Dai disastri alle opportunità.
Il mercato delle tecnologie innovative per la diagnostica,
la gestione *real time* e la prognostica di eventi rischiosi.

27 aprile 2020

L'IoT nella prevenzione del rischio ambientale

Ing. Fabio Di Marino - SOLVENDO SOLUZIONI INFORMATICHE E TECNOLOGICHE

Il progetto "IoT PROTEGGO"

Il progetto "IoT proteggo", finanziato dalla Regione Campania, *Asse 1 – Ricerca e Innovazione – O. S. 1.1 "Incremento dell'attività di innovazione delle imprese": Avviso per il sostegno alle imprese campane nella realizzazione di studi di fattibilità (Fase 1) coerenti con la RIS3,* ha generato lo studio di fattibilità tecnico-economica per la realizzazione di una *Internet of Things* per il monitoraggio di strutture edili e civili, opere pubbliche, beni culturali e ambientali.

La ***Internet of Things*** (IoT) è l'estensione alle *cose (things)* delle modalità d'uso di Internet finora riservate alle persone, che permette agli oggetti di interagire telematicamente con altri oggetti, e quindi con le persone.

Per imparare ad utilizzare una loro Internet, questi oggetti devono sviluppare un po' di intelligenza: si parla quindi di *smart buildings*, ossia di "strutture intelligenti" che sono capaci di generare e scambiare informazioni sul loro stato grazie all'utilizzo di opportuni dispositivi e di reti di sensori.

In questo modo gli *smart buildings* divengono agenti/utenti attivi di una rete, la IoT, sulla quale appositi software sono in grado di elaborare i dati e di impartire ai dispositivi istruzioni in merito alle configurazioni operative, consentendo di eseguire programmi di ***early warning***, ossia di allarme precoce, diffusi non solo a livello di singola struttura, ma estesi ad un'intera località oggetto di osservazione, attuando **la diagnostica, la gestione *real time* e la prognostica di eventi rischiosi**.

Il progetto "IoT PROTEGGO"

Le fasi principali del progetto hanno riguardato tre argomenti di studio:

FASE 1) **RACCOLTA DATI**

FASE 2) **TRASMISSIONE DATI**

FASE 3) **ELABORAZIONE DATI**

FASE 1) **RACCOLTA DATI**

Le problematiche connesse alla raccolta dati sono quelle relative alla sensoristica, nei seguenti aspetti:

a) tecnologico, con il reperimento sul mercato di dispositivi effettivamente disponibili per le esigenze progettuali,

b) fisico, con lo studio della fisica e delle caratteristiche di funzionamento dei sensori, soprattutto in fibra ottica,

c) ingegneristico, con lo studio delle tecniche per la progettazione e per l'effettiva realizzazione del progetto.

FASE 1) **RACCOLTA DATI** – Aspetto tecnologico

Ai fini di una diagnosi completa sullo stato "di salute" dell'opera è necessaria l'integrazione di più tipologie di sensori, in modo da garantire l'acquisizione e la corretta interpretazione di tutti i parametri significativi.

I sensori più rappresentativi dello studio sono i FOSS, ossia i sensori distribuiti in fibra ottica in grado di rilevare, in funzione della posizione sull'ascissa curvilinea della fibra, le variazioni di temperatura e lo *strain*, ossia la risposta a sollecitazioni note (trazione, compressione, taglio, torsione…) in termini di sforzo tensoriale.

Questa tecnologia presenta un vantaggio importantissimo: permette l'individuazione di anomalie strutturali in continuo, lungo diversi km di fibra, consentendo di collegare ad un'unica «unità di misura» l'equivalente di migliaia di sensori puntuali, consentendo di mappare, in tempo reale, lo stato tenso-deformativo della struttura, dunque di identificare, anche in modo predittivo, l'innesco di fenomeni di degrado e la loro precisa ubicazione, con evidenti vantaggi in termini di sicurezza e di economicità nella gestione e pianificazione degli interventi manutentivi.

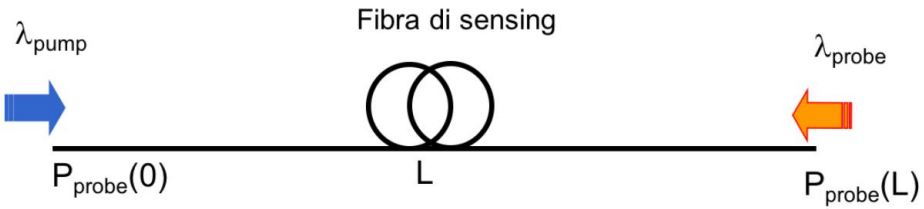
L'installazione di sensori puntuali dedicati, ad esempio, alla misura dei cedimenti dei piani di fondazione, alla rotazione delle pile, all'escursione dei giunti ed alle variazioni del modo proprio di vibrare delle strutture, completeranno il sistema di monitoraggio permettendo, oltre l'identificazione delle anomalie, anche l'individuazione delle cause che le hanno indotte.

FASE 1) **RACCOLTA DATI** – Aspetto fisico

I sensori oggetto di studio sono quelli distribuiti in fibra ottica basati su *scattering Brillouin*.

Il principio deriva dall'interazione fra le onde acustiche e ottiche che si propagano in una comune fibra ottica per telecomunicazioni, trasformandola in un sensore che, per tutta la sua lunghezza, fornisce informazioni valori e le variazioni locali di *strain* (ossia di sforzo tensoriale) e di temperatura lungo la propria ascissa curvilinea, su distanze fino a centinaia di km, con una risoluzione spaziale fino a pochi cm.

Per discernere le due grandezze, *strain* e temperatura, vengono, tipicamente utilizzate due fibre in parallelo: la prima resa solidale alla struttura, misurerà lo *strain*, mentre la seconda in configurazione non solidale, eseguirà la misura della temperatura.



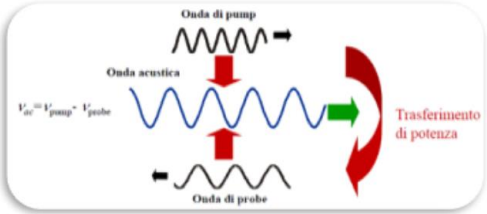


Fig. 1 – Lo scattering Brillouin

FASE 1) **RACCOLTA DATI** – Aspetto ingegneristico

Si è sperimentato che per ottenere il monitoraggio degli sforzi mediante l'utilizzo di sensori distribuiti, è fondamentale assicurarsi che la fibra ottica sia che misura lo *strain* sia perfettamente solidale al materiale ospitante, in modo da ottenere un trasferimento degli sforzi completo e privo di perdite dovute allo scivolamento del sensore. Per perseguire tale obiettivo, bisogna utilizzare particolari tecniche, che variano a seconda che la posa della fibra sia effettuata in fase di costruzione della struttura o su elementi di una struttura già esistente.

Nel caso di posa in corso di costruzione, si è sperimentato che è possibile ancorare la fibra in modo molto efficace ad elementi costituenti della struttura come, ad esempio, alle armature di un pannello di paratia, soprattutto in considerazione del fatto che la fibra ottica può operare anche immersa all'interno di un materiale composito com'è il calcestruzzo.

Nel caso di elementi di strutture preesistenti, si è sperimentato che la fibra ottica va posata mediante speciali resine collanti, preferibilmente all'interno di un nastro in fibra di vetro rinforzata in termoplastica con matrice in PPS, che conferisce al sensore ottime proprietà di resistenza meccanica e chimica.
La posa a regola d'arte della fibra su strutture preesistenti richiede l'utilizzo di specifici attrezzi e la manodopera da parte di due operai specializzati, i quali riescono a posare mediamente 1 metro di fibra ogni 10 minuti.

FASE 1) **RACCOLTA DATI** - La posa dei sensori distribuiti in fibra ottica in fase di costruzione (1/5)

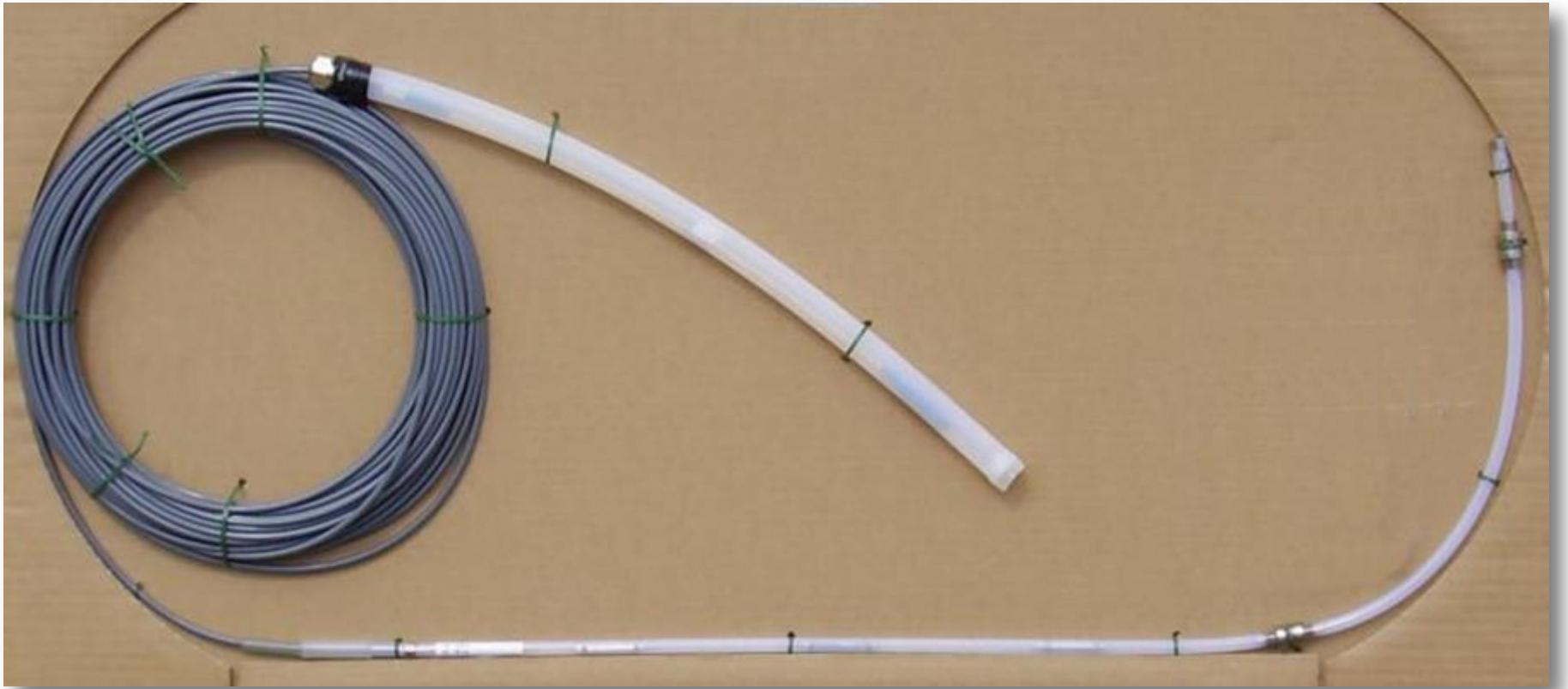


Foto 1 – Il sensore

FASE 1) **RACCOLTA DATI** - La posa dei sensori distribuiti in fibra ottica in fase di costruzione (2/5)

Foto 2 – Fissaggio del sensore

FASE 1) **RACCOLTA DATI** - La posa dei sensori distribuiti in fibra ottica in fase di costruzione (3/5)

Foto 3 – Installazione del sensore su un'armatura

Foto 4 – Il getto

FASE 1) **RACCOLTA DATI** - La posa dei sensori distribuiti in fibra ottica (4/5)

Foto 5 – Installazione del sensore su una trave di fondazione

FASE 1) **RACCOLTA DATI** - La posa dei sensori distribuiti in fibra ottica (5/5)

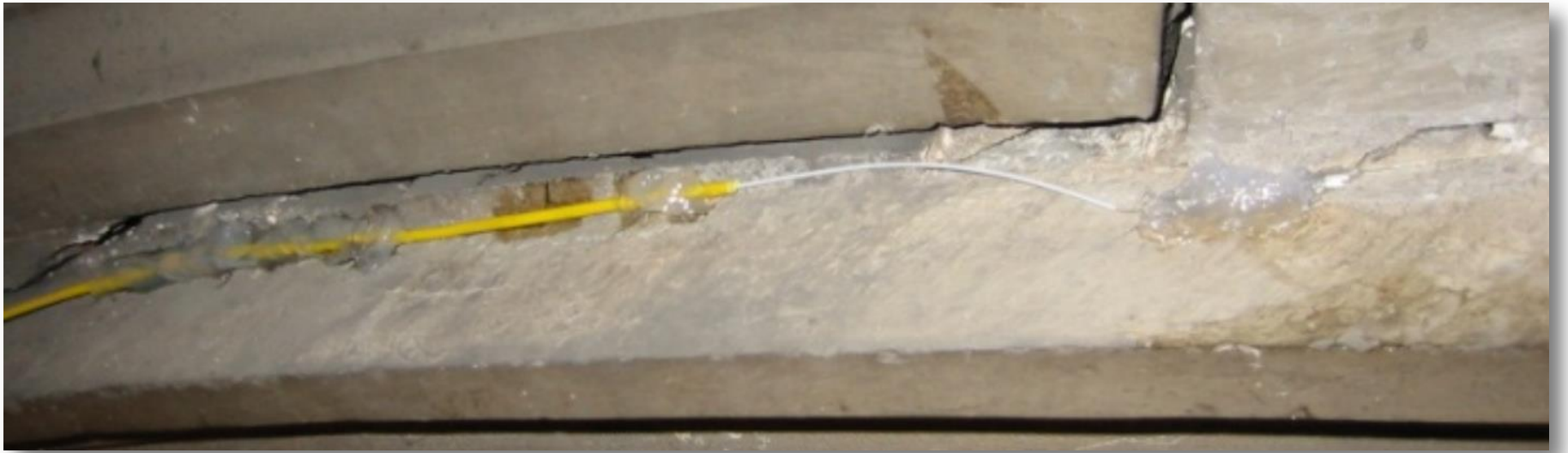


Foto 6 – Installazione del sensore su elementi di strutture preesistenti

FASE 1) **RACCOLTA DATI** - L'analisi dei dati (1/2)

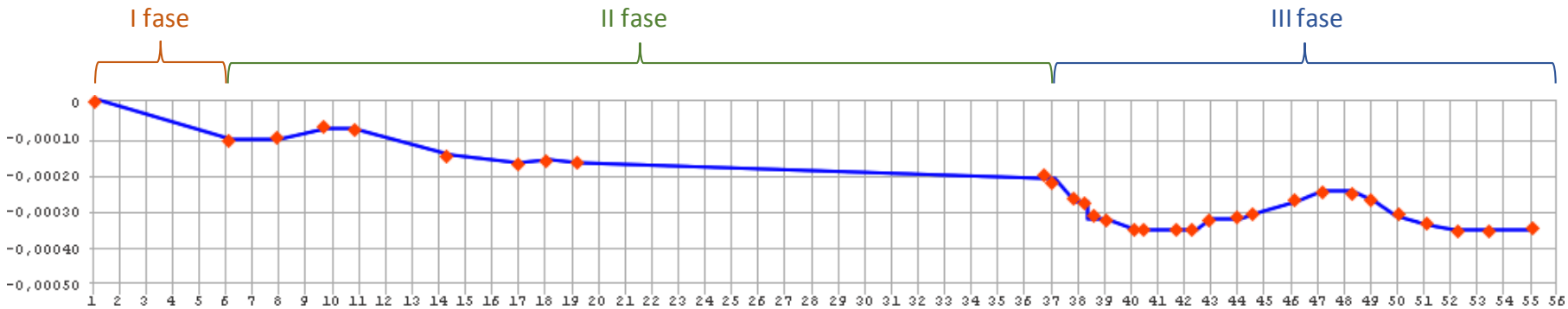


Fig. 2 – Deformazione media giornaliera rilevata in un elemento strutturale

Il grafico sopra riportato rappresenta la deformazione media rilevata dai sensori in tre diverse fasi:

I fase: misure rilevate all'atto dell'installazione dei sensori e fino a prima che l'elemento monitorato entri a far parte della struttura complessiva.

II fase: misure eseguite sui sensori dal momento in cui l'elemento monitorato è in grado di sopportare regimi di sforzo e diviene strutturale, e per tutta la fase di costruzione della strutturale.

III fase: misure dei valori di spostamento acquisiti dall'entrata in servizio della struttura, dunque in presenza di carichi sia permanenti, sia accidentali.

RACCOLTA DATI - L'analisi dei dati (2/2)

Misurando lo *strain*, ossia la risposta a sollecitazioni note (trazione, compressione, taglio, torsione…) in termini di sforzo tensoriale e in funzione della posizione sull'ascissa curvilinea della fibra, è possibile ottenere in tempo reale una descrizione del comportamento del singolo elemento strutturale, rivelandone la tendenza a riportare danni dovuti ai carichi e alle condizioni di funzionamento della struttura di cui fa parte.

Nella figura è riportato il profilo di deformazione di un viadotto misurato dalla fibra ottica al passaggio di autocarri.
Si evidenzia l'insorgenza di crepe in corrispondenza di valori di trazione superiori a 150 με

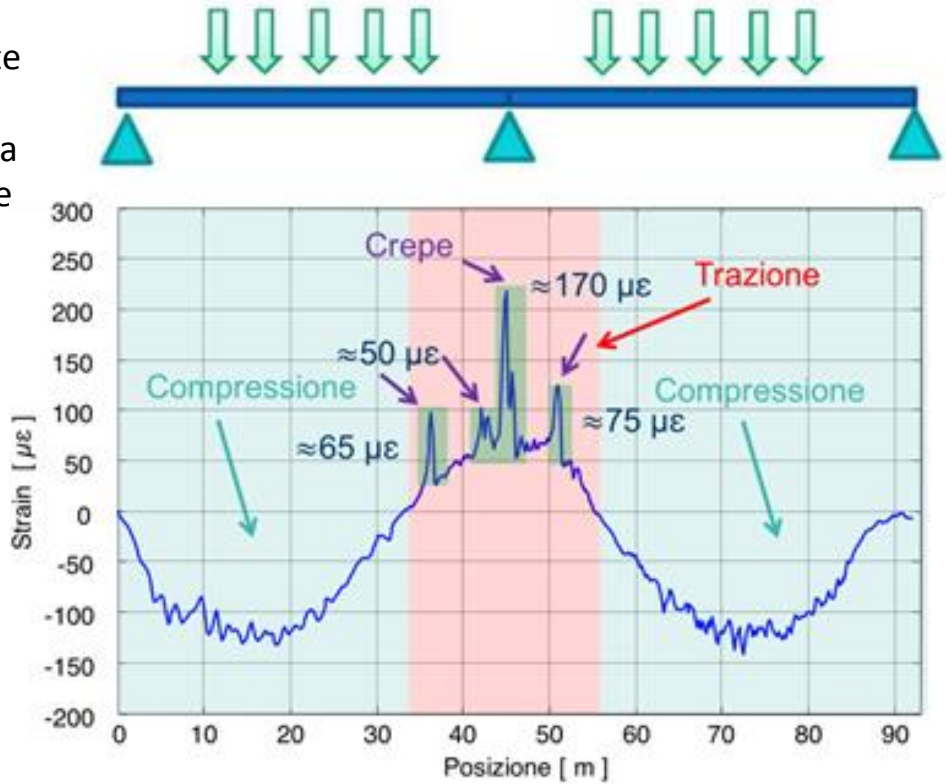


Fig. 3 – Profilo di deformazione di un viadotto al passaggio di autocarri

FASE 2) **TRASMISSIONE DATI**

Le problematiche connesse alla trasmissione dati riguardano prevalentemente la scelta del protocollo più efficiente ed efficace per far sì che i dati, eventualmente raccolti in ambienti "ostili" alla comunicazione attraverso i protocolli comunemente utilizzati per le reti *mobile*, *wi-fi*, *Ethernet*, possano raggiungere la rete Internet.

Un sistema che è stato oggetto di sperimentazione con eccellenti risultati è il LoRaWAN™
https://lora-alliance.org/ - https://it.wikipedia.org/wiki/LoRa
tecnologia a radiofrequenza Long Range (LoRa), che prevede chipset wireless a lungo raggio e bassa potenza.

Esso presenta un eccellente rapporto prestazioni/consumi, con una portata di trasmissione dati teorica fino a 45km (la nostra sperimentazione, in ambiente urbano, ha dato esito positivo su distanze tra 1 e 2 km) e con la possibilità di collegare centinaia di nodi in logica *mesh* (ogni nodo estende la portata complessiva della rete), garantendo consumi ridotti, dunque maggior durata della batteria, rispetto ad altri protocolli.

Altro aspetto fondamentale è quello della sua natura *open*, che permette di non dipendere da nessun operatore e di potersi collegarsi in cloud con altri protocolli (3G, 4G, LTE, *wi-fi*...) integrandosi facilmente in sistemi preesistenti. Altro grande vantaggio del protocollo *LoRaWAN* è la bi-direzionalità, caratteristica fondamentale per applicazioni IoT, nelle quali la comunicazione tra gli agenti/utenti deve prevedere la trasmissione dei dati ma anche la ricezione di comando e configurazioni.

FASE 3) **ELABORAZIONE DATI** (1/2)

La piattaforma centrale di elaborazione dati, che rappresenta il cuore pulsante del sistema, deve implementare algoritmi di analisi dei *big data* provenienti dai sensori, in grado di effettuare un'analisi statistica dinamica, in modo da interpretare eventuali variazioni dei dati nel tempo per individuare anomalie o modifiche nel comportamento degli elementi monitorati.

Nel corso del progetto sono stati studiati e testati algoritmi di analisi predittiva, la quale utilizza dati storici per prevedere eventi futuri attraverso la costruzione di un modello matematico in grado di rilevare le tendenze più importanti.

Il modello in questione, in teoria, potrebbe essere ricavato direttamente mediante tecniche di apprendimento automatico e *data mining*, tuttavia una modellazione basata su *machine learning* non è effettivamente realizzabile in tempi e costi ragionevoli, anche perché richiederebbe *big data* che non sono disponibili all'avvio di un progetto.

Pertanto il modello, che pur può avvantaggiarsi dell'utilizzo di tecniche di intelligenza artificiale, deve essere costruito a partire da conoscenze del dominio dell'ingegneria civile.

FASE 3) **ELABORAZIONE DATI** (2/2)

Nel corso del progetto stato sperimentato un modello predittivo che, ricevendo in *input* i dati del diagramma *strain*/posizione, riesce a rilevare in anticipo la variazione del comportamento di un elemento mediante analisi di regressione, e ad elevare un *alert* prima che i livelli di *strain* raggiungano valori critici oltre i quali si generano plasticizzazioni o rotture.

Il test sull'algoritmo è stato eseguito utilizzando una sequenza di 900 tracciati, ciascuno dei quali fornisce dati, rilevati mediante appositi software di acquisizione e trasmessi a intervalli regolari di circa 6 ore, che descrivono il profilo dello *strain* lungo la sezione di un viadotto, nei 7 mesi (circa) precedenti il danneggiamento da crepe.

L'analisi svolta sui primi 700 tracciati ha consentito all'algoritmo di prevedere un'elevata probabilità di insorgenza di crepe, nella zona prossima alla mezzeria, ipotizzandola tra le successive 100 e le successive 200 rilevazioni (ossia tra la 800esima e la 900esima).
Nella realtà, l'insorgenza di crepe, prossime alla mezzeria, nel tratto di viadotto in questione oggetto delle rilevazioni, si era effettivamente verificata in corrispondenza dalla 875esima rilevazione.

Qualora il sensore del viadotto fosse stato collegato alla rete "*IoT proteggo*", l'algoritmo avrebbe previsto quanto poi realmente accaduto avrebbe lanciato l'*early warning* già alla 700esima rilevazione, consentendo di svolgere indagini mirate e quindi prevenire i danni subiti dalla struttura.

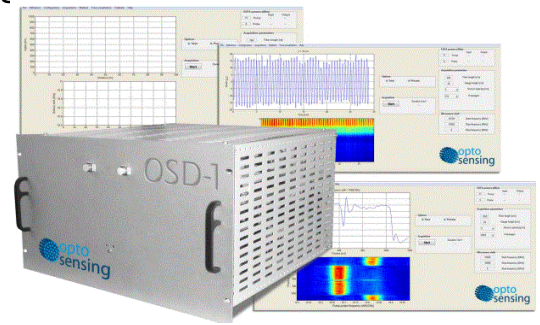
LO STUDIO DI FATTIBILITA' (1/4)

Per effettuare un'analisi della fattibilità di una IoT pilota, si è deciso di focalizzare l'attenzione su un'ipotesi di progetto concreta e limitata, riguardante gli edifici scolastici del Comune di Monteforte Irpino (AV), presso il quale ha sede legale l'azienda Solvendo.

LO STUDIO DI FATTIBILITA' (2/4)

Nella fattispecie, si tratta di tre edifici, due dei quali (A e B) sono tra loro contigui e separati da un piccolo cortile, mentre il terzo (C) è ubicato ad una distanza in linea d'aria di 2,6km.

Tale configurazione rende possibile l'utilizzo di un'unica unità di acquisizione dati per il monitoraggio delle due strutture contigue A e B, ma richiede l'utilizzo di un'altra unità dedicata al monitoraggio della struttura C.
Ogni unità di acquisizione, infatti, è in grado di gestire fino a 25 km di fibra ottica in *loop*, ma non è fattibile, dal punto di vista tecnico-economico, il lavoro di stesura dei cavi che occorrerebbe per monitorare tutte le strutture con una sola unità.



Le unità di acquisizione da noi testate sono prodotte dalla OptoSensing S.r.l., azienda partenopea con sede operativa in Irpinia, a Contrada (AV).
Esse rappresentano la parte più rilevante dell'investimento previsto.

L'unità centrale del sottosistema *LoRaWAN* si intende collocata presso la sede della Solvendo (icona con il cubo), mentre si rende necessaria un'altra unità installata in posizione intermedia tra i plessi A/B e il plesso C.

LO STUDIO DI FATTIBILITA' (3/4)

Il calcolo dei costi di realizzazione del progetto pilota descritto prevede un investimento iniziale pari a:

Descrizione	U.M.	QTA	Prezzo/u	Prezzo tot.
Unità di acquisizione dati	pz.	2	70.000,00	140.000,00
Armadio rack di sicurezza e accessori per unità di acquisizione	pz.	2	600,00	1.200,00
Sensore distribuito di strain/temperatura in fibra ottica strutture A/B	m	800	12,00	9.600,00
Sensore distribuito di strain/temperatura in fibra ottica struttura C	m	350	12,00	4.200,00
Cassettine di derivazione, junction/splicing box collegam. sensori	pz.	24	30,00	720,00
Manodopera per posa fibra ottica (10 min / m, arrotond. eccesso)	ore	200	12,00	2.400,00
Costi di allestimento cantiere (calcolo forfaitario)	unit	2	2.600,00	5.200,00
Starter Kit IoT MultiConnect Conduit LoRaWAN, 868 MHz	pz.	1	900,00	900,00
WT801 - Modulo LoRa 868MHz/915MHz	pz.	2	40,00	80,00
Gruppi di continuità	pz.	2	850,00	1.700,00
Costi di progettazione, consulenza specialistica, direzione lavori	unit.	1	8.000,00	8.000,00
			TOTALE:	174.000,00

A tale importo andrebbero sommati circa 90.000 euro per lo sviluppo della piattaforma software centrale, il cui costo, però, non può essere imputato al progetto pilota, bensì va distribuito tra i molteplici progetti successivi.

LO STUDIO DI FATTIBILITA' (4/4)

Dal punto di vista dei "ricavi" va certamente considerato quello sociale – di valore inestimabile – derivante della riduzione del rischio di crollo delle strutture o di parti di esse in caso di eventi sismici o di altre calamità.
Gran parte del patrimonio edilizio pubblico e privato e delle opere pubbliche, infatti, versa in uno stato di approssimativa conservazione, manifestando la drastica riduzione dei coefficienti di sicurezza, data anche la notevole età delle costruzioni in cemento armato, molte delle quali hanno già esaurito il proprio ciclo di vita atteso.

Inoltre, sotto il profilo strettamente economico, il monitoraggio effettuato con i sensori in fibra ottica distribuiti consente di individuare i punti critici e di focalizzare ulteriori indagini, con prove distruttive e/o non distruttive, sugli elementi strutturali e sui materiali che realmente rivelano comportamenti anomali, riducendo i costi e rendendo sostenibile l'esecuzione di piani di manutenzione preventiva mirati e circoscritti, consentendo di evitare la valutazione di interventi globali che finiscono per esser sistematicamente rimandati a tempo indeterminato a causa del costo eccessivo.

Infine, l'analisi predittiva dell'andamento nel tempo dello *strain* a cui sono sottoposti gli elementi consente di intervenire precocemente sostenendo i costi della manutenzione conservativa piuttosto che quelli, di gran lunga maggiori, conseguenti al verificarsi di plasticizzazioni e rotture e alle sospensioni del servizio per inagibilità.

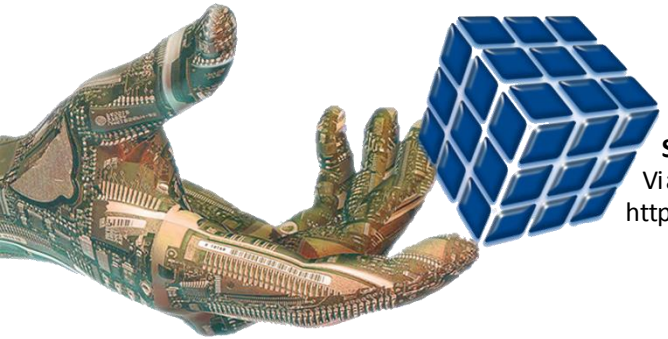
CREDITS:

Foto 1,2,3,4,5:
http://www.sismlab.com/doc/DOCUMENTAZIONE_FOTOGRAFICA_EDIFICIO_SKYLINE_COSENZA.pdf

Foto 6:
https://www.researchgate.net/publication/238772606_Impiego_di_sensori_in_fibra_ottica_per_il_monitoraggio_di_fratture_statiche_e_dinamiche

Fig. 1, 3:
https://www.ingenio-web.it/21486-monitoraggio-di-viadotti-ponti-gallerie-dighe-mediante-sensori-distribuiti-in-fibra-ottica

Grazie per l'attenzione!



Solvendo S.r.l. – Soluzioni informatiche e tecnologiche
Via Legniti, 20 – 83024 – Monteforte Irpino (AV)
https://www.solvendo.net - f.dimarino@solvendo.net