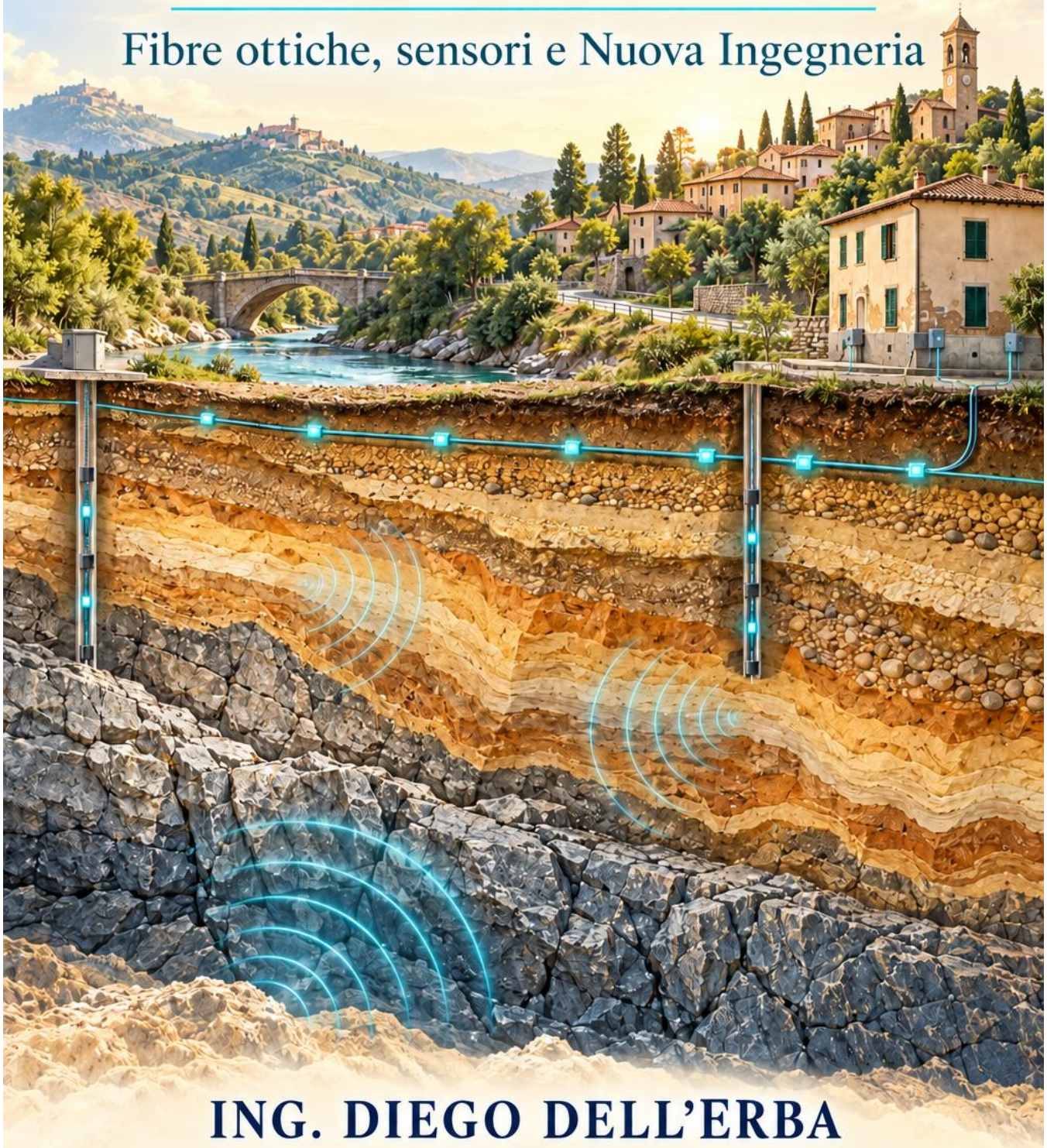
ASCOLTARE LA TERRA

Fibre ottiche, sensori e Nuova Ingegneria



ING. DIEGO DELL'ERBA

Una ricerca in corso con docenti universitari e ricercatori

ANNO 2026

Ascoltare la Terra

Fibre ottiche, sensori e Nuova Ingegneria

Comprendere il suolo e il sottosuolo

Collegare le misure alle decisioni per la sicurezza

Ricerca in corso dell'Ing. Diego Dell'Erba
con la collaborazione di docenti universitari e ricercatori

Ingegnere nucleare – Multidisciplinare
La Nuova Ingegneria / Cyber Physical Engineering

Edizione divulgativa • Ottobre 2026

Preparato per il confronto scientifico e istituzionale
Convegno di Fiumicino del 4 dicembre 2026

La copertina è un'illustrazione concettuale. Le immagini interne spiegano principi e relazioni e non rappresentano dati sperimentali o siti già strumentati. I riferimenti numerati rimandano alle fonti alla fine del volume.

Prefazione

Torna all'indice

Quando guardiamo un edificio vediamo le facciate, i materiali e le forme. Quando attraversiamo un ponte osserviamo la carreggiata, le pile e il paesaggio. Il terreno che sostiene queste opere rimane invece quasi interamente nascosto. Eppure parte della loro storia si svolge proprio lì, nel contatto tra fondazioni e suolo, nella circolazione dell'acqua e nella propagazione delle vibrazioni.

Comprendere questa storia significa mettere in relazione discipline diverse. La geofisica studia le onde e il sottosuolo; la geotecnica interpreta il comportamento dei terreni;

l'ingegneria strutturale valuta le costruzioni. La fotonica fornisce nuovi strumenti di misura. L'informatica organizza quantità di dati che nessuno potrebbe esaminare una registrazione alla volta. La collaborazione tra queste competenze è il punto di partenza della ricerca che presento in queste pagine.

Ho scelto il titolo Ascoltare la Terra perché rende immediata una possibilità scientifica: raccogliere segnali deboli, seguirne il percorso e cercare di comprenderne il significato. La parola ascoltare è una metafora. Gli strumenti di cui parleremo non ascoltano come un orecchio umano; misurano variazioni fisiche e le trasformano in dati.

Il libro nasce dal percorso della Nuova Ingegneria e dalla ricerca in corso che promuovo con la collaborazione di docenti universitari e ricercatori. La domanda è concreta: come collegare le osservazioni del territorio alle misure sulle opere, in modo da migliorare la conoscenza e sostenere decisioni responsabili? La fibra ottica costituisce uno degli strumenti di questa ricerca, insieme ai modelli fisici e al giudizio professionale.

Alcune risposte sono già documentate nella letteratura scientifica. Altre sono ipotesi di lavoro, da sottoporre a prove e confronti. Il lettore troverà entrambe, riconoscibili nel testo. La disponibilità di una tecnologia non dimostra da sola la sua efficacia in qualunque luogo: per ogni applicazione occorre capire che cosa si misura, che cosa rimane incerto e quale decisione sia giustificata.

La sicurezza richiede questa disciplina. Un dato acquista valore quando sappiamo da dove proviene e quali limiti possiede. Un modello è utile quando accetta il confronto con la realtà. L'intelligenza artificiale può aiutarci a esaminare i segnali, ma la responsabilità di comprenderli e di agire resta alle persone.

Indice interattivo

Fai clic su una voce per aprire il capitolo. In Word, se richiesto dalle impostazioni, usa Ctrl e clic.

Prefazione 1

1 La parte nascosta delle nostre opere 4

2 Una fibra che trasporta luce e informazioni 6

3 Che cosa misura davvero il sensore 8

4 Le esperienze scientifiche e il percorso di ricerca 10

5 Dai segnali alla conoscenza del sottosuolo 12

6 Quando il modello digitale incontra la realtà 14

7 Intelligenza artificiale e ricerca 16

8 Costruire una ricerca applicativa verificabile 18

Epilogo 20

Parole per orientarsi 21

Bibliografia 23

Curriculum di Diego Dell'Erba 24

Dedica ad Antonietta 25

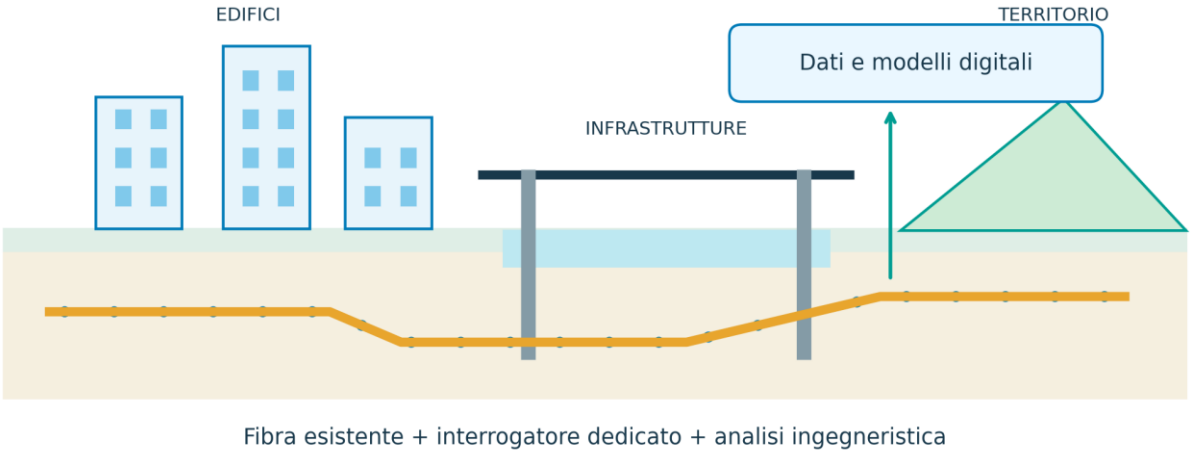
CAPITOLO 1

La parte nascosta delle nostre opere

Torna all'indice

Immaginiamo una strada di città in una mattina ordinaria. Passano automobili e autobus, una macchina lavora in un cantiere, un treno attraversa un tratto poco distante. Ogni attività trasferisce al terreno una parte della propria energia. Le vibrazioni si propagano, cambiano attraversando materiali diversi e raggiungono punti nei quali non sono più percepibili dalle persone. Il paesaggio apparentemente immobile contiene una continua attività dinamica.

Un terremoto produce un fenomeno di altra origine e può coinvolgere scale e intensità molto diverse. Anche in questo caso l'energia si propaga attraverso le rocce e i terreni sotto forma di onde. La risposta locale dipende dalle caratteristiche dei materiali, dalla geometria degli strati e dalle condizioni del sito. L'opera costruita riceve questa sollecitazione attraverso il rapporto con il terreno e le fondazioni.



Il territorio e le costruzioni condividono lo stesso sistema fisico. Illustrazione concettuale, non riferita a un sito strumentato.

Per l'ingegnere, conoscere soltanto la forma della costruzione è quindi insufficiente. Una valutazione richiede informazioni sui materiali, sui vincoli, sui carichi e sul sito. Il monitoraggio aggiunge una possibilità: osservare come il sistema risponde nel tempo, confrontando le misure con ciò che il modello ci porta ad attendere.

La ricerca qui raccontata parte da questa esigenza. È interessante misurare una deformazione su un elemento strutturale; diventa ancora più utile capire a quale azione e a quali condizioni essa corrisponda. Le osservazioni sul territorio e quelle sull'opera possono aiutarsi reciprocamente, purché siano confrontabili per posizione, tempo e significato fisico.

Una misura non contiene automaticamente la spiegazione del fenomeno. Se un sensore registra un aumento di vibrazione, l'origine può essere un cambiamento del traffico, un'attività di cantiere, una diversa risposta del terreno o una modifica del sistema osservato. Il compito tecnico consiste nel valutare queste possibilità e cercare riscontri. È lo stesso metodo con cui si affronta un'indagine: una traccia apre domande e acquista significato insieme ad altre tracce.

Questo modo di lavorare cambia anche il rapporto con il tempo. Un sopralluogo fotografa una situazione; una serie di misure permette di osservarne l'evoluzione. Le due informazioni si completano. I dati possono indirizzare un'ispezione verso un punto particolare, mentre l'ispezione può spiegare una variazione che il solo segnale non chiarisce.

La continuità delle osservazioni richiede però una condizione iniziale di riferimento. Occorre sapere come il sistema si comporta nelle diverse situazioni ordinarie: con traffico intenso o ridotto, con temperature differenti, durante e dopo la pioggia. Se questa variabilità non viene riconosciuta, rischia di essere scambiata per un'anomalia.

Per questo il progetto di monitoraggio comincia dalla domanda, prima ancora che dalla scelta dello strumento. Vogliamo riconoscere eventi? Conoscere un terreno? Seguire una deformazione? Valutare una risposta strutturale? Ogni domanda richiede una geometria delle misure, una frequenza di acquisizione e un criterio di verifica appropriati.

La densità dei dati, da sola, non risolve il problema. Molte misure della stessa grandezza possono lasciare inosservato un fenomeno che agisce in un'altra direzione o a una diversa scala. L'ingegneria deve quindi progettare anche ciò che si vuole conoscere, scegliendo gli strumenti in funzione delle informazioni necessarie.

La parte nascosta delle opere diventa più comprensibile quando terreno, struttura e ambiente vengono considerati insieme. Questo è il primo passo del percorso: accettare

che la sicurezza non si esaurisca nella fotografia di un oggetto, ma richieda la comprensione delle sue relazioni e della sua evoluzione.

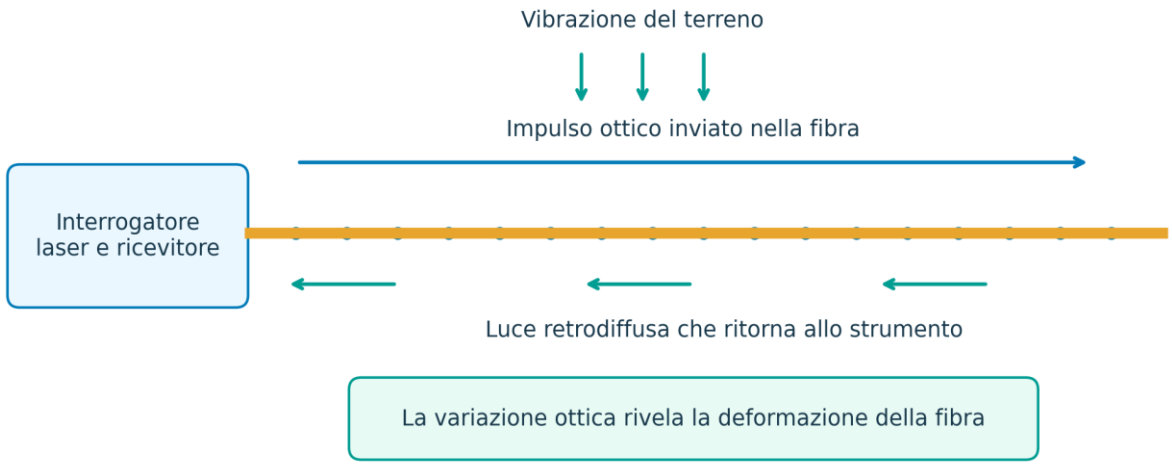
CAPITOLO 2

Una fibra che trasporta luce e informazioni

Torna all'indice

Una fibra ottica è una guida per la luce. Nelle telecomunicazioni permette di trasferire informazioni attraverso segnali ottici. Un cavo contiene una o più fibre, protette da rivestimenti che ne consentono l'installazione e l'esercizio. Lo stesso oggetto che collega luoghi lontani può, con strumenti appropriati, fornire informazioni su ciò che gli accade intorno.

La tecnologia chiamata Distributed Acoustic Sensing, abbreviata in DAS, sfrutta una proprietà della propagazione ottica. Un interrogatore invia impulsi laser nella fibra. Una piccola frazione della luce ritorna lungo il percorso per retrodiffusione Rayleigh, associata alle microscopiche variazioni del materiale. Questo ritorno esiste anche quando il cavo non è attraversato da una vibrazione. [2]



Il principio della DAS. La luce è già retrodiffusa lungo la fibra; la deformazione modifica il segnale che ritorna.

Se la fibra si deforma, cambiano il percorso ottico e il segnale osservato. Analizzando le variazioni, lo strumento ricava informazioni sulla deformazione lungo il cavo. Il tempo

impiegato dalla luce per andare e tornare consente di associare la misura a una posizione ottica. Si ottiene così una serie distribuita di osservazioni. [2, 3]

L'immagine più utile è quella di un percorso di misura, più che di un solo sensore collocato in un punto. La fibra permette di seguire il passaggio di una perturbazione lungo un tracciato. Il dato finale possiede quindi due riferimenti essenziali: il tempo e la posizione. È questa struttura che rende interessanti le reti esistenti per lo studio di fenomeni estesi.

La trasformazione di un cavo in uno strumento di osservazione richiede un sistema. Occorrono l'interrogatore, la disponibilità della fibra, una configurazione ottica compatibile e una gestione adeguata dei dati. Il percorso deve essere conosciuto: la distanza misurata dalla luce non basta, da sola, a stabilire la posizione geografica di ogni tratto.

Una fibra che non trasporta traffico dati viene comunemente chiamata dark fiber. Essa offre spesso una strada più semplice per la sperimentazione, perché può essere dedicata alla misura. Anche in questo caso bisogna verificare giunti, attenuazione, accessibilità e caratteristiche della linea. La rete non è un supporto neutro: la sua storia costruttiva e le sue condizioni possono influenzare il risultato.

Le fibre attive richiedono un'attenzione specifica. Condividere lo stesso collegamento tra comunicazione e rilevamento non è una proprietà automaticamente disponibile in ogni rete. La compatibilità dipende dalla soluzione adottata e deve essere concordata con il gestore. La letteratura descrive anche tecniche che analizzano la polarizzazione della luce su collegamenti attivi; si tratta di approcci distinti dalla DAS, con prestazioni e modalità di localizzazione proprie. [4]

Riutilizzare una linea esistente può evitare nuovi scavi e offrire un tracciato già disponibile. Ciò rende il tema interessante anche per le amministrazioni. Per valutarne la convenienza servono però tutti i costi: accesso alla fibra, strumenti, acquisizione, calcolo, manutenzione e interpretazione specialistica. Un cavo già posato riduce una parte del problema, non elimina il progetto.

Il potenziale delle reti ottiche dipende quindi dall'incontro fra due infrastrutture. La prima è fisica e comprende cavi, cavidotti e punti di accesso. La seconda è conoscitiva:

modelli, algoritmi, controlli e persone capaci di interpretare le misure. Senza questa seconda infrastruttura, anche una grande quantità di segnali può rimanere inutilizzata.

La luce rende possibile la misura; è il metodo a renderla utile. Nei capitoli successivi entreremo proprio in questo passaggio, che separa la disponibilità di un segnale dalla comprensione del fenomeno.

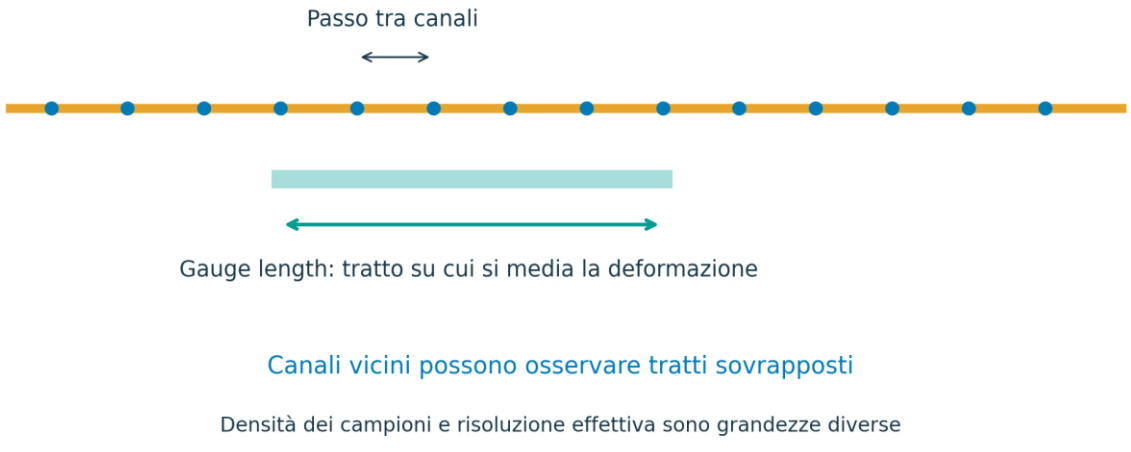
CAPITOLO 3

Che cosa misura davvero il sensore

Torna all'indice

La domanda più importante davanti a uno strumento è anche la più semplice: quale grandezza stiamo misurando? Nella DAS la risposta riguarda prevalentemente la deformazione assiale della fibra, oppure la sua variazione nel tempo, secondo lo strumento e il tipo di uscita. Non osserviamo direttamente tutte le componenti del moto del terreno. [3]

Per piccole deformazioni, il rapporto tra variazione di lunghezza e lunghezza iniziale si scrive $\varepsilon = \Delta L / L$. Se un tratto lungo un metro cambia lunghezza di un micrometro, la deformazione è pari a un microstrain. Questo esempio serve a comprendere l'unità di misura e non descrive la sensibilità di una specifica installazione.



Passo tra canali e lunghezza di misura. Lo schema mostra perché campioni ravvicinati possono contenere informazioni correlate.

La misura viene riferita a un tratto di fibra, chiamato gauge length, sul quale si valuta una deformazione media. È una lunghezza diversa dal passo spaziale con cui sono riportati i canali. Due canali vicini possono utilizzare tratti in parte sovrapposti. Aumentare il numero dei campioni non significa quindi ottenere lo stesso numero di strumenti indipendenti. [3]

La distinzione ha conseguenze pratiche. Una mappa molto fitta può apparire estremamente dettagliata, ma il dettaglio effettivamente risolvibile dipende anche dalla risposta strumentale, dalle frequenze e dalla lunghezza della media spaziale. La qualità dell'informazione non si giudica contando soltanto i punti visualizzati.

L'orientamento conta. Una fibra distesa in una direzione risponde al campo di deformazione secondo quella direzione. Lo stesso evento può essere registrato con ampiezze diverse da tratti orientati diversamente. È una proprietà della misura da includere nel modello, non un difetto da ignorare. [3]

Conta anche il modo in cui il terreno trasferisce la deformazione al vetro. Una fibra dentro un cavo, a sua volta inserito in un cavidotto, è separata dall'ambiente da materiali e contatti. Rivestimenti, giochi, attriti e posa possono modificare il trasferimento. Una buona registrazione in un punto non dimostra che tutto il percorso abbia lo stesso comportamento. Gli studi sull'accoppiamento effettivo affrontano proprio questo problema. [5]

Il confronto con gli strumenti tradizionali richiede la stessa attenzione. Un accelerometro misura accelerazione; un sismometro possiede una propria risposta al moto; la fibra restituisce un'informazione sulla deformazione. Per confrontare i risultati bisogna considerare le relazioni fisiche e le risposte strumentali. Non esiste una trasformazione universale che renda ogni traccia DAS equivalente a qualunque registrazione sismometrica.

Immaginiamo due punti del terreno che si muovano insieme senza cambiare distanza reciproca. Il loro spostamento può essere apprezzabile, mentre la deformazione tra essi resta piccola. Questo esempio aiuta a capire perché movimento e deformazione non siano sinonimi. Per leggere una misura occorre sapere a quale relazione fisica essa è sensibile.

Anche il tempo deve essere controllato. Se si confrontano più strumenti, un errore di sincronizzazione può alterare la ricostruzione della propagazione delle onde. Se si studiano cambiamenti lenti, bisogna riconoscere derive e variazioni ambientali. Un dato privo di configurazione e riferimenti può diventare difficile da interpretare anche quando appare perfettamente leggibile.

La progettazione della misura comprende perciò sensore, installazione e interpretazione. Tracciato, banda, risposta e incertezza devono accompagnare i numeri. È questa conoscenza che permette all'ingegnere di stabilire quando un'osservazione sia una base adeguata per una conclusione.

CAPITOLO 4

Le esperienze scientifiche e il percorso di ricerca

Torna all'indice

Le nuove applicazioni diventano credibili quando escono dalla sola idea e affrontano il confronto con misure reali. Le ricerche del professor Biondo Biondi e dei suoi collaboratori a Stanford hanno contribuito a questo passaggio nell'uso delle fibre ottiche per l'osservazione sismica. Biondi è docente di Geofisica e dirige lo Stanford Earth Imaging Project. Il suo lavoro riguarda l'elaborazione dei segnali e la ricostruzione del sottosuolo. [2]

Una delle ragioni di interesse è l'impiego di fibre inserite nelle infrastrutture di telecomunicazione. La domanda scientifica è se e come queste linee, non progettate originariamente come una rete sismica, possano produrre informazioni utili. La risposta richiede prove sul campo, confronto con altri strumenti e metodi capaci di trattare rumore e grandi volumi di dati.

Huot, Clapp e Biondi hanno utilizzato tre anni di registrazioni del campus di Stanford per addestrare una rete neurale al riconoscimento di terremoti locali. Il lavoro mostra che il trattamento automatico può estrarre eventi da acquisizioni continue e contribuire alle osservazioni delle reti tradizionali. Il risultato riguarda quel problema di riconoscimento e le condizioni in cui il metodo è stato verificato. [6]

Yuan, Lellouch, Clapp e Biondi hanno invece studiato la caratterizzazione del terreno mediante onde superficiali prodotte dal traffico e da terremoti. Le stime sono state confrontate con un'indagine geofonica fino a circa cinquanta metri nel sito esaminato. La profondità è una proprietà di quel caso di studio e non una promessa trasferibile a ogni cavo o territorio. [7]

Un altro lavoro, di Liu e collaboratori, fra cui Biondi, impiega circa cinquanta chilometri di fibra a San Jose per osservare la distribuzione di sorgenti di vibrazione urbana. Cambia la scala della domanda: dalla singola traccia si passa alla lettura di fenomeni distribuiti in città. Anche qui percorso disponibile e metodo di analisi determinano che cosa si può ricavare. [8]

Il mio interesse si inserisce nel percorso della Nuova Ingegneria e nell'integrazione fra costruzione, monitoraggio e conoscenza. Il terreno scientifico sul quale sviluppare il confronto è concreto: le tecnologie ottiche hanno già consentito osservazioni utili, mentre la loro connessione con i problemi specifici dell'ingegneria richiede progettazione e verifiche dedicate.

Un precedente documentato è il lavoro pubblicato su Ingenio il 4 dicembre 2023, intitolato "Rinforzo e monitoraggio strutturale: primi prototipi di un sistema integrato". Ne sono coautore con Stefano De Santis, Michele Arturo Caponero e altri collaboratori. L'articolo descrive una fase sperimentale di integrazione tra rinforzi CRM e sensori FBG e il confronto delle deformazioni con misure ottenute mediante correlazione digitale di immagini. [1]

Quella pubblicazione documenta un gruppo multidisciplinare che comprende Roma Tre, ENEA e soggetti industriali e professionali. Il tema riguarda elementi rinforzati e misura delle deformazioni. La prospettiva di questo libro amplia il quadro al rapporto fra territorio e costruzione: quali dati raccogliere intorno all'opera e in che modo coordinarli con quelli prodotti dai sensori strutturali?

La ricerca in corso che promuovo con docenti universitari e ricercatori affronta questo collegamento. L'apporto di ciascuna disciplina è necessario: la fotonica chiarisce ciò che lo strumento osserva, la geofisica studia le onde, la geotecnica interpreta i terreni e l'ingegneria strutturale valuta il comportamento dell'opera. L'analisi dei dati deve rispettare queste relazioni fisiche.

Una ricerca progredisce anche definendo bene ciò che resta da dimostrare. I risultati di un sensore FBG su un rinforzo non validano automaticamente un'applicazione DAS nel sottosuolo. Un buon metodo di riconoscimento dei terremoti non coincide con una diagnosi del danno. Ogni passaggio richiede una domanda e un confronto specifici.

È questo il senso della collaborazione scientifica: rendere più precisa la domanda, individuare le prove necessarie e sottoporre i risultati a esame critico. Le pubblicazioni di riferimento forniscono una base; la ricerca applicativa deve costruire la propria dimostrazione nel sito e per l'obiettivo scelti.

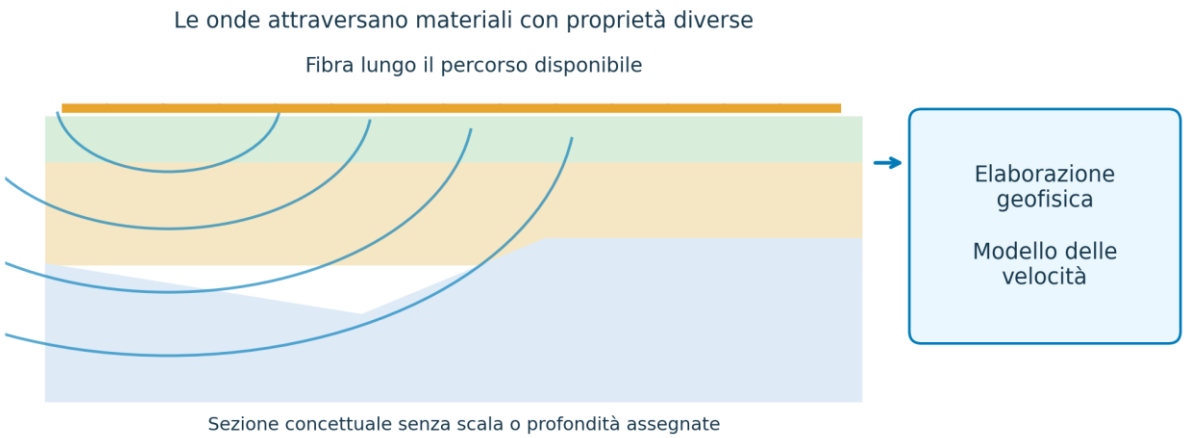
CAPITOLO 5

Dai segnali alla conoscenza del sottosuolo

Torna all'indice

Una registrazione non è una fotografia del sottosuolo. La fibra ci consegna una risposta al passaggio delle onde; per risalire alle proprietà dei materiali bisogna interpretare quella risposta. È un problema inverso: si parte dagli effetti osservati per cercare un modello delle condizioni che possono averli prodotti.

Le onde attraversano il terreno con modalità che dipendono dalle proprietà e dalla geometria dei materiali. Analizzare tempi di arrivo, frequenze e propagazione lungo il percorso può aiutare a stimare parametri come la velocità delle onde di taglio. Queste informazioni concorrono alla conoscenza della risposta dinamica del sito, insieme alle indagini geologiche e geotecniche. [7]



La ricostruzione del sottosuolo richiede interpretazione e modelli. Il disegno è concettuale e non rappresenta una sezione geologica reale.

Il traffico può essere una sorgente utile per alcune indagini passive. Le onde generate dai veicoli attraversano il terreno e vengono registrate lungo la fibra. L'impiego di sorgenti ambientali permette di osservare fenomeni senza produrre ogni volta un'eccitazione dedicata, ma richiede di comprendere quali sorgenti siano presenti e quanto siano stabili.

Si possono anche utilizzare sorgenti controllate e confrontare i segnali della fibra con geofoni. Uno studio di acquisizione attiva pubblicato nel 2025 documenta questo tipo di impostazione. Non propone una superiorità universale di una tecnologia: per trasferire i risultati occorre considerare posa, geometria, frequenze e caratteristiche dell'indagine. [9]

La profondità che si riesce a esplorare non dipende soltanto dalla lunghezza del cavo. Conta il campo delle onde effettivamente osservato: quali frequenze sono presenti, con quali lunghezze d'onda, con quale rumore e lungo quali direzioni. Un tracciato esteso può essere utile, ma non garantisce automaticamente una ricostruzione profonda o dettagliata.

Anche l'unicità della soluzione richiede attenzione. Modelli differenti possono spiegare parte degli stessi dati. Le indagini indipendenti aiutano a ridurre le ambiguità: stratigrafie, prove geotecniche, misure geofisiche convenzionali e rilievi forniscono vincoli. Il modello diventa più credibile quando riesce a spiegare informazioni che non sono state usate per costruirlo.

Se l'acquisizione viene ripetuta, si può studiare l'evoluzione della risposta. Ma una differenza fra due registrazioni può dipendere da sorgenti diverse, condizioni ambientali o modifiche del contatto tra cavo e terreno. Per attribuirla a un cambiamento del sottosuolo bisogna esaminare e, per quanto possibile, escludere queste spiegazioni alternative.

Pensiamo a un pendio. La fibra potrebbe fornire informazioni su vibrazioni o deformazioni lungo un percorso opportuno. Per comprendere un eventuale movimento servono però anche geometria del versante, spostamenti, condizioni idrauliche, piogge e interpretazione geologica. La ricerca di un segnale utile va inserita nella conoscenza del processo che si vuole osservare.

Lo stesso vale vicino a una fondazione. Una variazione del segnale non dimostra da sola un cedimento. La diagnosi richiede misure appropriate al fenomeno e un confronto con il comportamento dell'opera. Se la rete di telecomunicazione non attraversa la zona rilevante, può essere necessario integrare la strumentazione o riconoscere che quella domanda non è risolvibile con il percorso disponibile.

La qualità di un'indagine si misura quindi nella chiarezza della conclusione e del suo intervallo di validità. Una risposta prudente ma verificata è più utile di una rappresentazione molto dettagliata che non dichiari le proprie ambiguità. La conoscenza del sottosuolo cresce collegando osservazioni diverse, senza attribuire a una sola tecnologia l'intero compito.

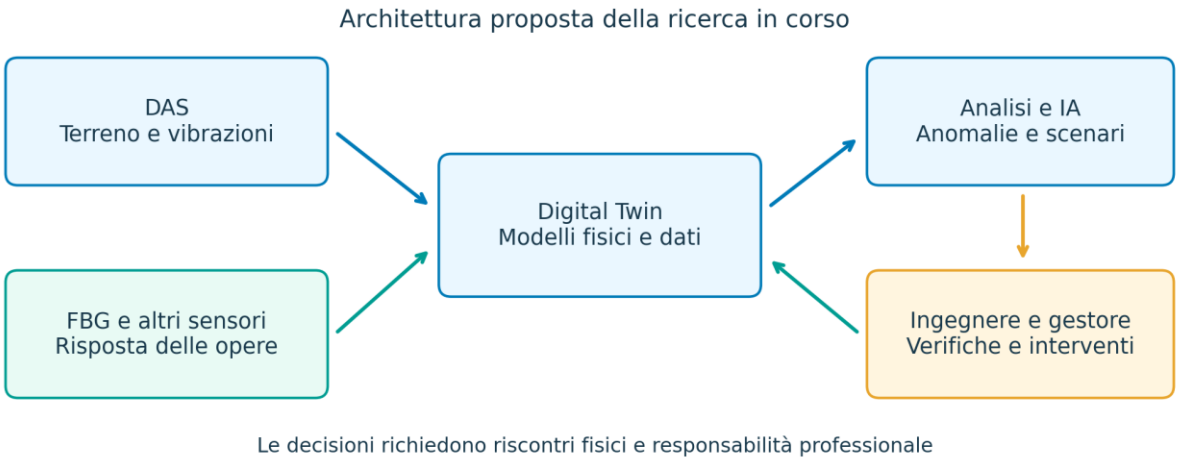
CAPITOLO 6

Quando il modello digitale incontra la realtà

Torna all'indice

Un modello digitale diventa utile quando permette di porre domande all'opera e di confrontare le risposte con la realtà. La sola rappresentazione tridimensionale è un primo livello di descrizione. Per seguire il comportamento occorrono dati, ipotesi fisiche e procedure di aggiornamento. È in questa relazione che si colloca l'idea di Digital Twin adottata nel percorso della Nuova Ingegneria.

Nel sistema proposto dalla ricerca, i dati DAS possono descrivere parte del campo delle vibrazioni e fornire informazioni sul territorio lungo il percorso disponibile. Gli FBG e altri strumenti installati sulle costruzioni osservano invece grandezze scelte in punti o elementi determinati. Non si tratta di tecnologie intercambiabili: ciascuna deve conservare il proprio significato e la propria catena di misura.



Il collegamento proposto tra dati del territorio, risposta delle opere, modelli e decisioni. Architettura concettuale della ricerca.

Gli FBG impiegano reticoli di Bragg. Il segnale ottico può essere utilizzato per misure statiche e dinamiche, tenendo conto degli effetti della temperatura. Un riferimento è il progetto PREFOS di ENEA, che considera l'integrazione della sensoristica nella produzione di elementi prefabbricati. È un esempio della possibilità di predisporre l'osservazione già nella realizzazione dell'elemento. [10]

Collegare misure diverse richiede una lingua comune. Ogni dato deve avere posizione, orario, unità, configurazione e indicazioni sulla qualità. Una variazione registrata sul terreno e una deformazione nell'opera possono essere messe in relazione solo se i riferimenti consentono un confronto fisicamente significativo.

BIM e GIS possono aiutare a organizzare questa conoscenza. Il primo descrive geometrie, componenti e informazioni dell'opera; il secondo collega dati e fenomeni al territorio. I modelli geotecnici e strutturali introducono le relazioni tra azioni, proprietà e risposte. La ricerca deve stabilire come passare dall'archivio ordinato alla verifica del comportamento.

Aggiornare un modello significa modificare ipotesi o parametri alla luce delle osservazioni. Non dovrebbe diventare un adattamento arbitrario per far coincidere

qualsiasi curva. Una correzione è interessante quando mantiene coerenza fisica e migliora la capacità di spiegare dati indipendenti. Se migliora soltanto il confronto con i dati già usati, può offrire una fiducia apparente.

Immaginiamo di osservare una risposta diversa da quella attesa. Si può verificare innanzitutto lo strumento; poi il carico e l'ambiente; infine le ipotesi del modello. Questa sequenza evita di attribuire subito alla struttura una modifica che potrebbe dipendere dalla misura o dalle condizioni esterne. Il modello deve sostenere l'indagine, non decidere in anticipo la spiegazione.

La manutenzione predittiva richiede un passaggio ulteriore. Riconoscere una variazione è una capacità; collegarla a un meccanismo di degrado e stimarne l'evoluzione è un'altra. Occorrono conoscenze sui materiali, sulla storia delle azioni e sui processi che determinano il deterioramento. La previsione dovrebbe essere accompagnata dall'incertezza e aggiornata quando arrivano nuovi riscontri.

Un esito utile può essere anche una decisione più semplice: effettuare un'ispezione mirata, ripetere una prova o aumentare temporaneamente la frequenza di acquisizione. Non tutte le anomalie richiedono un modello complesso della vita residua. Il valore del sistema sta nella capacità di sostenere l'azione appropriata alla qualità delle informazioni disponibili.

L'opera fisica rimane il riferimento. Le sue condizioni devono poter mettere in discussione il modello. Il gemello digitale offre un luogo nel quale organizzare questa verifica nel tempo, conservando le ipotesi e le ragioni delle decisioni. È così che il monitoraggio può contribuire alla gestione dell'intero ciclo di vita.

CAPITOLO 7

Intelligenza artificiale e ricerca

Torna all'indice

Una rete di osservazione continua produce più dati di quanti una persona possa esaminare manualmente. Qui l'intelligenza artificiale può offrire un contributo concreto: selezionare intervalli interessanti, riconoscere configurazioni ricorrenti e mettere in

evidenza scostamenti. Il suo impiego deve partire da un compito definito, non dal desiderio generico di aggiungere un algoritmo.

Il lavoro di Huot, Clapp e Biondi sul riconoscimento dei terremoti mostra un'applicazione specifica delle reti neurali a dati DAS. Da questo precedente si ricava l'interesse dell'automazione, mentre la diagnosi di un danno o la previsione di un dissesto richiedono problemi di apprendimento e dati differenti. [6]

Nel programma di ricerca propongo una catena che comincia prima della classificazione. Si controllano i file, gli orari, i canali mancanti, le saturazioni e le interruzioni. Si individuano poi intervalli significativi e si descrivono i segnali in modo confrontabile. Soltanto a questo punto si valutano classificazione, ricerca di anomalie e confronto con i modelli.

Un algoritmo può riconoscere la regolarità del traffico senza comprendere il fenomeno che interessa all'ingegnere. Se il suo risultato cambia in un giorno festivo, bisogna sapere se abbia individuato una modifica strutturale o semplicemente un diverso uso della strada. La qualità dell'etichetta e del riferimento fisico conta quanto la complessità del metodo.

Un'altra attenzione riguarda la verifica. Se nell'apprendimento e nella prova compaiono registrazioni quasi identiche dello stesso evento, la prestazione può sembrare eccellente senza dimostrare la capacità di affrontare un caso nuovo. Per questo si propone di separare intervalli temporali e, quando possibile, tratti di rete o siti.

La verifica deve contare anche gli errori che risultano meno visibili. Un sistema che segnala molti eventi può produrre numerosi falsi allarmi. Un sistema che ne segnala pochissimi può apparire tranquillo e perdere fenomeni importanti. La scelta delle soglie richiede di conoscere entrambe le conseguenze e di collegarle all'uso previsto.

Nel lavoro quotidiano una segnalazione dovrebbe attivare un percorso graduato. Prima si controlla la qualità del dato; poi si esaminano le condizioni ambientali e le altre misure; infine si valuta se servano un'ispezione o una verifica aggiuntiva. L'algoritmo aiuta a scegliere dove guardare. La diagnosi richiede il confronto tecnico.

La spiegazione deve poter essere ricostruita. È utile conservare la registrazione originaria, la versione del software, la configurazione degli strumenti e i parametri usati. Se una

conclusione viene riesaminata mesi dopo, occorre sapere quali dati e quali regole l'abbiano prodotta. La tracciabilità è una condizione del lavoro scientifico e della gestione professionale.

L'IA può contribuire anche al confronto tra modelli e scenari, purché le proposte rispettino i vincoli fisici e siano controllate. Un parametro numericamente conveniente può essere incompatibile con il terreno o con i materiali. La ricerca deve quindi prevedere controlli che mantengano il collegamento tra calcolo e realtà.

Lo studente e il professionista conservano un compito insostituibile: formulare le domande, scegliere le verifiche e comprendere il limite della risposta. Una previsione presentata con grande sicurezza grafica non diventa per questo più affidabile. La forza di un metodo si riconosce nella possibilità di sottoporlo a una prova che potrebbe anche contraddirlo.

Nel percorso della Nuova Ingegneria l'intelligenza artificiale è uno strumento di supporto al ragionamento. La sua utilità si misura nel miglioramento documentato del lavoro: meno segnali persi, controlli più ordinati, confronti più chiari. Il giudizio e la responsabilità restano all'ingegnere e ai soggetti che devono assumere le decisioni.

CAPITOLO 8

Costruire una ricerca applicativa verificabile

Torna all'indice

Una ricerca applicativa diventa concreta quando sceglie un problema circoscritto. Per il confronto di Fiumicino, il punto di partenza potrebbe essere un tratto di rete disponibile e una domanda precisa: conoscere una porzione di sottosuolo, distinguere sorgenti di vibrazione o studiare il rapporto tra terreno e un'infrastruttura. La scelta richiede il confronto tra interesse ingegneristico e possibilità reali della misura.

La prima ricognizione riguarda la linea. Occorrono percorso, lunghezza ottica, giunti, posa, punti accessibili e disponibilità della fibra. A queste informazioni si aggiungono geologia, indagini esistenti, costruzioni vicine e principali sorgenti antropiche. L'accordo con il gestore serve a definire accesso, compatibilità e condizioni operative.



Un percorso proposto di ricerca applicativa. Le fasi dipendono dai risultati; non rappresentano attività o scadenze già concordate.

Segue una fase di acquisizione di riferimento. Si registrano condizioni differenti e si confronta la risposta con strumenti convenzionali in posizioni motivate. Il risultato atteso è una mappa della qualità: quali tratti funzionano, in quale banda e per quali fenomeni. Una parte del percorso può risultare utile per riconoscere eventi ma meno adatta a valutare ampiezze quantitative.

La collaborazione tra docenti, ricercatori e professionisti permette di discutere le scelte e i controlli. Il programma deve chiarire chi cura la misura ottica, chi interpreta le onde, chi valuta il terreno e chi collega i risultati al comportamento dell'opera. Le responsabilità operative vanno definite insieme agli accordi sul caso di studio.

La validazione deve corrispondere alla domanda iniziale. Se vogliamo riconoscere eventi, contiamo quelli identificati, quelli persi e i falsi positivi. Se vogliamo ricostruire il sottosuolo, confrontiamo i parametri con indagini indipendenti e valutiamo l'incertezza. Se vogliamo sostenere la gestione di una struttura, verifichiamo che le segnalazioni portino a controlli tecnicamente utili.

Gli indicatori dovrebbero essere definiti prima di valutare il risultato finale. Questo evita di scegliere a posteriori soltanto gli esempi riusciti. Vanno documentate anche le condizioni nelle quali il metodo non funziona: rumore eccessivo, geometria sfavorevole, contatto insufficiente o interruzioni. Conoscere questi limiti aiuta a progettare eventuali integrazioni.

Un programma sostenibile considera il lavoro dopo l'installazione. Chi controlla ogni giorno che i dati arrivino? Chi verifica una variazione del sistema? Chi mantiene software e archivi? L'osservazione continua richiede continuità organizzativa, altrimenti un impianto tecnicamente valido può smettere di produrre informazioni utilizzabili.

Anche la gestione dei dati va progettata. Occorre stabilire che cosa conservare, per quanto tempo e con quali livelli di accesso. Le configurazioni e le versioni devono rimanere associate ai risultati. La diffusione delle informazioni sulle reti e sulle opere deve essere concordata con i soggetti responsabili, in relazione alla natura delle infrastrutture e all'uso previsto.

Il passaggio a una rete più estesa dovrebbe dipendere dall'esame del primo tratto. La dimostrazione richiesta non è che il sistema produca molte immagini, ma che risponda alla domanda con prestazioni ripetibili e comprensibili. Anche la decisione di modificare il metodo, aggiungere strumenti o cambiare obiettivo può essere un risultato corretto della ricerca.

La ricerca in corso dell'Ing. Diego Dell'Erba propone questo collegamento tra osservazione del territorio, monitoraggio delle opere e modelli digitali. Il suo sviluppo richiede un confronto scientifico aperto e prove ben progettate. Il contributo atteso è una conoscenza più utilizzabile: dati dai quali sia possibile ricostruire un ragionamento e motivare una decisione.

Epilogo

Torna all'indice

Ascoltare la Terra significa imparare a interpretare una parte dei segnali che attraversano il territorio. Le fibre ottiche rendono possibile una forma distribuita di osservazione; gli strumenti strutturali aggiungono misure sulle opere; i modelli mettono alla prova le spiegazioni. Ogni elemento ha un compito e un limite.

È necessario distinguere il monitoraggio dalla previsione dei terremoti. Un sistema di allerta precoce riconosce un evento già iniziato e può avvisare luoghi non ancora raggiunti dalle onde più dannose. Non annuncia con certezza luogo, data e magnitudo di un futuro

terremoto. La distinzione è chiarita dall'USGS ed è essenziale nella comunicazione delle nuove tecnologie. [11]

La stessa cautela riguarda la sicurezza delle costruzioni. Una rete di sensori può offrire informazioni preziose, ma la riduzione della vulnerabilità richiede verifiche, manutenzione e interventi. Un segnale assente non dimostra l'assenza di danno; una variazione non è ancora una diagnosi. Per decidere servono il confronto con l'opera e il giudizio tecnico.

Il percorso della Nuova Ingegneria cerca di unire capacità di misura e capacità di comprensione. La collaborazione con docenti universitari e ricercatori permette di discutere le ipotesi, scegliere le prove e riconoscere gli errori. L'esperienza professionale porta le domande dei cantieri e delle opere in esercizio; la ricerca offre strumenti per affrontarle con maggiore precisione.

Il progresso di questa ricerca si misurerà nella qualità delle risposte e nelle azioni motivate che sapremo ricavarne, rendendo più consapevole la responsabilità dell'ingegnere.

Parole per orientarsi

Torna all'indice

Accoppiamento. Il modo in cui la deformazione del terreno o della struttura viene trasferita al cavo e alla fibra. Può variare lungo il percorso e influenza la lettura del segnale.

DAS. Distributed Acoustic Sensing. Tecnologia ottica che produce osservazioni distribuite della deformazione assiale della fibra o della sua variazione nel tempo.

Dark fiber. Fibra disponibile e non utilizzata per trasportare traffico dati. La possibilità di dedicarla alla misura deve essere concordata con il gestore.

Digital Twin. Modello digitale collegato a dati del sistema fisico e utilizzato per confrontare comportamento osservato, ipotesi e scenari.

FBG. Fiber Bragg Grating. Reticolo di Bragg in fibra ottica utilizzato per misure in posizioni selezionate; la temperatura va considerata nell'interpretazione delle deformazioni.

Gauge length. Lunghezza del tratto di fibra sul quale si valuta una deformazione media. È distinta dalla distanza nominale tra i canali.

Problema inverso. Ricostruzione di proprietà o condizioni a partire dagli effetti osservati. Può avere soluzioni diverse e richiede vincoli e verifiche indipendenti.

SHM. Structural Health Monitoring. Osservazione del comportamento e delle condizioni di una struttura mediante strumenti e procedure di interpretazione.

Validazione. Verifica di un metodo rispetto allo scopo previsto, mediante confronti e dati adeguati. Deve comprendere errori, limiti e condizioni di applicabilità.

Bibliografia

Torna all’indice

Le fonti seguenti sostengono i principi e i casi di studio richiamati nel testo. Il numero tra parentesi quadre consente di ritrovare la pubblicazione. Le proposte di integrazione e di programma applicativo sono sviluppate nel percorso di ricerca dell’autore. Fonti consultate il 22 ottobre 2026.

[1] Agnetti S., Caponero M. A., De Santis S., Dell’Erba D. e altri. Rinforzo e monitoraggio strutturale: primi prototipi di un sistema integrato. Ingenio, 4 dicembre 2023.

Leggi la fonte

[2] Stanford Report. Building billion sensors quake monitor with optical fibers. 19 ottobre 2017.

Leggi la fonte

[3] Martin E. R., Biondi B., Fabien-Ouellet G., Clapp R. G. Sensitivity analysis of distributed acoustic sensing arrays. Stanford Exploration Project, SEP 170, 2017.

Leggi la fonte

[4] Polarization sensing of network health and seismic activity over a live terrestrial fiber-optic cable. Communications Engineering, 2024. DOI 10.1038/s44172-024-00237-w.

Leggi la fonte

[5] Voyles J., Clapp R. G., Biondi B. Estimating Dark Fiber Effective-Coupling from Passively Recorded Seismic Data. Stanford Earth Imaging Project, SEP 189, 2023.

Leggi la fonte

[6] Huot F., Clapp R. G., Biondi B. L. Detecting local earthquakes via fiber-optic cables in telecommunication conduits under Stanford University campus using deep learning. Preprint, 2022.

Leggi la fonte

[7] Yuan S., Lellouch A., Clapp R. G., Biondi B. Near-surface Characterization Using a Roadside Distributed Acoustic Sensing Array. Preprint, 2020.

Leggi la fonte

[8] Liu J., Li H., Noh H. Y., Santi P., Biondi B., Ratti C. Urban Sensing Using Existing Fiber-Optic Networks. Preprint, 2024.

Leggi la fonte

[9] Application of Distributed Acoustic Sensing for Active Near-Surface Seismic Monitoring. Sensors, 2025. Testo completo in PubMed Central.

Leggi la fonte

[10] ENEA. The Prefos Project. Pubblicazione 2024, pagina aggiornata nel 2025.

Leggi la fonte

[11] U.S. Geological Survey. What is the difference between earthquake early warning, earthquake forecasts, earthquake probabilities, and earthquake prediction.

Leggi la fonte

Curriculum di Diego Dell'Erba

Torna all'indice

Ingegnere nucleare – Multidisciplinare
Profilo aggiornato a ottobre 2026

Profilo professionale

Ingegnere nucleare e professionista multidisciplinare, con oltre cinquant'anni di attività nella progettazione, direzione dei lavori, conduzione di imprese e gestione di opere complesse in Italia e all'estero: edilizia industrializzata, gallerie, porti, acquedotti, dighe, geotecnica, telecomunicazioni e ricostruzione post-sisma.

Formazione

Laureato in Ingegneria nucleare alla Sapienza Università di Roma, con tesi sugli effetti delle radiazioni gamma sui materiali strutturali del vessel del reattore di Caorso.

Ruoli e ambiti di responsabilità

Progettista, direttore dei lavori, dirigente tecnico, direttore generale e amministratore delegato, con esperienze in Vianini, I.CO.RI., Farsura e Sogene. Ha coordinato competenze tecniche, cantieri, processi produttivi e controllo dell'esecuzione.

Esperienze internazionali

A Jeddah, in Arabia Saudita, dal 1978 al 1983: progettazione, costruzione e direzione di uno stabilimento di prefabbricazione per un programma di circa diecimila abitazioni, con responsabilità nella produzione industriale, logistica e qualità.

Nelle Filippine: attività tecnico-organizzative, studi di fattibilità e progettazione nelle telecomunicazioni nell'ambito di una joint venture con SIP italiana; studi e attività tecniche relativi alla diga di San Roque.

Opere e ricostruzione in Italia

Esperienze nelle opere portuali e marittime, nelle infrastrutture idrauliche e nei lavori in sotterraneo, anche con sistemi meccanizzati e TBM. Interventi post-sisma in Irpinia, Molise, L'Aquila e Centro Italia.

Tra i riferimenti: Palazzo Mannetti all'Aquila, nel dialogo con l'Università della Calabria; progettazione e direzione lavori a Colleposta di Accumoli; Castello Malvezzi a Orvinio; dissesto di Roccadarce; ricostruzione della Chiesa di Sant'Agata a Grisciano. Le applicazioni tecnologiche sono valutate per le condizioni e gli obiettivi di ciascun intervento.

Ricerca applicata e collaborazioni

Promuove la Nuova Ingegneria, o Cyber Physical Engineering: integrazione di monitoraggio strutturale, sensori FBG e SOFO, FEM, BIM, GIS, Digital Twin, intelligenza artificiale e manutenzione predittiva. La ricerca del volume collega osservazione del territorio con fibre ottiche e comportamento delle costruzioni, nel confronto con docenti e ricercatori.

Coautore con Stefano De Santis, Michele Arturo Caponero e altri dell'articolo "Rinforzo e monitoraggio strutturale: primi prototipi di un sistema integrato" (Ingenio, 4 dicembre 2023), sulla sperimentazione di rinforzi CRM e sensori FBG con Roma Tre, ENEA e soggetti industriali e professionali. [1]

Divulgazione e orientamento professionale

Elabora studi, relazioni e contenuti divulgativi; promuove incontri tra professionisti, università, ricerca, imprese e amministrazioni. Trasmette esperienza e metodo scientifico alle nuove generazioni, mantenendo giudizio, verifica e responsabilità in capo al professionista.

Ad Antonietta

A mia moglie Antonietta, che da sempre collabora con me e accompagna il mio lavoro con attenzione, intelligenza e affetto.

Latinista e grecista, hai portato nel nostro percorso la cura delle parole, il rigore del pensiero e la profondità della cultura classica.

Con la stessa curiosità ti sei avvicinata all'ingegneria innovativa, condividendo con me domande, progetti e nuove prospettive.

Dal latino e dal greco ai sensori, ai modelli digitali e alle possibilità della Nuova Ingegneria, il tuo contributo mi ricorda quanto sia prezioso l'incontro tra la cultura umanistica e quella scientifica.

Questo libro è dedicato a te, per la collaborazione di sempre e per tutto ciò che continuiamo a costruire insieme.

Con amore e gratitudine.

Diego