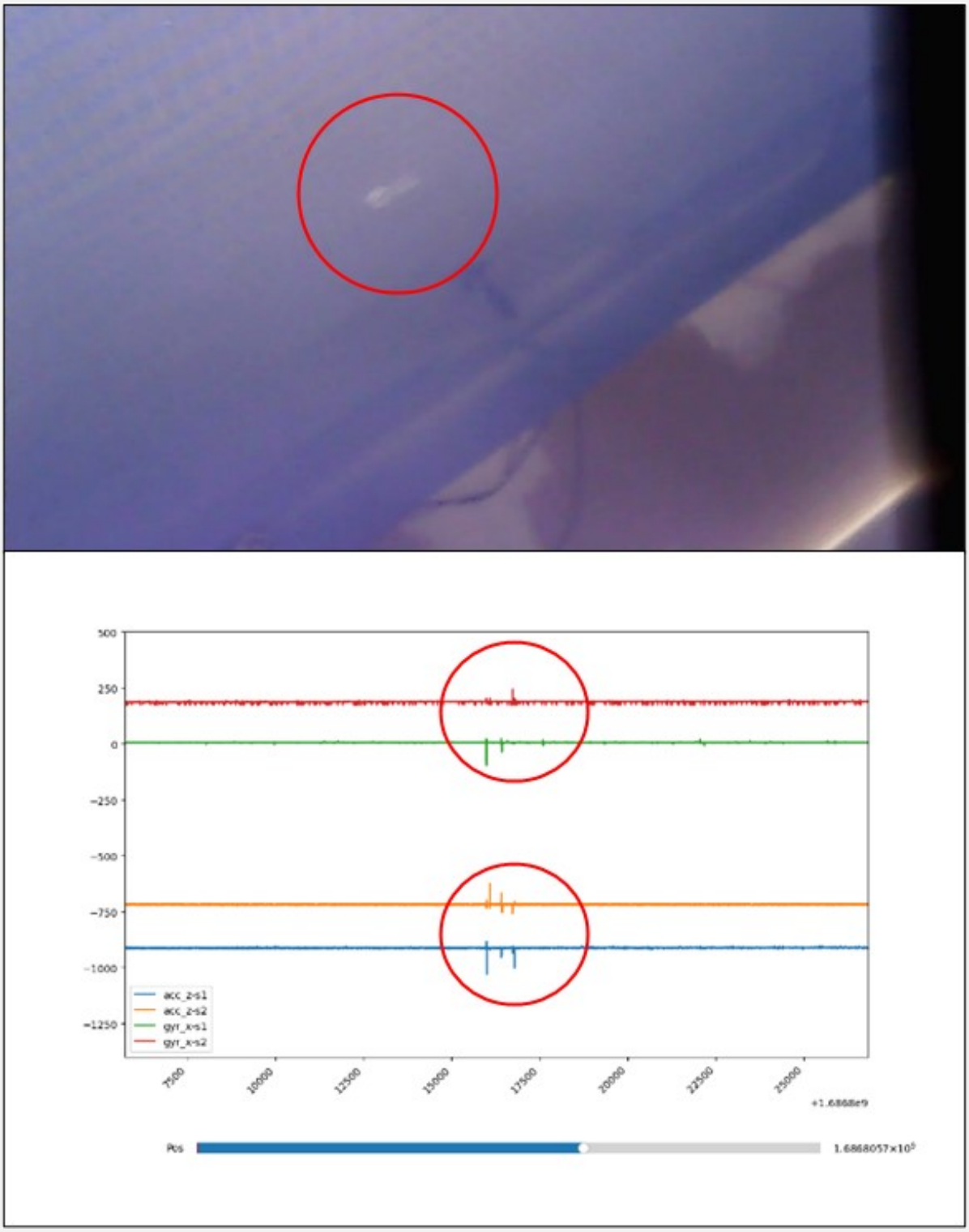
Di conseguenza, si è ritenuto che questo rappresentasse il limite di sensibilità del sistema di rilevamento per la caduta dei sassi.

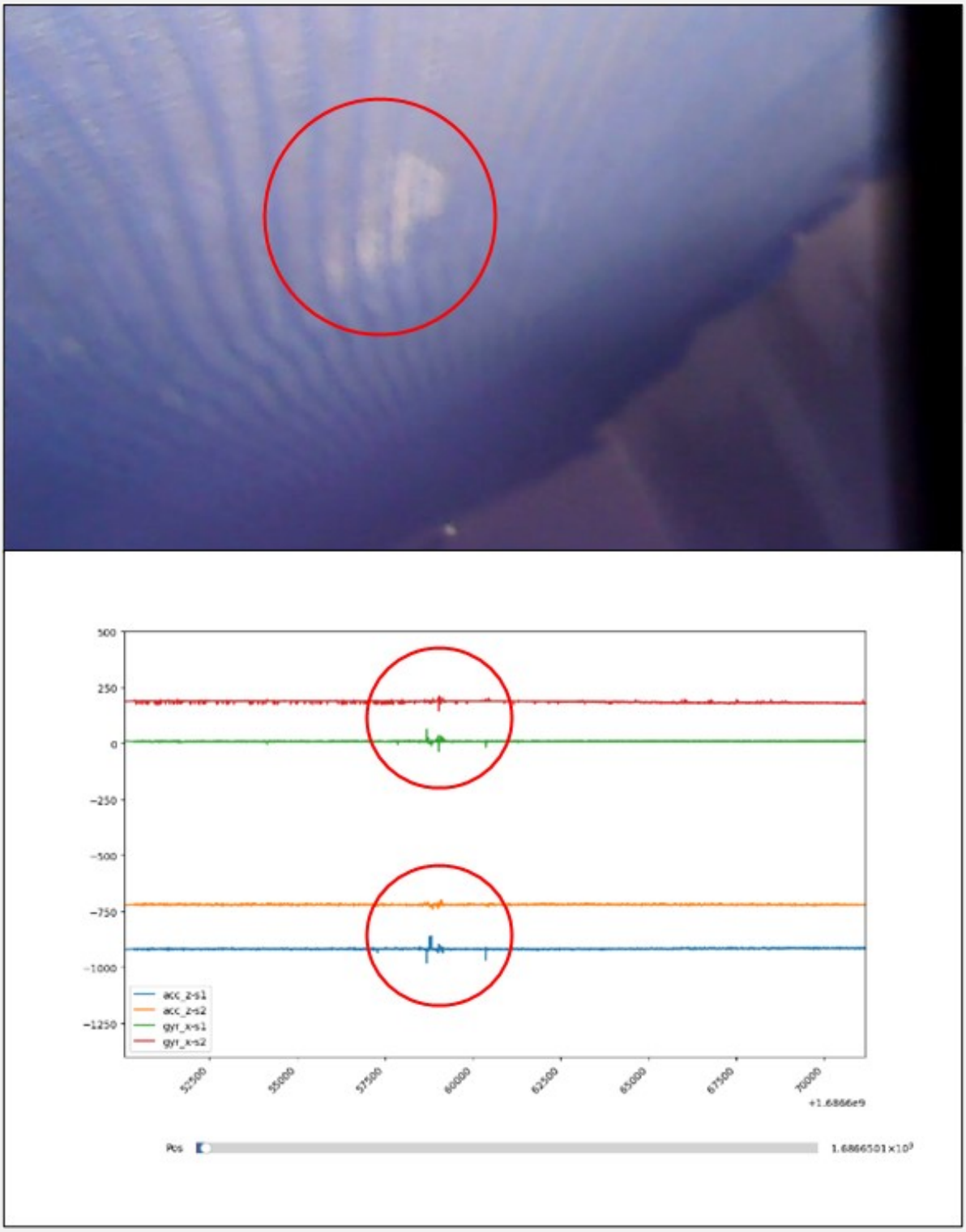
È importante sottolineare, come dimostrato dal grafico in calce, che il magnetometro riveste un ruolo significativo nel processo di rilevamento. Questo sensore è utile per stimare la nuova posizione assunta dal sensore stesso a causa della deformazione della rete dovuta alla presenza dell'oggetto staccatosi dal solaio ammalorato o una deformazione plastica della rete stessa, segnalando quindi una condizione di allarme tale da richiedere un intervento ispettivo del solaio.



6.1.2.2. Monitoraggio vibromeccanico non controllato

Durante l'intero arco degli esperimenti condotti, sono avvenuti piccoli cedimenti di intonaco "non controllati", ovvero "non forzati", visualizzati durante le ispezioni fatta tramite endoscopio elettronico all'interno della struttura solaio-rete-controsoffitto realizzato per il test. Tramite la visualizzazione dei dati rilevati si evince immediatamente i tempi in cui sono avvenuti tali distacchi. Nelle figure, un paio di esempi di distacchi di intonaco "non controllati":

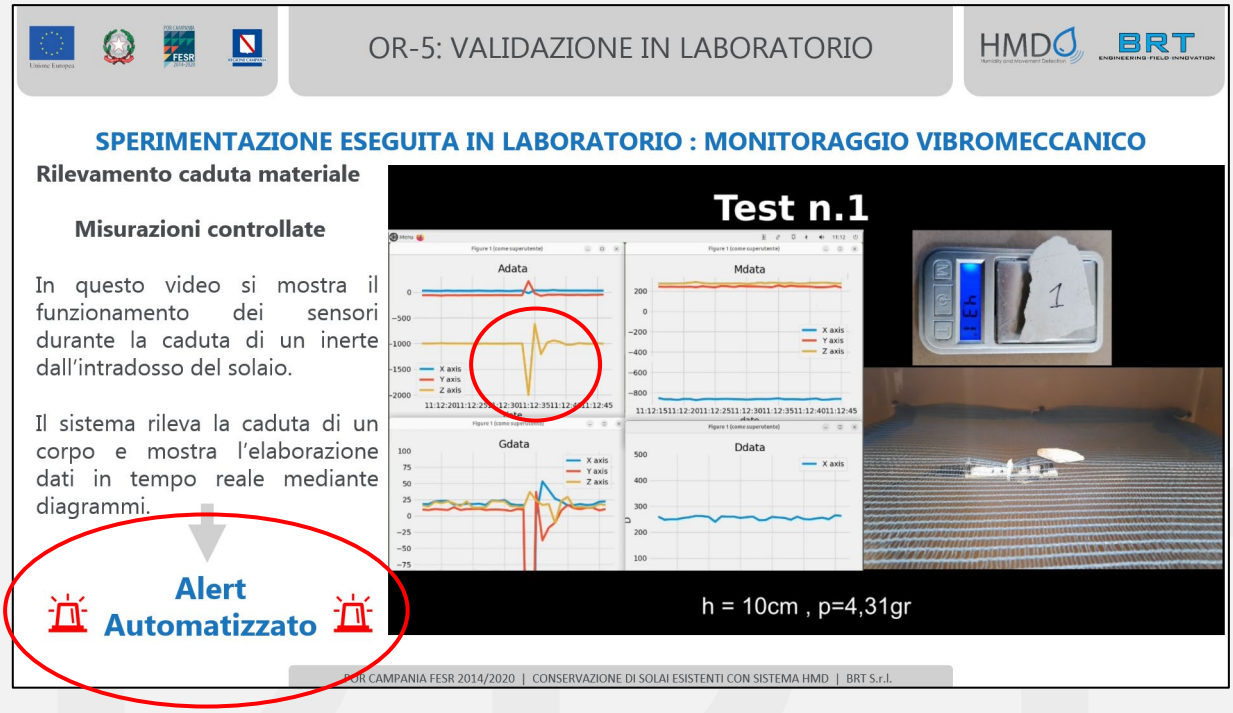

500
250
0
−250
−500
−750
−1000
−1250
acc_z-s1
acc_z-s2
gyr_x-s1
gyr_x-s2
7500
10000
12500
15000
17500
20000
22500
25000
+1.6868e9
Pos
1.6868057×10⁵


500
250
0
−250
−500
−750
−1000
−1250
acc_z-s1
acc_z-s2
gyr_x-s1
gyr_x-s2
52500
55000
57500
60000
62500
65000
67500
70000
+1.6866e9
Pos
1.6866501×10³

6.2. SVILUPPO APPLICATIVO DI ALLARMISTICA AUTOMATIZZATA

In sintesi, gli esperimenti hanno dimostrato che l'accelerometro e il giroscopio sono in grado di rilevare la caduta dei sassi in base alle variazioni di grandezza misurate, ma è stato anche evidenziato che il sistema ha un limite di sensibilità, come nel caso del test **#6** con un sasso molto leggero (0,21gr). Tramite queste osservazioni e tramite le sperimentazioni eseguite con cadute "controllate" di materiale campione, è stato possibile trovare ed implementare una strategia di "allarmistica" automatizzata, e sviluppare un applicativo che monitorando i dati registrati istante per istante invia un messaggio direttamente su un sistema di messaggistica moderna, ma lascia libertà di implementare anche invii tramite SMS, o implementare degli attuatori visivi o acustici per i responsabili della sicurezza e/o manutenzione.

Monitoraggio controllato _ Istante pre-impatto



Monitoraggio controllato _ Istante post-impatto

Applicativo di allarmistica automatizzato_ Invio SMS

7. OR-6: VALIDAZIONE DELLA TECNOLOGIA IN AMBIENTE RILEVANTE

7.1. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO

La scelta del sito in cui eseguire le prove in ambiente rilevante è stata dettata dalla necessità di avvicinarsi il più possibile alle problematiche reali per cui il Sistema HMD è stato ideato.

Una fondamentale esperienza di rilievo ha previsto l'esecuzione di ispezioni visive e strumentali, presso l'Azienda Ospedaliera di Rilievo Nazionale "Antonio Cardarelli" di Napoli, per controllare l'effettivo stato di consistenza dell'intradosso degli impalcati, con particolare riguardo ai fenomeni di "sfondellamento", siano essi in fase di "innesco" e/o di "evoluzione" e ad altre forme di degrado che precorrono il suddetto fenomeno (incipienti distacchi di copriferro e/o di intonaco, infiltrazioni, ossidazione dei ferri di armatura, etc…).

In continuità con le attività di rilievo ed ispezione, la BRT S.r.l. ha richiesto all'A.O.R.N. CARDARELLI per il tramite del proprio ufficio tecnico, la possibilità di eseguire la validazione della tecnologia di monitoraggio del progetto di ricerca **"Conservazione di solai esistenti con sistema HMD (Humidity and Movement Detection)"**, presso un edificio ubicato all'interno del complesso ospedaliero. Tale richiesta è stata gentilmente accolta dall'A.O.R.N. e pertanto si è convenuto di utilizzare una porzione di solaio ubicato al Padiglione F piano 4° (Neurofisiopatologia), in fase di ristrutturazione.

Al Padiglione F costruito all'inizio degli anni '40, sono stati riscontrati solai in latero-cemento costituiti da travetti in c.a. sprovvisti di una soletta in c.a. estradossale e con pignatte soggette a degrado. Difatti, sono stati progettati (e sono in corso di realizzazione) interventi di messa in sicurezza

e ripristino. In particolare, è stata effettuata la progettazione di un intervento anti-sfondellamento con rete in fibra di vetro e controsoffitto antisismico, del tipo modulare, con lastre ad uso ospedaliero.

I riscontri effettuati in sede di sopralluogo e le specifiche esigenze dettate dal contesto hanno determinato le scelte progettuali di seguito riportate. La realizzazione del Padiglione F è datata tra la fine degli anni '30 agli inizi degli anni '40 del secolo scorso, motivo per il quale ha subìto, nel tempo, importanti adeguamenti impiantistici con canalizzazioni di corrugati, tubazioni di gas medicali e canali di areazione collocati all'intradosso del solaio e mascherati con l'installazione di un controsoffitto ispezionabile.

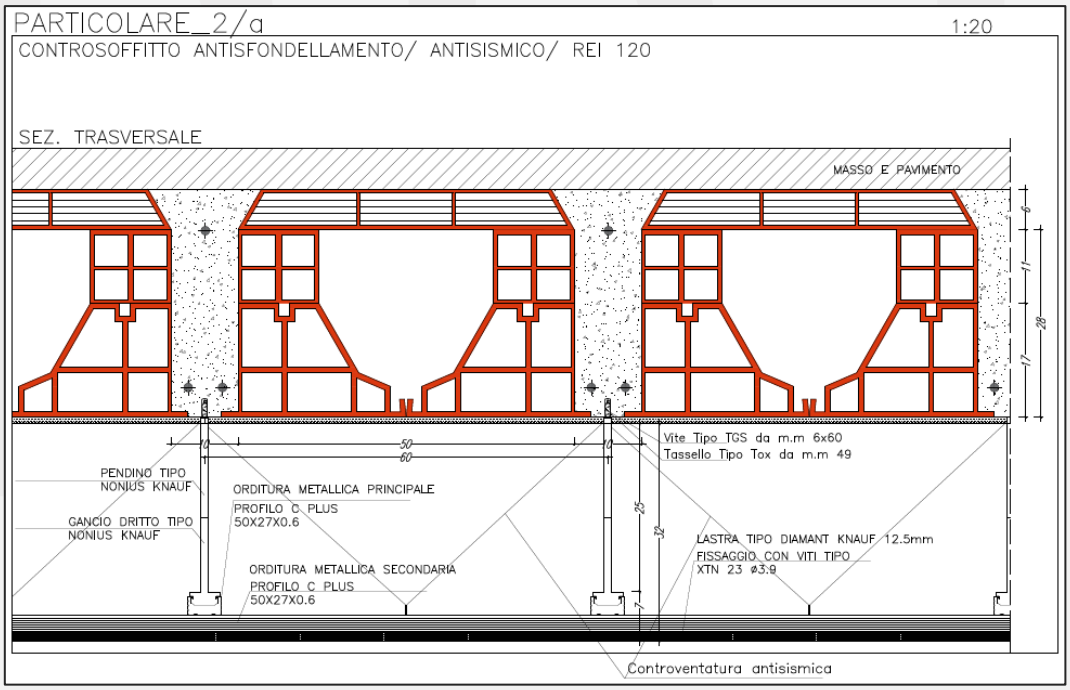


Fig.51- Particolare solaio ambiente rilevante

Di seguito si riportano alcune foto riprese in sito durante le attività di sopralluogo prima dei lavori di manutenzione.

Particolare solaio ambiente rilevante_ Pre-intervento di manutenzione

Particolare solaio ambiente rilevante_ Pre-intervento di manutenzione

Per l'esecuzione delle prove sperimentali in progetto, sono stati realizzati dei fori nei controsoffitti per poter posizionare i sensori all'intradosso dei solai. I sensori sono stati collegati via cavo ad una workstation appositamente installata per la lettura dei dati rilevati dai sensori installati.

Di seguito si riportano alcune foto riprese in sito durante la fase di sperimentazione.

Ubicazione sensori su intradosso solaio in ambiente rilevante

Ubicazione sensori su intradosso solaio in ambiente rilevante

Ubicazione sensori su intradosso solaio in ambiente rilevante

7.2. SPERIMENTAZIONE ESEGUITA

Le misure sono state effettuate nella area evidenziata in figura 1:

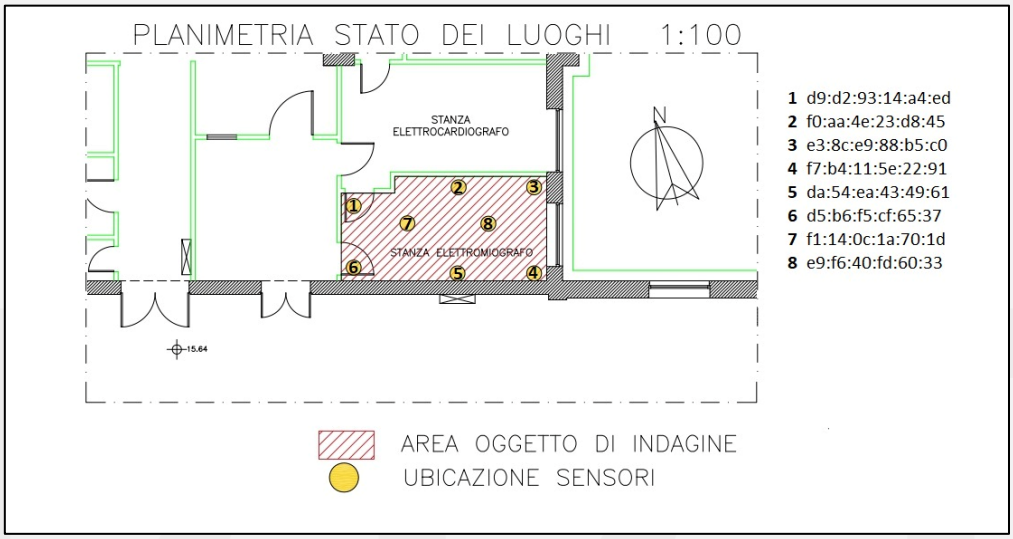


Fig.52- Planimetria Cardarelli_ Area oggetto di indagine

L'area che ci è stata assegnata per la sperimentazione del nostro sistema di rilevamento dello sfondellamento è costituita da un solaio non ammalorato, su cui è stata appena ripristinata la controsoffittatura. Il controsoffitto è collocato a una distanza di 10 cm dal solaio e diffusamente agganciato ai travetti.

Questa configurazione presenta alcune particolarità per la sperimentazione del sistema in esame. In particolare, non si verifica attualmente alcun sfondellamento e non è possibile osservare il comportamento del sistema in diverse condizioni di ammaloramento. Tuttavia, la scelta di un ambiente appena ripristinato consente di valutare l'efficacia del sistema nel rilevare eventuali problemi futuri o danneggiamenti che potrebbero verificarsi nel tempo.

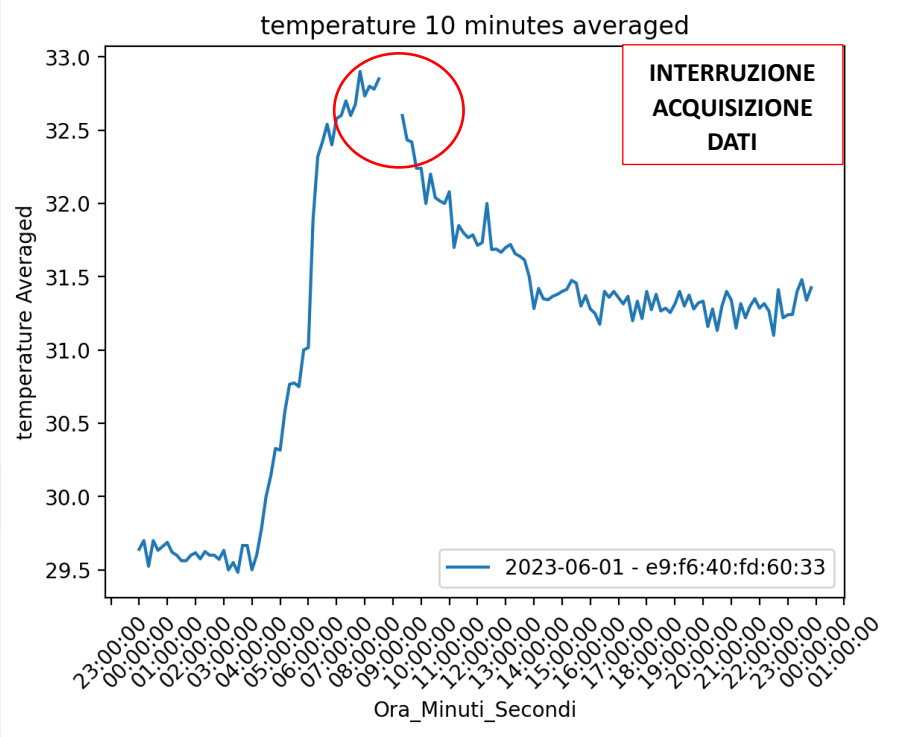
Nonostante l'assenza di sfondellamento attivo, il sistema si basa sulla combinazione di diversi sensori per monitorare la stabilità del controsoffitto. Grazie all'impiego di sensori come il giroscopio e l'accelerometro, è possibile rilevare anche piccoli movimenti o variazioni nel posizionamento del

controsoffitto. La situazione ritrovata in sito ha permesso di pianificare ulteriori studi e sperimentazioni in cui sarà possibile osservare il sistema in azione in diverse condizioni di ammaloramento, testando la sua sensibilità e precisione nel rilevare eventuali sfondellamenti o degradazioni del controsoffitto. Questo permetterà di valutare l'efficacia del sistema in un contesto più realistico e di apportare eventuali miglioramenti o ottimizzazioni necessarie.

A tal proposito si evidenzia che i due livelli di sperimentazione "in Laboratorio e in ambiente rilevante" ancorché la prima abbia avuto inizio in tempi precedenti rispetto la seconda, le due attività per un breve periodo sono state parallelamente e simultaneamente condotte. Tale procedura ha permesso una vicendevole calibrazione delle pratiche sperimentali in modo da allineare l'una all'altra e ottenere risultati scientificamente validi.

Durante il periodo di sperimentazione, si è dovuto considerare la particolare natura del sito di ricerca, in quanto esso era ubicato all'interno di una più estesa area di cantiere con lavorazioni in corso. È importante sottolineare che l'ambiente di cantiere può presentare condizioni variabili e impreviste che possono influenzare l'acquisizione dei dati.

Durante il periodo di sperimentazione, sono state riscontrate alcune interruzioni nell'acquisizione dei dati a causa di improcrastinabili lavorazioni che dovevano essere svolte nel sito di sperimentazione e per temporanee sospensioni nell'alimentazione elettrica di cantiere. Questi fattori esterni hanno comportato brevi periodi in cui i sensori non hanno registrato o trasmesso correttamente i dati. Tali interruzioni hanno influenzato la continuità e la completezza del set di dati raccolti.



Tuttavia, nonostante le difficoltà incontrate, si è riusciti a raccogliere una quantità significativa di dati durante i periodi in cui il sistema era operativo e stabile. Dopo la raccolta di una notevole quantità di dati durante la sperimentazione, è stato sviluppato un dedicato software, all'uopo progettato, per il trattamento e la visualizzazione dei dati acquisiti. Questo software ha permesso di analizzare e interpretare in modo efficace i dati provenienti dai sensori. Durante l'analisi dei dati, è stato osservato una certa variabilità nelle misurazioni, influenzata da diversi fattori, come le condizioni dell'area di cantiere e le interruzioni occasionali nella raccolta dei dati. Per ottenere una visione più accurata delle misurazioni e ridurre l'impatto degli outlier, dovuti a queste situazioni non ideali, sono state applicate delle tecniche di filtraggio dei dati.

In particolare, è stato deciso di mediare i dati su intervalli di 10 minuti. Questo significa che per ogni intervallo di tempo di 10 minuti, è stata calcolata la media dei dati raccolti in quel periodo. Questo approccio ha permesso di ottenere una rappresentazione più stabile e coerente dei dati nel tempo, riducendo l'effetto delle fluttuazioni a breve termine.

Inoltre, sono stati rimossi i dati che erano inferiori al 1% e superiori al 99% del quantile. Questa operazione ha consentito di eliminare eventuali outlier estremi che potrebbero essere stati causati dalle condizioni non ideali dell'area di cantiere. Rimuovendo questi valori estremi, si è riuscito a focalizzare l'analisi sui dati più rappresentativi e significativi.

L'adozione di queste tecniche di filtraggio dei dati ha permesso di ottenere una visione più chiara e accurata delle misurazioni dei sensori, riducendo l'effetto delle variabili indesiderate e aumentando la qualità complessiva dei dati analizzati. Questo ha fornito una base solida per l'interpretazione dei risultati e l'identificazione di eventuali modelli o tendenze significative.

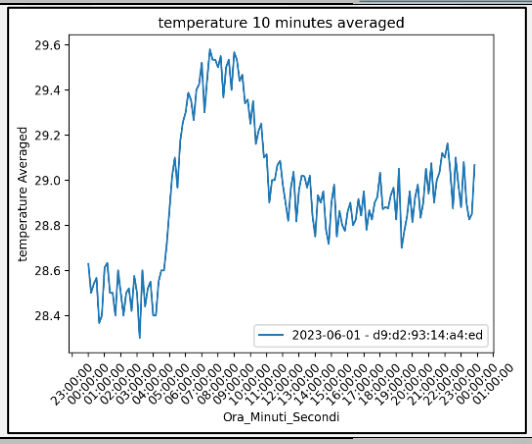
Come rappresentato in precedenza, la sperimentazione in "laboratorio" ha contemplato anche l'utilizzo di una rete appositamente progettata per rilevare le vibrazioni causate dalla caduta di piccole parti di solaio ammalorato. Tale rete è stata equipaggiata con schede che contengono sensori giroscopici e accelerometrici altamente sensibili, in grado di rilevare anche le più minute oscillazioni nella struttura. L'attività sperimentale in "ambiente rilevante", svolta presso la sede dell'A.O.R.N. Cardarelli in Napoli, aveva lo scopo di replicare lo scenario di "sperimentazione in laboratorio", però la preesistenza di un controsoffitto, non ha reso possibile installare la rete equipaggiata con la succitata attrezzatura di sensori (giroscopici e accelerometrici). Si rammenta che in "laboratorio" è stata condotta un'ampia sperimentazione, creando condizioni controllate, che hanno dimostrato l'estrema efficacia della tecnica di rilevamento con la predetta "rete equipaggiata". Nella fattispecie, sono state riprodotte diverse situazioni che potrebbero verificarsi nella realtà, ivi incluso la caduta di piccole parti del solaio ammalorato. La rete con i sensori giroscopici e accelerometrici ha dimostrato di essere altamente sensibile, rilevando con precisione le vibrazioni generate dalla caduta di tali piccole parti. Questa tecnica di rilevamento si è rivelata estremamente efficace nel riconoscere e segnalare gli eventi di sfondellamento.

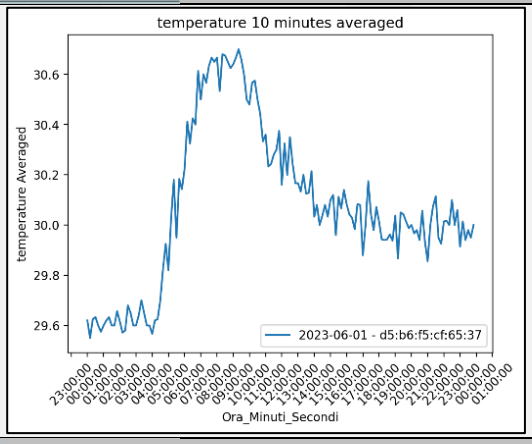
Di seguito a titolo di esempio sono riportati i grafici relativi a temperatura, umidità e pressione rilevati dal sensore **#1** e **#6.**

1 Giugno 2023

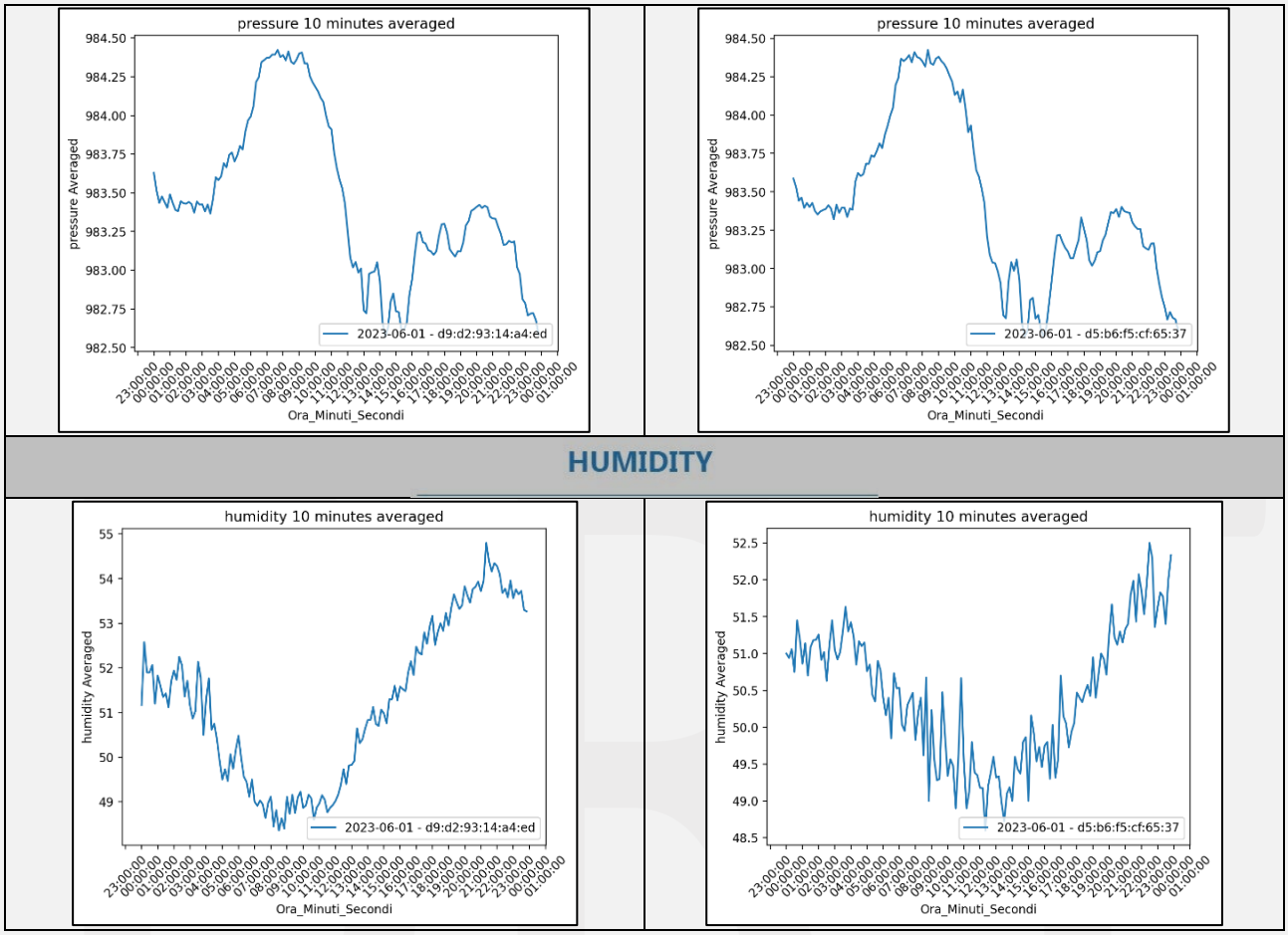
Sensore 1	Sensore 6

TEMPERATURE





PRESSURE

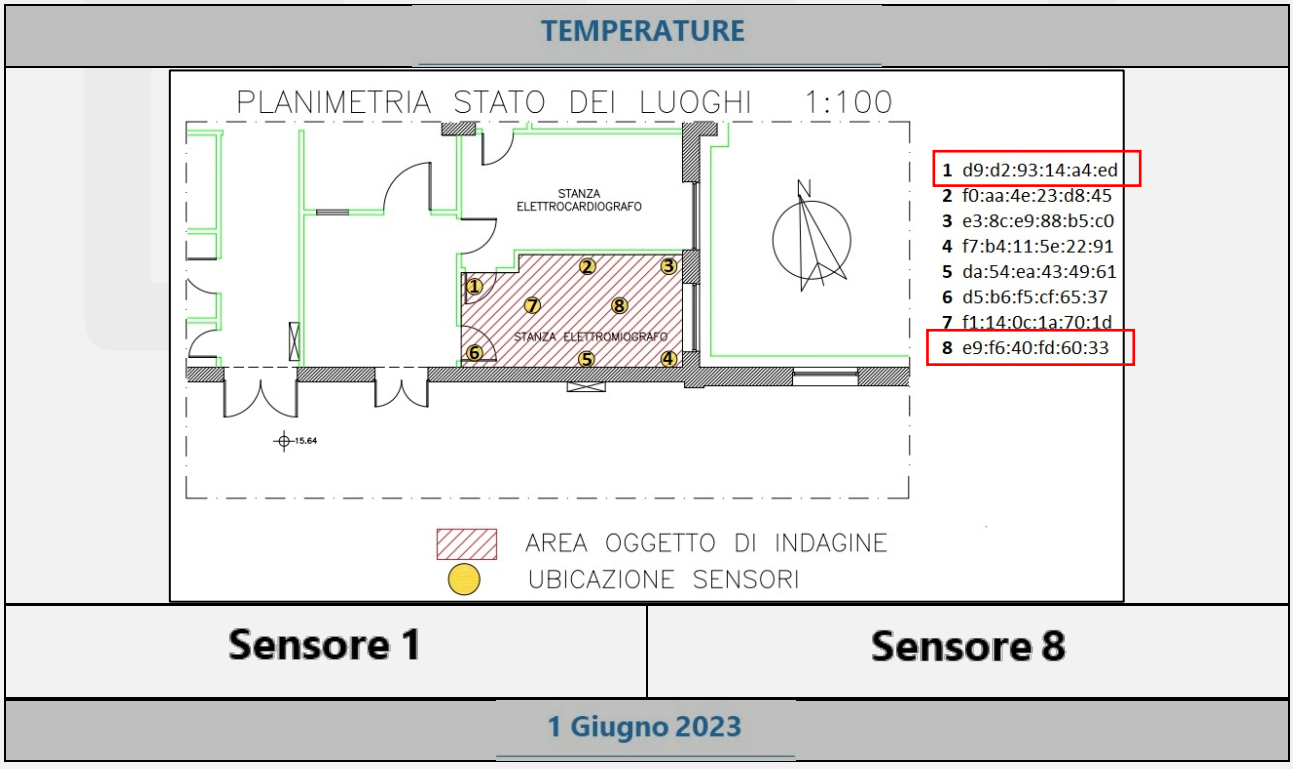


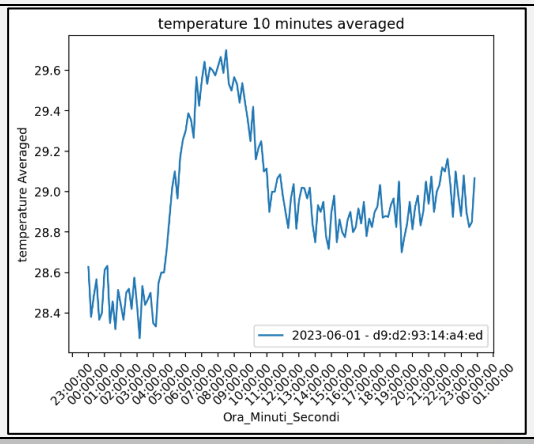
Di seguito è riportato il grafico della temperatura registrata dal misuratore **#1** in diversi giorni, il suo comportamento è rappresentativo di quello degli altri sensori, ad eccezione del misuratore **#8** che è stato incluso come punto di confronto. È importante notare che i dati di esempio riportati rappresentano le condizioni di lavoro dell'esperimento in cui il solaio non è ammalorato e il controsoffitto è appena stato realizzato. Pertanto, non si prevedono particolari variazioni nelle grandezze misurate.

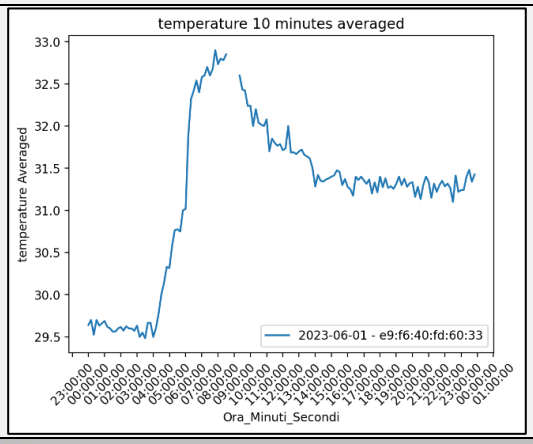
Tuttavia, il grafico mette in evidenza una caratteristica peculiare del misuratore **#8**, che è posizionato di fronte a una finestra rivolta verso est, esposta al sole. Questa posizione privilegiata fa sì che il misuratore **#8** sia soggetto a un maggiore irraggiamento solare rispetto agli altri sensori, come si evince dalla figura 1.

Come mostrato nel grafico, il misuratore **#8** segue un andamento della temperatura simile agli altri sensori nel corso dei giorni considerati. Tuttavia, si osserva un'escursione termica maggiore nel misuratore **#8** rispetto agli altri sensori. Questa differenza è attribuibile all'effetto dell'irraggiamento solare diretto sulla finestra di fronte al sensore **#8**, che porta a una maggiore variazione di temperatura rispetto agli altri punti di misurazione.

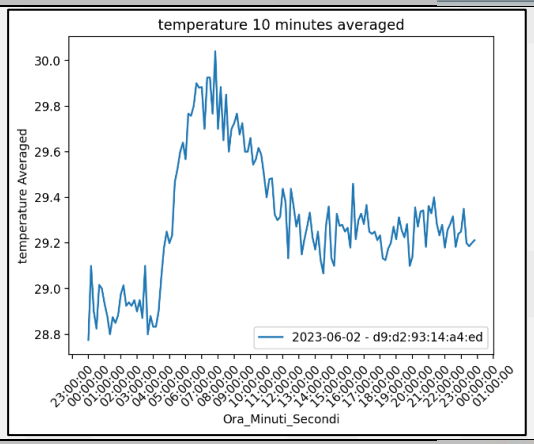
Questo esempio illustra come fattori ambientali specifici possano influenzare le misurazioni dei sensori. È importante considerare tali variabili nella valutazione dei dati raccolti e nell'interpretazione dei risultati. Nel contesto del rilevamento dello sfondellamento dei solai, tali informazioni possono essere utili per identificare possibili fonti di variazione e definire strategie di calibrazione e compensazione per garantire la precisione e l'affidabilità delle misurazioni.

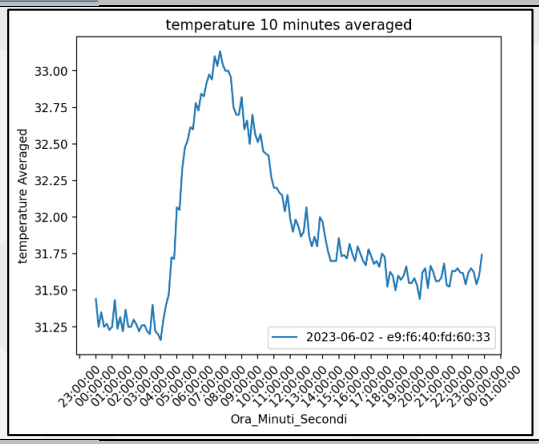




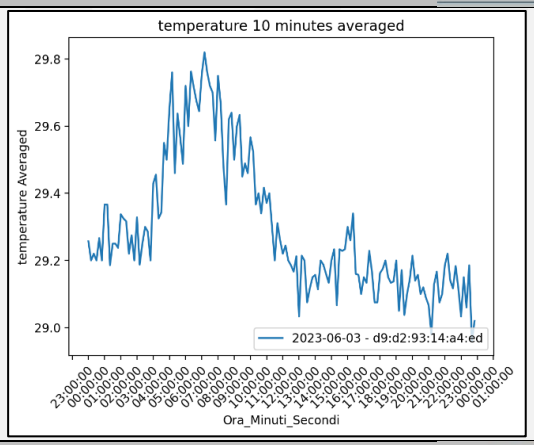


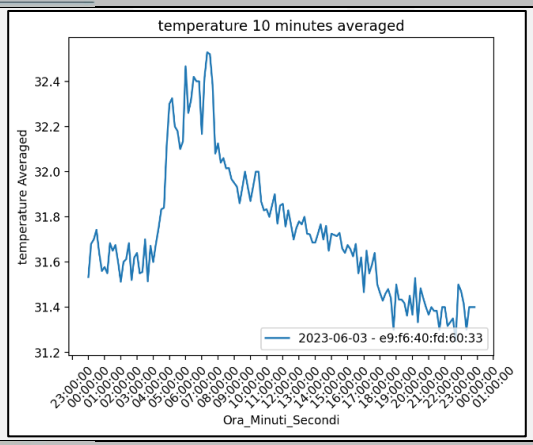
2 Giugno 2023



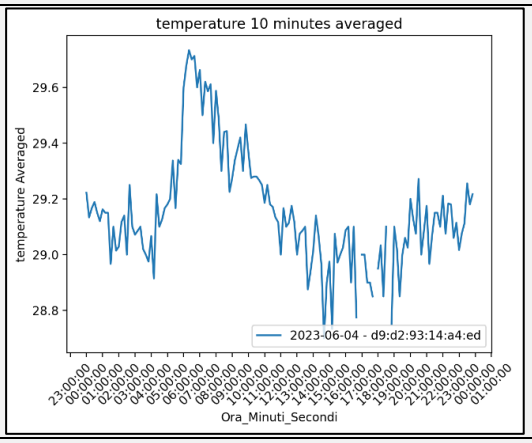


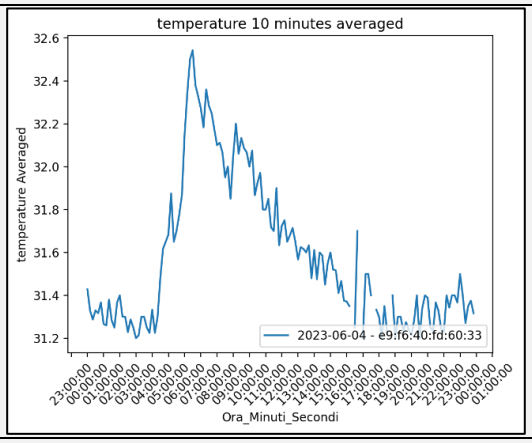
3 Giugno 2023





4 Giugno 2023


temperature 10 minutes averaged
temperature Averaged
Ora_Minuti_Secondi
2023-06-04 - d9:d2:93:14:a4:ed


temperature 10 minutes averaged
temperature Averaged
Ora_Minuti_Secondi
2023-06-04 - e9:f6:40:fd:60:33

8. DIFFUSIONE DEI RISULTATI DI PROGETTO

La BRT S.r.l. ha richiesto all'A.O.R.N. CARDARELLI di Napoli, per il tramite del proprio ufficio tecnico, la possibilità di eseguire la validazione della tecnologia di monitoraggio del progetto di ricerca di **"Conservazione di solai esistenti con sistema HMD (Humidity and Movement Detection)"**, presso un edificio ubicato all'interno del complesso ospedaliero. Tale richiesta è stata gentilmente accolta dall'A.O.R.N..

In continuità con le attività di rilievo ed ispezione visiva/strumentale e di quelle di monitoraggio sperimentale (progetto HMD), al termine delle attività di ricerca sperimentale e sviluppo industriale, così come previsto dal bando di gara, è stata eseguita la diffusione dei risultati di progetto, attraverso lo svolgimento di una presentazione, che ha consentito di illustrare l'iter sperimentale intrapreso, gli obiettivi (OR) e i risultati conseguiti. Il tutto è avvenuto tramite la proiezione in modalità Power Point, di slides, che hanno illustrato le fasi salienti dell'attività di ricerca, concludendosi con un confronto verbale con i partecipanti che hanno esposto domande, osservazioni e curiosità. L'invito alla partecipazione è stato inviato non solo a personalità e professionisti di rilievo, ma esteso a tutti coloro che percepiscono e identificano, nella conservazione dei solai esistenti e delle criticità ad essi connessi, un aspetto di grande attualità ed impatto nelle attività professionali odierne.

In calce si riportano una serie di fotografie che illustrano e riassumono la presentazione del progetto HMD avvenuta il 22/06/2023 presso l'aula multimediale "Mediterraneo" dell'A.O.R.N. Cardarelli di Napoli.

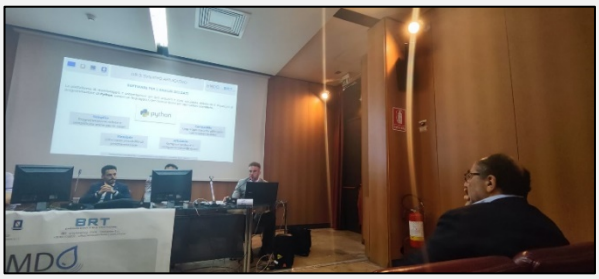
Brochure Invito

BRT
HMDO

BRT
HMDO

BRT
HMDO

BRT


BRT

9. CONCLUSIONI

Il presente progetto di ricerca propone lo sviluppo di una tecnologia atta a prevenire il rischio sfondellamento dei solai esistenti.

L'attività di ricerca eseguita è stata finalizzata alla creazione di un sistema di monitoraggio composto da una fitta rete di sensori da installare nei controsoffitti degli edifici. L'acquisizione dati "*in continuo*" per mezzo di un dispositivo (centrale di controllo) e la fase immediata di "*post-proccessing*" ha consentito di monitorare i dati dei sensori ambientali di pressione, umidità e temperatura, nonché quelli di movimento (monitoraggio vibromeccanico controllato e non) tramite accelerometro e giroscopio, con la finalità di individuare delle soglie di "allert", il cui superamento segnala condizioni ambientali e non, favorevoli all'innesco del fenomeno dello sfondellamento.

La sperimentazione prevista nel presente progetto di ricerca e sviluppo ha consentito di portare il prototipo ad un Total Readness Level pari a 5, corrispondente alla validazione in ambiente rilevante.

In una prima fase si è proceduto allo studio, tramite letteratura e **ricerca bibliografica**, del fenomeno di sfondellamento dei solai e delle cause che innescano lo stesso, fondamentale per l'individuazione dei parametri fisici (umidità, temperatura e pressione) oggetti di monitoraggio. Parallelamente alla fase di studio è stata condotta sia una attività di **ricerca industriale** finalizzata alla selezione dei sensori idonei all'utilizzo previsto nel progetto e sia una **analisi di fattibilità tecnica/economica**, affinché i prodotti scelti potessero essere tecnicamente validi ad un costo contenuto.

Successivamente, sono state **unite le funzionalità dei sensori, della centrale e del dispositivo di controllo** per creare un sistema composto in grado di misurare i dati di input ed avviare le elaborazioni necessarie per la definizione e la visualizzazione dell'output.

La **fase di elaborazione** è stata preceduta dallo **sviluppo di un applicativo (software)** in ambiente "python" per l'acquisizione, l'elaborazione (tecniche di filtraggio e schermatura) dei dati misurati dai sensori (post-processing) e la rappresentazione su interfaccia web.

Le fasi successive sono state incentrate sulla realizzazione dello **sperimentatore in laboratorio**, sull'individuazione di una tipologia di solaio esistente coerente con le attività di monitoraggio ambientale e vibromeccanico e sulla realizzazione del sistema di monitoraggio composto (sensoristica e gestione dati).

Di fondamentale importanza è stata la continua **ricerca e studio sul corretto posizionamento della rete sensoristica**, con lo scopo di valutare attentamente la distribuzione e l'ubicazione dei sensori di umidità al fine di identificare possibili aree critiche e garantire una rilevazione accurata dei punti di ammaloramento o infiltrazione.

Il monitoraggio ambientale in condizioni controllate (creazione idrobox) e non (eventi metereologici avversi) hanno confermato una buona capacità dei sensori di umidità di rilevare con una accettabile precisione le variazioni delle condizioni ambientali e di identificare, laddove sono presenti delle infiltrazioni, le zone di possibile insorgenza di lesioni localizzate all'intradosso del solaio. Ciò solleva la questione del numero e della tipologia di sensoristica da installare per ottenere una copertura completa della struttura. Diventa quindi di fondamentale importanza valutare attentamente la distribuzione dei sensori al fine di identificare le aree critiche. Una strategia adeguata potrebbe prevedere l'installazione di sensori di umidità in prossimità delle potenziali aree a rischio, consentendo una valutazione dettagliata e localizzata delle condizioni di umidità lungo tutto la superficie del solaio.

Contemporaneamente è importante sottolineare i notevoli risultati ottenuti dalla rete dotata di sensori accelerometrici, giroscopici e magnetometrici. Questi sensori hanno dimostrato, durante le fasi di

monitoraggio, un'accuratezza elevata e una sensibilità eccellente nel rilevare le cadute di piccoli pezzi di intonaco dal solaio ammalorato in situazioni controllate e non. L'attività di monitoraggio vibromeccanico ha consentito di ottenere informazioni dettagliate sugli istanti di caduta, sulle vibrazioni associate e sulla definizione delle soglie di "alert", permettendo lo sviluppo di un applicativo di allarmistica automatizzata al superamento di soglie preimpostate.

L'utilizzo combinato dei sensori giroscopici, accelerometrici e magnetometrici ha permesso di ottenere una valutazione accurata dei fenomeni di sfondellamento nella fase di innesco e sulla caduta di pezzi dal solaio ammalorato di piccolissime dimensioni (ordine di pochi grammi). Questi strumenti offrono una soluzione efficace per monitorare e prevenire potenziali danni strutturali, fornendo informazioni preziose per l'analisi e la manutenzione del solaio.

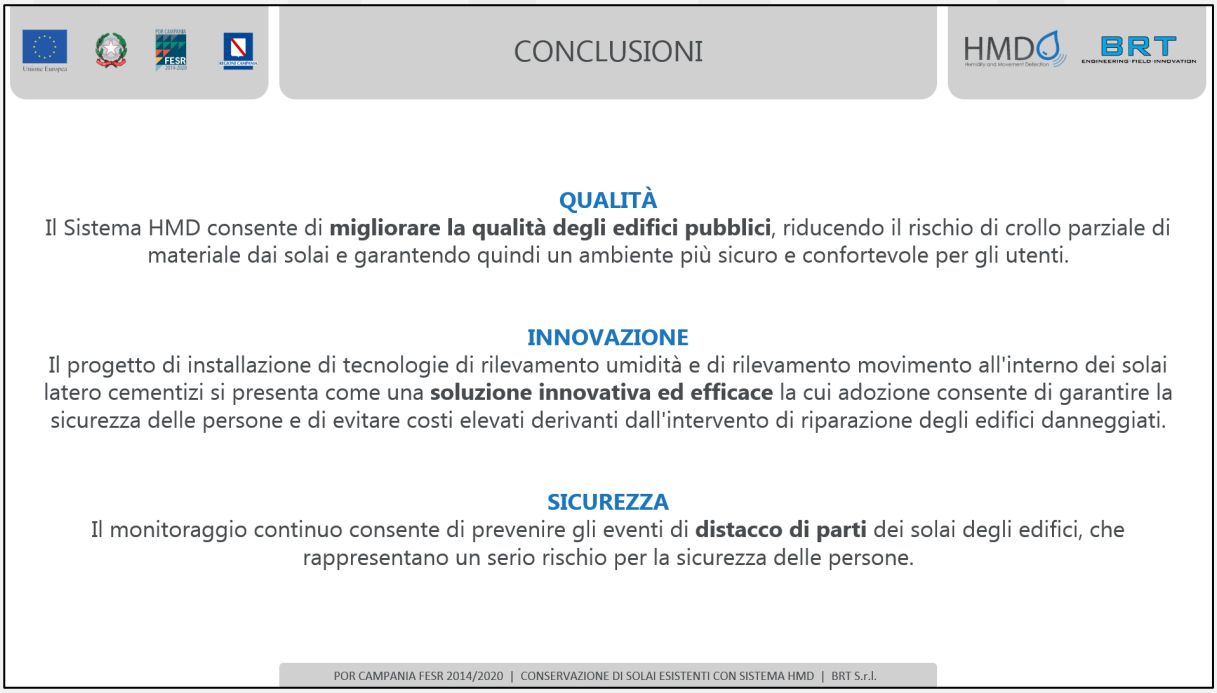
La **fase finale** del presente progetto di ricerca e sviluppo ha previsto la **validazione della tecnologia HMD in ambiente rilevante**, presso un edificio ubicato all'interno del complesso ospedaliero dell'A.O.R.N. CARDARELLI in Napoli, sottoponendo all'attività di monitoraggio una porzione di solaio ubicato al Padiglione F piano 4° (Neurofisiopatologia). Nonostante il fatto che, il solaio fosse in fase di ristrutturazione e non presentasse - ad un controllo visivo - difettologie tipiche che facessero presagire la presenza di sfondellamento in fase di innesco, l'attività di monitoraggio e l'elaborazione dei dati acquisiti ha confermato una buona capacità dei sensori di umidità di rilevare con precisione le variazioni delle condizioni ambientali. In particolare, è stato possibile osservare la presenza di escursioni termiche maggiori in alcuni sensori rispetto ad altri. Questa differenza è attribuibile all'effetto dell'irraggiamento solare delle porzioni di solaio in prossimità degli infissi esterni, che comporta una maggiore variazione di temperatura rispetto agli altri punti di misurazione.

L'analisi condotta dimostra come fattori ambientali specifici possano influenzare le misurazioni dei sensori. Quanto sopra esposto è di fondamentale importanza in quanto consente di considerare tali

variabili nella valutazione dei dati raccolti e nell'interpretazione dei risultati. Pertanto, nel contesto del rilevamento dello sfondellamento dei solai tali informazioni sono di fondamentale importanza per identificare possibili fonti di variazione e definire strategie di calibrazione e compensazione per garantire la precisione e l'affidabilità delle misurazioni.

In conclusione, è possibile asserire che il sistema HMD sviluppato mira a garantire:

1) **Un miglioramento della qualità e durabilità degli edifici pubblici, in quanto è possibile programmare gli interventi manutenzione conservativa, laddove ci fossero segnalazioni di stati di degrado;**
2) **Un risparmio economico indiretto, dovuto all'analisi predittiva dei difetti, che consente di intervenire in maniera anticipata con opere dal costo contenuto, rispetto agli interventi di ripristino (molto più onerosi) necessari nel caso di sfondellamento avvenuto;**
3) **Una maggiore sicurezza degli utenti degli edifici pubblici, dovuta ad un monitoraggio continuo atto a prevenire il distacco di materiale.**



Naturalmente il progetto è in fase di sviluppo e non può dirsi completato (essendo arrivati ad un TRL 5), ma è possibile affermare che ci sono le basi per poter avanzare e portare il sistema ad uno step successivo fino all'industrializzazione ed alla commercializzazione di un sistema completo ed omologato (TRL 9).

A conclusione dell'intero iter di ricerca e sviluppo del progetto di ricerca HMD, in data 22/06/2023, è stata eseguita la diffusione dei risultati di progetto, attraverso lo svolgimento di una presentazione in power point, presso l' "Aula Multimediale Mediterraneo" dell' A.O.R.N. Cardarelli di Napoli, che ha consentito di illustrare l'iter sperimentale intrapreso, gli obiettivi realizzativi (OR) e i risultati conseguiti.

9.1. SVILUPPI FUTURI

A. Tecniche di machine learning;

Lo sfondellamento dei solai è un problema diffuso che può causare danni strutturali e mettere a rischio la sicurezza delle persone. Per limitare i danni derivanti da tale "problema diffuso", è possibile utilizzare una rete di sensori che sia capace di rilevare svariate grandezze fisiche, come temperatura, umidità, pressione e movimenti/vibrazioni causati da eventuale caduta di materiale. L'obiettivo è quello di utilizzare tecniche di "machine learning" per analizzare i segnali provenienti da questi sensori e rilevare in modo tempestivo gli eventi avversi come lo sfondellamento.

Per prima cosa, è necessario acquisire i dati dai sensori in modo sincronizzato. Questi dati possono essere pre-processati per rimuovere eventuali rumori o outlier che potrebbero influenzare la precisione delle analisi successive. Successivamente, i dati provenienti dai diversi sensori possono essere combinati per creare un vettore di caratteristiche che rappresenti lo stato attuale del sistema.

Una volta ottenuto il vettore di caratteristiche, si può procedere con l'apprendimento automatico. Un approccio comune è quello di utilizzare algoritmi di classificazione, come le reti neurali o i support

vector machines (SVM), per *addestrare un modello* capace di distinguere gli eventi di sfondellamento dai normali stati del soffitto e/o controsoffitto. Durante la fase di *addestramento*, il modello viene alimentato con una vasta quantità di dati etichettati, in modo che possa apprendere i modelli e le correlazioni tra le caratteristiche e gli eventi avversi.

Una volta addestrato il modello, è possibile utilizzarlo per la rilevazione in tempo reale dello sfondellamento. I nuovi dati provenienti dai sensori vengono inseriti nel modello, che genera una previsione o una probabilità di sfondellamento. Se la previsione supera una soglia predefinita, viene attivato un allarme o viene notificato un operatore per intraprendere le misure necessarie.

È importante sottolineare che l'efficacia del sistema dipende dalla qualità dei dati di addestramento e dalla rappresentatività dei casi di sfondellamento. Pertanto, è consigliabile raccogliere un ampio dataset di casi positivi (sfondellamenti) e negativi (stati normali) per migliorare la capacità predittiva del modello.

In conclusione, l'utilizzo di tecniche di “machine learning” per il trattamento dei segnali provenienti da più sensori rappresenta un approccio promettente per la rilevazione di eventi avversi come lo sfondellamento di solai. La combinazione di dati provenienti da sensori diversi e l'addestramento di modelli di apprendimento automatico consentono di identificare tempestivamente tali eventi, migliorando la durabilità degli edifici (mediante interventi di manutenzione) e di conseguenza, la relativa sicurezza strutturale.

Nell'attuale configurazione, i sensori inviano costantemente i dati al server, anche quando non accade nulla di rilevante. Tuttavia, sarebbe più interessante utilizzare dei sistemi di notifica per ottimizzare l'utilizzo dei sensori. L'intelligenza artificiale, in realtà, non ha nulla di "intelligente" ma eccelle nella classificazione degli eventi. Pertanto, nell'uso di queste tecniche di “machine learning”, si passano attraverso diverse fasi di elaborazione dei dati.

Una possibile soluzione potrebbe essere che le operazioni di elaborazione dei dati siano eseguite anche sui microcontrollori dei misuratori, in modo da effettuare una pre-elaborazione e inviare solo i dati rilevanti all'esterno per una successiva elaborazione secondaria.

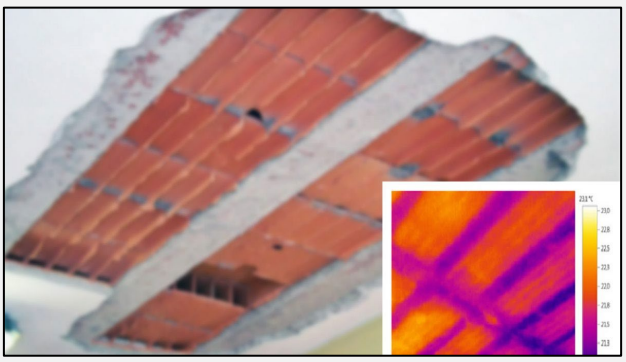
D'altro canto, le variabili ambientali possono essere registrate con un intervallo di tempo più ampio, considerando che variazioni significative non si verificano solitamente nell'arco di pochi minuti. Questo permette di gestire in modo più "rilassato" la registrazione di tali dati, senza la necessità di un invio continuo.

Modificando l'architettura della rete dei sensori in questa direzione, è possibile beneficiare di un calcolo distribuito, sfruttando i vantaggi della pre-elaborazione e del filtraggio dei dati direttamente sui dispositivi di acquisizione. Ciò permette di ridurre il traffico di dati inutili e di inviare solo le informazioni rilevanti al server centrale per una successiva analisi più approfondita.

In conclusione, l'ottimizzazione dell'architettura della rete dei sensori può portare ad un utilizzo più efficiente delle risorse. Implementando sistemi di notifica basati su soglie, eseguendo elaborazioni preliminari sui dispositivi di acquisizione e gestendo con maggior flessibilità la registrazione dei dati ambientali, è possibile ridurre la quantità di dati inviati al server e migliorare il calcolo distribuito, aumentando l'efficienza complessiva del sistema di monitoraggio.

B. <u>Analisi termografica robotizzata;</u>

- STATO ATTUALE



L'applicazione del metodo termografico per questa finalità è sicuramente più complessa, e richiede necessariamente una sollecitazione termica delle superfici (intradossi), per far emergere eventuali anomalie termiche che vanno correttamente interpretate. In questo caso la termografia consente di: verificare la struttura e l'orientamento del solaio; intercettare la presenza di travi a spessore e rompi tratta; intercettare parti di intonaco decoese dal supporto, criticità diffuse o localizzate; verificare eventuali cambiamenti della struttura; verificare i punti di sospensione di controsoffitti, impianti etc..., se correttamente fissati agli elementi portanti della struttura. Anche in queste applicazioni, il vantaggio della termografia si traduce nella non invasività del metodo, per verificare in tempi rapidi superfici estese, consentendo di creare una mappatura particolarmente precisa delle anomalie, anche in fase di verifica, potendo stabilire i relativi livelli di rischio e le priorità d'intervento. Le applicazioni in tempi successivi consentono di realizzare una sorta di monitoraggio per il controllo delle variazioni delle condizioni fisiche dei solai.

- PROSPETTIVE SUGGERITE

Sistema di rilievo termografico robotizzato a doppio asse da applicare per le misure non distruttive a strutture a rischio sfondellamento

B. <u>Analisi sonica con camera acustica e strumento robotizzato;</u>

- STATO ATTUALE

L'analisi sonica si basa sul principio della diversa "risposta" delle onde sonore generate da impulsi che si propagano nella struttura nei punti di campionamento. Tale metodologia, è di tipo puntuale, non è invasiva, generalmente viene applicata ad integrazione di altre tecniche, per ulteriori verifiche nei punti in cui sono già stati riscontrati difetti costruttivi e anomalie. Il metodo, infatti, essendo di tipo puntuale, risulta più dispendioso per indagare grandi superfici. Anche questa metodologia risulta

più complessa, e richiede una buona esperienza dell'operatore, specie per la corretta interpretazione dei dati acquisiti.

Sviluppi con tecnologia di analisi basata su camera acustica dotata di strumento di rilievo robotizzato

- PROSPETTIVE SUGGERITE

Si suggerisce nuova linea di ricerca basata su impiego della Camera Acustica e relativa strumentazione di rilievo robotizzata per misure non distruttive.

Essa costituisce una soluzione all'avanguardia per la misurazione e l'analisi acustica. La telecamera acustica fornisce rappresentazioni visive dettagliate e accurate dei campi sonori, consentendo agli utenti di identificare e risolvere rapidamente eventuali problemi di qualità del suono. La camera acustica consente di mostrare livelli sonori accurati e di rilevare e visualizzare da dove proviene un suono specifico. Consente di avere tutte le informazioni acustiche necessarie disponibili in tempo reale, sia in laboratorio che sul campo. Basta puntare e scattare in automatico per avere i risultati visualizzati. La misura con la camera acustica consente in tempo reale la visualizzazione del campo sonoro proveniente da una data superficie.

È possibile evidenziare la presenza di rumori indesiderati o comparsa di eventuali sorgenti sonore non desiderate, consente di individuare la presenza fessurazioni e microcricche dovute all'insorgere delle fasi iniziali di crisi statiche. La camera, preferibilmente, sarà dotata di 64 microfoni; essa sarà in grado di fornire informazioni sulla localizzazione del rumore e sulle misurazioni del livello sonoro, inclusi uno spettro e uno spettrogramma, il tutto rilevato con sistema robotizzato.

10. BIBLIOGRAFIA

- Biemme Biagiotti, sito internet: https://www.biemmebiagiotti.com/
- Catania, M. Sfondellamento dei solai in latero-cemento: Calcolo delle azioni agenti sui blocchi di solaio e dello SLE per deformazione. Dario Flaccovio Editore, 2014
- Dstrelec; sito internet: https://www.distrelec.it
- Fibernet; sito internet: https://www.fibrenet.it
- HTM Sensors; sito internet: https://www.htmsensors.com/
- Infobuild; sito internet: https://www.infobuild.i
- https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/landing-page-files/rinforzo-strutturale/interventi-su-elementi-non-portanti/np_3b.pdf?sfvrsn=1edcc978_2
- Innovative Sensor Technology: https://www.ist-ag.com
- Ingenio; sito internet: https://www.ingenio-web.it
- ITSensor; sito internet: https://www.itsensor.it
- https://isnca.org/it/accelerometro-e-giroscopio-qual-%C3%A8-la-differenza/
- Knauf; sito internet: https://www.knauf.it
- https://it.emcelettronica.com/sensori-di-campo-magnetico-e-loro-applicazioni
- Mecatti, G.; Sfondellamento dei solai e caduta dei controsoffitti – Cause, indagini ed interventi di messa in sicurezza. Grafill, 2016.
- https://www.ediltecnico.it/95232/vibrazioni-e-danni-agli-edifici/
- Multicomp; sito internet: https://multicomp-pro.com/
- Relazioni tecniche interne redatte da tecnici BRT s.r.l.
- Samyoung; sito internet: https://www.samyoung.co
- Sicurtecto; sito internet: https://sicurtecto.it

- Sistemi costruttivi; sito internet: https://www.sistemicostruttivi.it)
- Teknoring; sito internet: https://www.teknoring.com/
- Vanoncini; sito internet: https://www.vanoncini.it
- https://www.wikiwand.com/it/Pitting
- "Introduction to Reducing HST
- Data":http://www.stsci.edu/instruments/wfpc2/Wfpc2_dhb/intro_preface.html
- "An array module for Python": http://stsdas.stsci.edu/numarray/ADASSpaper.html
- Richard White home page: http://sundog.stsci.edu/rick
- (EN) Sito ufficiale, su python.org. Modifica su Wikidata
- (EN) Opere riguardanti Python, su Open Library, Internet Archive. Modifica su Wikidata
- (EN) Python, su GitHub. Modifica su Wikidata
- Repository sorgenti di Python, su github.com. Modifica su Wikidata
- Sito di segnalazione bug, su github.com. Modifica su Wikidata
- (EN) Documentazione ufficiale, su python.org.
- Documentazione italiana, su python.it.
- Python.it - Sito italiano dedicato alla programmazione in Python
- Pensare da informatico Introduzione alla programmazione attraverso Python
- Guida di Python, su python.it.
- https://www.python.it/about/
- PyCon Italia, su pycon.it. - Sito della conferenza italiana ufficiale su Python
- Micha Gorelick, Ian Ozsvald, Python alla massima potenza. Programmazione pratica ad alte prestazioni, Milano, Hoepli, 2015, p. 376, ISBN 9788820367015.
- Mark Lutz, Imparare Python, Milano, Tecniche Nuove, 2011, p. 1097, ISBN 9788848125956.

- (EN) Luciano Ramalho, Fluent Python: Clear, Concise, and Effective Programming, O'Reilly Media, 2015, p. 792, ISBN 9781491946008.
- https://oberon.roma1.infn.it/federico/lime2002/

BRT