

CONCEPT PROGETTO

Determinazione continua della resistenza del calcestruzzo mediante sensori annegati nel getto: prime esperienze applicative

ALPE PROGETTI srl società di ingegneria
Alessandrini Francesco
Fedrigo Dario
Michelin Eros
Pedrini Federica
Slobic Luca
Valusso Diego

CATEGORIA INDICATA

Internet delle cose

CAMPO DI APPLICAZIONE GENERALE

Costruzioni civili

CAMPO DI APPLICAZIONE SPECIFICO

Controllo delle strutture in calcestruzzo durante la costruzione

L'IDEA PROGETTUALE

Nei cantieri delle costruzioni civili uno degli aspetti organizzativi di maggior rilevanza è spesso quello di riuscire ad individuare la resistenza dei calcestruzzi appena gettati per permettere lo sviluppo delle fasi successive di produzione.

Questo aspetto assume particolare rilevanza nel caso si utilizzino strutture precomprese in opera, in cui la precompressione va applicata al raggiungimento di una determinata minima resistenza del calcestruzzo. Anticipare anche solo di poche ore le operazioni descritte, con la dovuta sicurezza del caso, può risultare di notevole importanza nelle tempistiche esecutive e permettere consistenti risparmi economici.

L'idea alla base del progetto è quello di essere proceduti alla sperimentazione estensiva di dispositivi inseriti nel calcestruzzo in grado di fornire istantaneamente una stima della resistenza a compressione del calcestruzzo in funzione di come si sta sviluppando nel tempo la sua temperatura.

Tale determinazione, permessa da tecnologie wireless, ha mostrato di essere in grado di rispettare relativamente bene le aspettative a patto di inserire alcuni importanti accorgimenti.

PRESENTAZIONE DEL PROGETTO

Il progetto viene presentato mediante un articolo tecnico descrittivo di seguito riportato.

PRESENTAZIONE PROGETTO

Determinazione continua della resistenza del calcestruzzo mediante sensori annegati nel getto: prime esperienze applicative

ALPE PROGETTI srl società di ingegneria - Ingg. Francesco Alessandrini, Dario Fedrigo, Diego Valusso, Federica Pedrini, Eros Michelin, Luca Slobic

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, nel campo dell'ingegneria strutturale, è stato possibile assistere ad un importante sviluppo di metodi e tecnologie per l'utilizzo integrato di sistemi e dispositivi finalizzati al monitoraggio delle opere strutturali, allo scopo di indagare in modo diretto o indiretto le caratteristiche fisico-meccaniche. In questo contesto si inserisce il monitoraggio in tempo reale della maturazione di un calcestruzzo, per mezzo di appositi sensori installati all'interno del getto, in grado di **fornire istantaneamente una stima della resistenza a compressione del calcestruzzo in funzione di come si sta sviluppando nel tempo la sua temperatura.**

Il monitoraggio della resistenza del calcestruzzo durante il periodo di maturazione è fondamentale per diverse ragioni, quali:

- il controllo dello stato tensionale nel materiale;
- la verifica dei parametri di progetto;
- la gestione delle fasi costruttive del cantiere.

La procedura qui illustrata è inoltre in grado di offrire ulteriori vantaggi organizzativi ed economici per l'appaltatore e logistici e conoscitivi per i preposti al controllo dei lavori.

LA TEORIA

La teoria utilizzata per la stima della resistenza del calcestruzzo è riportata nella norma ASTM C 1074-11 (2011) ed è una rielaborazione che semplifica il principio di dipendenza tra maturazione della resistenza e temperatura nel materiale proposto dall'equazione di Arrhenius.

Nella rielaborazione vengono definiti alcuni parametri di input necessari alla stima dei risultati:

- la curva di calibrazione, ottenuta dalla rottura di cubetti di prova a diversi tempi di maturazione;
- T_0 , la temperatura di riferimento, ovvero quella di maturazione dei provini utilizzati per la curva;
- Q , una costante specifica di ogni calcestruzzo (generalmente ricavata da letteratura);
- Δt , l'intervallo di tempo tra le letture di temperatura;
- T_a , la temperatura media dopo l'intervallo di tempo.

Con questi parametri viene calcolato il tempo di maturazione equivalente:

$$t_e = \sum \Delta t e^{-Q[\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_0}]}$$

L'APPLICAZIONE

La sperimentazione è stata condotta durante i lavori di realizzazione della nuova Piattaforma Logistica di Trieste, primo nucleo del futuro modello di sviluppo del porto giuliano in direzione Sud-Est. Si tratta di un'estesa banchina portuale realizzata in calcestruzzo armato post-teso, di spessore minimo 50cm, che poggia su pali realizzati a mare di diametro 127cm. Il monitoraggio per mezzo di sensori ha interessato diverse fasi costruttive di realizzazione della soletta nel periodo compreso tra gennaio e luglio 2018.

Per il monitoraggio sono stati impiegati i sensori "SmartRock", di Giatec Scientific Inc., posizionati in mezzzeria alla soletta prima dell'esecuzione del getto; questi dispositivi sono in grado di registrare, ad intervalli di 15 minuti e per un periodo massimo di 4 mesi, temperature comprese tra -30°C ed +80°C, con una precisione di $\pm 1^\circ\text{C}$. I dati sono visibili tramite tecnologia Bluetooth con un semplice dispositivo mobile (p.e. smartphone). I valori ottenuti sono stati poi comparati con i valori di resistenza del cls in nostro possesso, derivanti dalla rottura in cantiere di cubetti di prova.

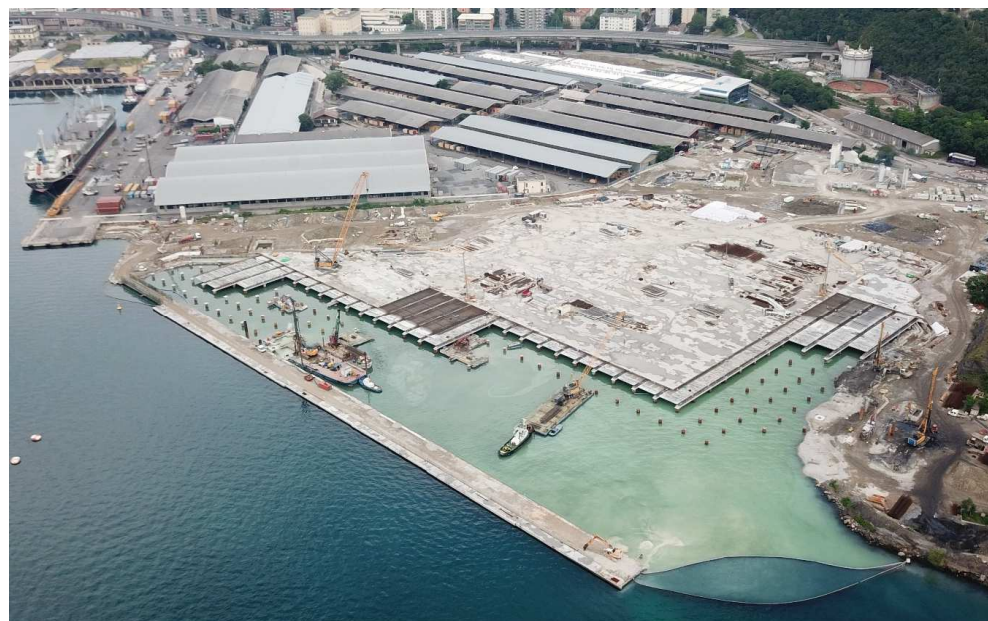


Figura 1 – Immagine aerea del cantiere dei lavori di realizzazione della Piattaforma Logistica di Trieste

PRESENTAZIONE PROGETTO

L'APPLICAZIONE

I getti delle diverse fasi di soletta sono stati eseguiti con il medesimo mix-design del cls, fatto salvo l'utilizzo di additivo ritardante impiegato nei getti del periodo estivo. Questo ha comportato, nello studio del sistema di monitoraggio, la definizione di due diverse miscele, senza e con additivo ritardante (rispettivamente miscela n. 1 e 2).
I sensori sono stati disposti secondo la planimetria riportata a seguire (fig. 2), mentre in fig. 3 sono illustrate le due diverse curve di calibrazione (miscela n. 1 e 2).

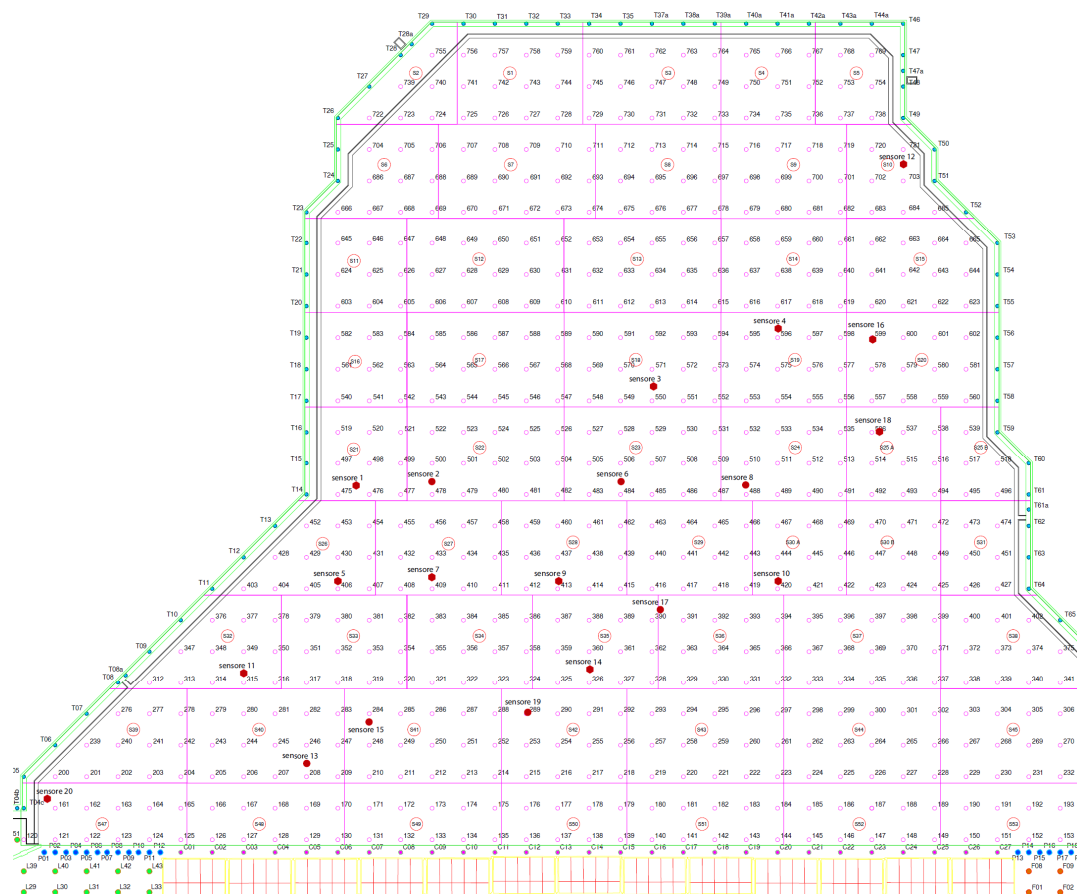
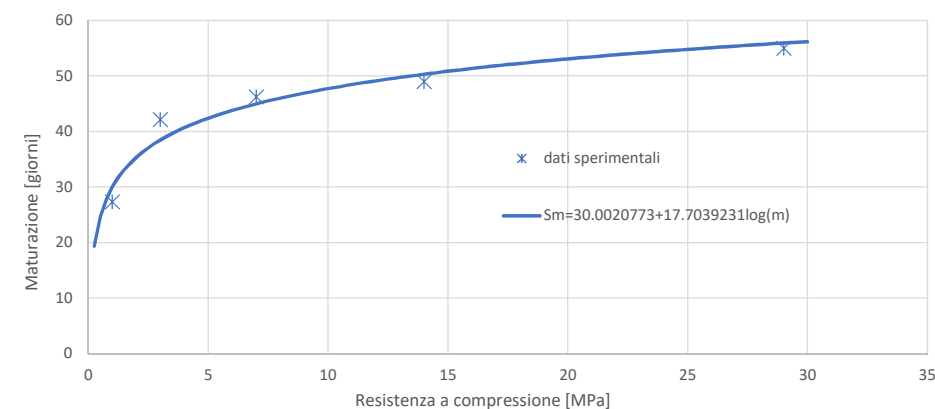


Figura 2 - Planimetria della disposizione dei sensori nelle fasi di getto della banchina a mare (punti rossi)

Miscela n. 1 - cls C35/45 non additivato



Miscela n. 2 - cls C35/45 additivato

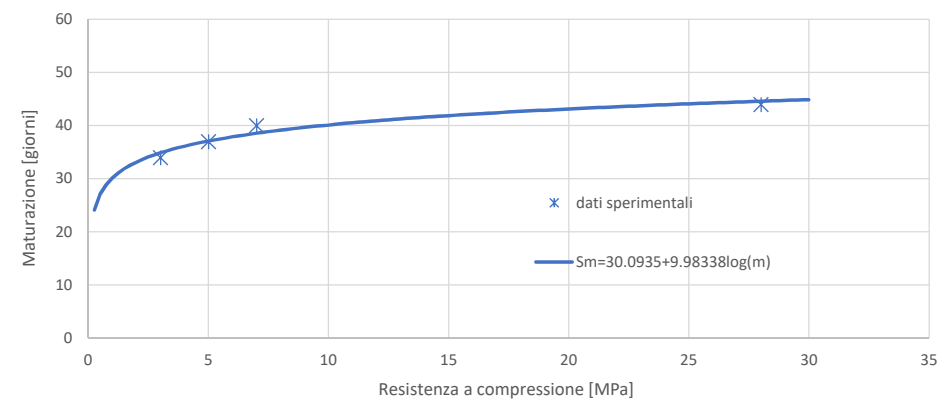


Figura 3 – Curve di calibrazione delle miscele

PRESENTAZIONE PROGETTO

Come si può vedere in fig. 4 e 5 a destra (cerchio verde), i sensori sono dotati di un «apparecchio» di dimensioni circa 4x4cm e spessore 1cm, nel quale vi sono la batteria e la memoria del dispositivo, in grado di trasmettere i dati tramite tecnologia Bluetooth. Ogni sensore viene identificato mediante un suo codice ID. L' «apparecchio» è collegato per mezzo di fili protetti da una guaina, di lunghezza massima circa pari a 50cm, al termometro/dispositivo per la misurazione della temperatura (fig. 5 a destra, cerchio arancione).

I sensori sono stati posizionati uno per ogni singola fase di getto della soletta, fissati per mezzo di fascette plastiche e filo di ferro all'armatura dell'impalcato prima dell'inizio del getto, in modo tale che il termometro fosse disposto in mezz'aria allo spessore del getto (fig. 5 a sinistra, cerchio blu); una volta installati, sono stati attivati e connessi con l'applicazione scaricata su smartphone (fig. 6), dove sono state impostate le caratteristiche relative al singolo sensore e al getto.

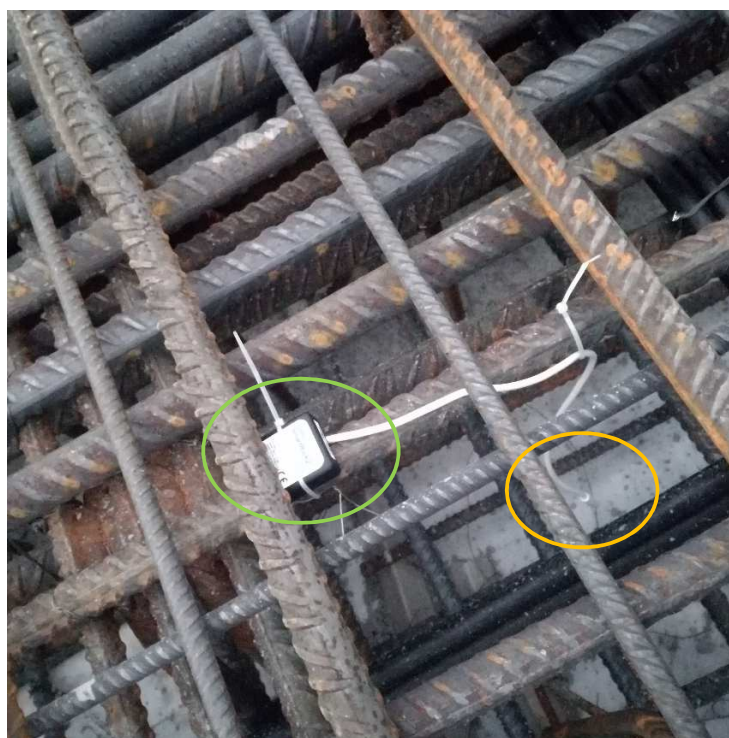


Figura 4 - Sensore di temperatura utilizzato

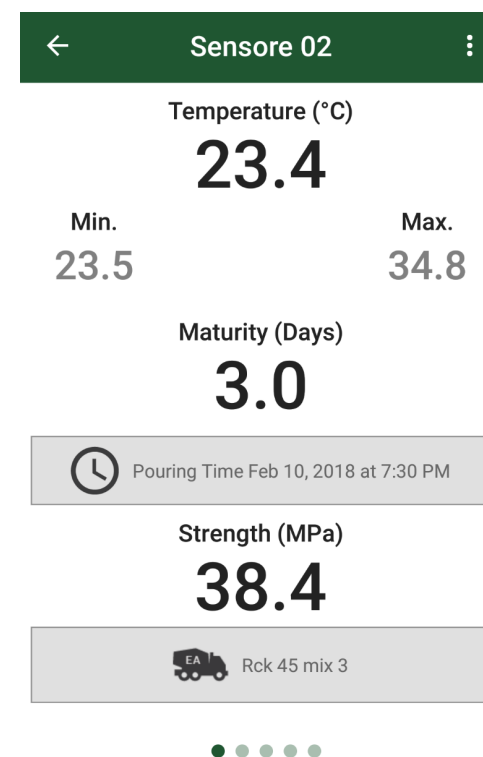


Figura 6 - Schermata di visualizzazione dei dati del sensore tramite app scaricata sullo smartphone

Figura 5 - Applicazione di un sensore nel getto – Fissaggio del sensore all'armatura della soletta (immagine di dettaglio a destra)

PRESENTAZIONE PROGETTO

Nel grafico in fig. 7 sono rappresentati gli andamenti delle temperature misurate dai sensori nei primi tre giorni di maturazione: i picchi di temperatura variano dai 30°C per i getti effettuati nel periodo invernale (gennaio-marzo 2018) fino a circa 70°C per i getti nel periodo estivo (maggio-luglio 2018). I picchi di temperatura sono in tutti i casi registrati entro le 24 ore dalla fine del getto, mentre l'andamento delle temperature nel periodo successivo è quasi costante. Nei grafici in fig. 8 sono invece rappresentate, a titolo esemplificativo, le curve di resistenza a compressione del calcestruzzo ottenute dai sensori 1 e 13, comparate con i valori di resistenza cubica ottenuti dalle prove a compressione su provini di lato 15cm. Di questi, i pallini blu scuro individuano i provini maturati secondo la norma UNI EN 12390-3, mentre i pallini azzurri rappresentano i provini maturati in sito.

Nel primo caso (sensore 1) la resistenza dei provini maturati in sito è mediamente ben stimata dalla curva teorica correlata allo sviluppo della temperatura, a differenza dei cubetti maturati in vasca, che presentano valori di resistenza maggiori (dell'ordine del 10-15%) rispetto al teorico.

Nel secondo caso (sensore 13) si osserva invece che i cubetti maturati in sito e in vasca individuano resistenze tra loro confrontabili, ma inferiori di circa il 25-30% rispetto all'andamento teorico ottenuto mediante il sensore di temperatura.

In generale, considerando i risultati di tutti i sensori, si sono ottenute curve di resistenza in cui i valori di rottura risultavano ben confrontabili con l'andamento teorico stimato, ed altre invece analoghe a quella vista per il sensore 13, per il quale i dati teorici e di prova hanno dato risultati differenti tra loro.

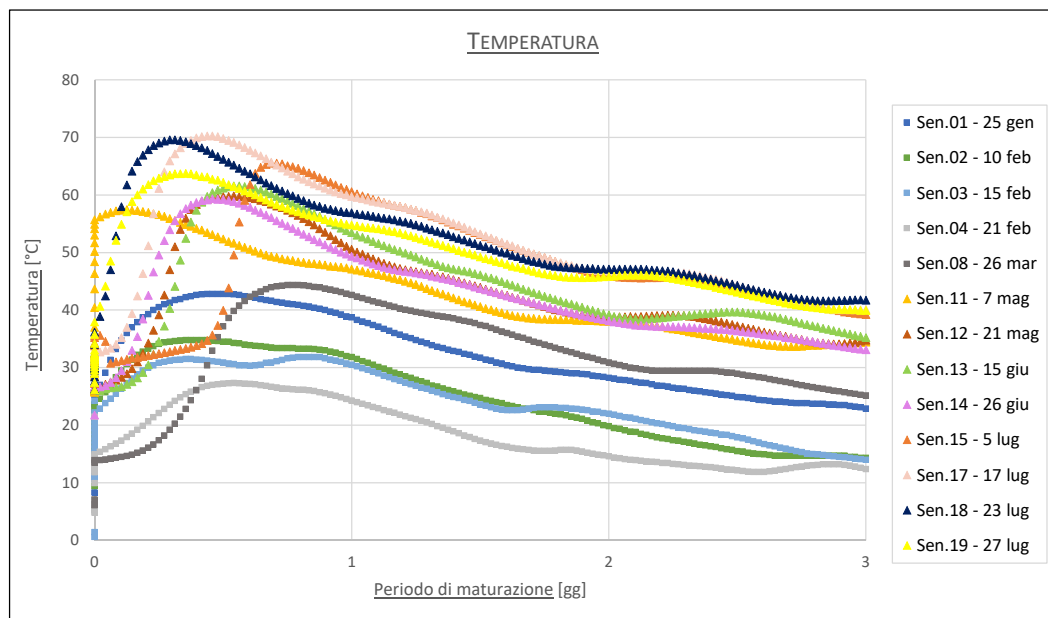


Figura 7 - Andamento della temperatura registrata dai sensori nei primi 3 giorni di maturazione del cls

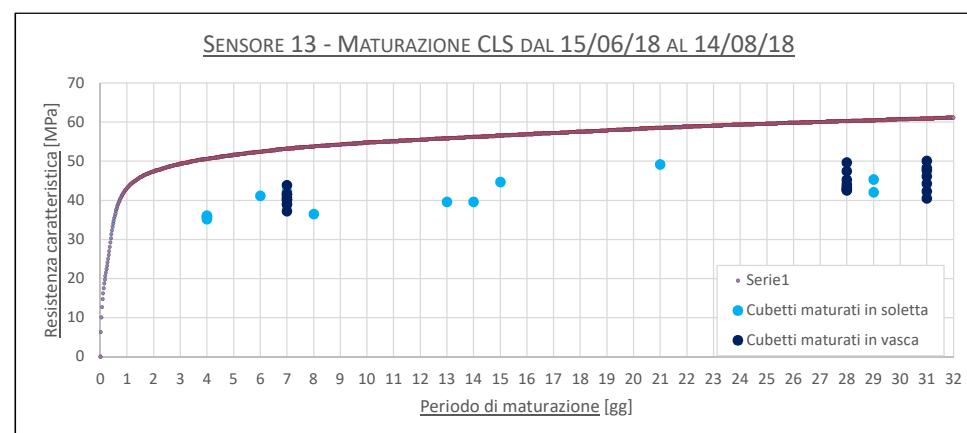
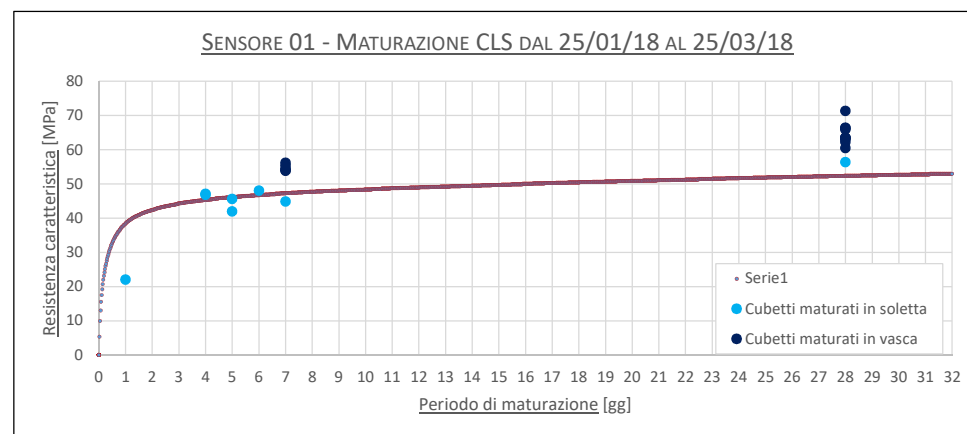


Figura 8 - Curve di resistenza dei sensori 1 (sopra) e 13 (sotto), con risultati a compressione di cubetti

PRESENTAZIONE PROGETTO

Analizzando nel dettaglio i dati ottenuti da tutti i sensori, è stata calcolata la variazione percentuale tra i valori di resistenza del cls stimati col sensore e quelli ricavati dalle prove a compressione dei provini cubici (fig. 9) a diversi giorni di maturazione, tramite la formulazione riportata a seguire:

$$\Delta\% = \left(\frac{R_{sns} - R_{imp}}{R_{sns}} \right) * 100$$

dove:

R_{sns} = resistenza cls ottenuta dal sensore;

R_{imp} = resistenza cls ottenuta dalla rottura dei cubetti effettuata dal tecnologo in cantiere.

Miscela n.1 - cls C35/45 non additivato

Il grafico sotto riportato (fig. 9 a sinistra) evidenzia che i risultati sono comparabili per i primi sensori (getti corrispondenti ai sensori dall'1 al 8), a differenza invece dei sensori installati successivamente, che hanno mostrato differenze anche pari al 50% (sensori 11-12-13). Tale problematica è imputabile ad una non perfetta calibrazione dei sensori in fase preliminare.

Miscela n.2 - cls C35/45 additivato

Nella seconda miscela utilizzata, invece, i risultati sono migliori: la variazione tra i risultati dei sensori e delle prove di compressione è infatti sempre compresa nel range di $\pm 15\%$.

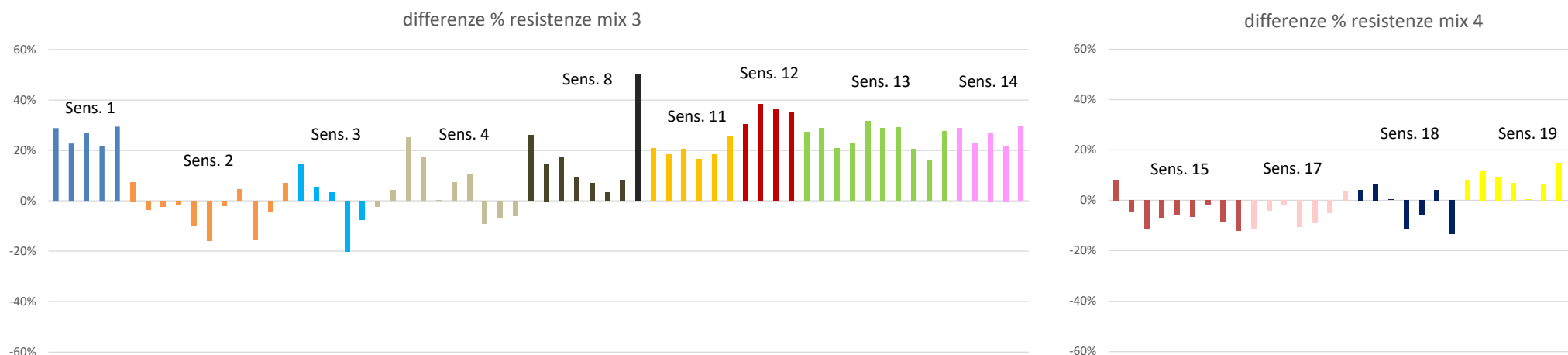


Figura 9 – Variazione percentuale tra i valori di resistenza stimati con i sensori e quelli ricavati dalle prove a compressione dei cubetti – miscela 1 (a sinistra) e 2 (a destra)

Alla luce dei risultati esposti, è evidente che la fase preliminare di calibrazione assume un ruolo fondamentale per poter impostare un adeguato sistema di monitoraggio. Inoltre, analizzando più nel dettaglio l'impiego dei sensori, ed in particolare le condizioni ambientali durante le diverse fasi di getto, si è notato che la prima miscela è stata utilizzata per un arco di tempo più esteso, caratterizzato da un primo periodo con temperature medie più basse ($6^{\circ}/11^{\circ}\text{C}$) e da un secondo periodo in cui la temperatura media è stata più alta (compresa tra 22°C e 24°C). La seconda miscela, che ha un livello di precisione più elevato, è stata utilizzata in un periodo in cui la temperatura ambientale è stata più costante (temperatura media compresa tra 24°C e 26°C).

PRESENTAZIONE PROGETTO

Sulla base di quanto appena evidenziato, al fine di ottimizzare i risultati ottenuti e la stima della resistenza a compressione del cls, è possibile attuare alcune accorgimenti specifici:

- inserire direttamente nel software di gestione del sensore le costanti che descrivono la curva teorica di calibrazione (proposta condivisa anche dallo stesso produttore del sensore);
- aumentare il numero di prove a compressione preliminari, in modo da diminuire l'entità degli errori in fase di elaborazione finale, prestando particolare attenzione a concentrare le rotture nel periodo di maturazione compreso tra i 2 ed i 10 giorni dal getto (variazione significativa di pendenza della curva). Questo aspetto è comunque da correlare dalle esigenze di utilizzo delle strutture appena gettate: nello specifico di questo cantiere si doveva determinare via via il primo momento di raggiungimento di una determinata resistenza del calcestruzzo della soletta per poter procedere all'immediata sua precompressione;
- in entrambi i suddetti casi, variare la curva di calibrazione a seconda delle condizioni ambientali alle quali il calcestruzzo si troverà a maturare.

La rappresentazione grafica a seguire (fig. 10) illustra l'andamento delle resistenze stimate con i sensori, in funzione dei giorni di maturazione dal getto, limitatamente ai primi 3 giorni. Tutte le curve di maturazione manifestano lo stesso andamento, fatta eccezione per le curve corrispondenti ai sensori 11-12-13, che corrispondono a getti eseguiti con la prima miscela, ma con temperature esterne ambientali più simili a quelle riscontrabili nel periodo estivo (per questi sensori la comparazione con i valori di calibrazione è risultata meno attendibile).

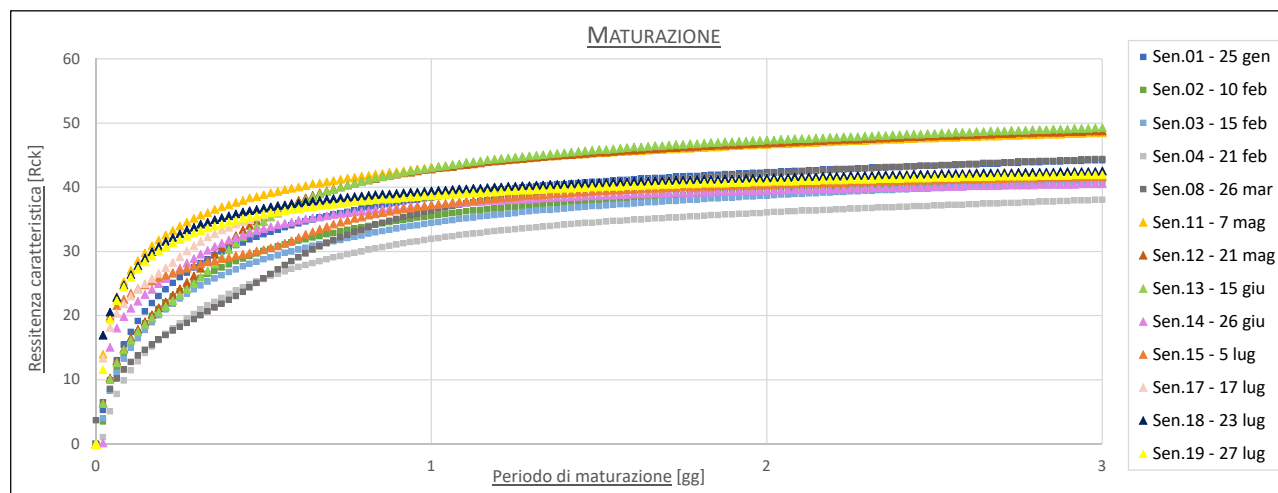


Figura 10 – Andamento delle resistenze ottenute dai sensori in funzione del tempo di maturazione (fino a 3 gg)

CRITICITÀ

Tra le criticità riscontrabili nel sistema di monitoraggio applicato e qui illustrato vi sono i seguenti aspetti:

1. Il sistema di monitoraggio in questione richiede precisione, accuratezza e specificità durante la fase preliminare di calibrazione. I dati di input, infatti, devono rappresentare in maniera fedele le condizioni nelle quali maturerà il calcestruzzo, pena una non adeguata stima della resistenza, con errori di stima anche significativi che possono variare nel tempo in modo non noto a priori.
2. La misurazione è puntuale: tale limitazione può essere mitigata utilizzando un numero abbastanza elevato di sensori per ogni getto.
3. È possibile incorrere nella difficoltà pratica di "ritrovamento" del sensore una volta terminato il getto, in quanto il segnale emesso dal sensore stesso non è molto potente.
4. Il costo dei sensori, che sono tutti strumenti "a perdere", non è indifferente, come non è trascurabile l'investimento iniziale necessario per l'elaborazione della curva di calibrazione.
5. I sensori sono strumenti sensibili e facili da danneggiare: è necessario pertanto prestare molta attenzione sia nella fase di posizionamento sia durante le operazioni di getto per evitarne la rottura; nel nostro caso è stato possibile avere riscontro di soli 13 sensori sui 20 impiegati in totale. Anche in questo caso, come al punto 2, il problema può essere risolto utilizzando un numero maggiore di sensori.

PRESENTAZIONE PROGETTO

VANTAGGI

Di contro a quanto precedentemente riportato la metodologia permette di evidenziare i seguenti aspetti positivi del sistema:

1. È possibile ottenere un'informazione sostanzialmente continua nel tempo. Questi sensori possono essere perciò utilizzati per valutare in maniera realistica se il grado di maturazione del calcestruzzo è adeguato allo svolgimento di operazioni di cantiere che interessano il getto prima dei canonici 28 giorni, senza far riferimento ai risultati di prove a compressione su provini da realizzare ad hoc.
2. I sensori possono essere anche utilizzati dalla Direzione Lavori come semplici termometri per valutare, preventivamente all'avvio del getto, se le condizioni atmosferiche sono adeguate alla realizzazione del getto stesso.
3. Il metodo è di semplice utilizzo e di facile lettura: il sistema informatico sviluppato permette una facile acquisizione dei dati ed una immediata restituzione dei risultati, con conseguente possibile riduzione dei tempi di attesa delle lavorazioni successive al getto monitorato, tutto questo a beneficio della produttività del cantiere.
4. Il sistema si presta bene per strutture di una certa dimensione, realizzate per fasi successive, possibilmente con un'unica miscela di calcestruzzo: in questi casi l'investimento iniziale può essere ammortizzato nel tempo, avendo nel contempo uno strumento che fornisce significative informazioni aggiuntive sui calcestruzzi gettati (andamento delle temperature di maturazione e conseguenti variazioni nei cementi e negli altri componenti il calcestruzzo).

Sulla base di una stima di massima del vantaggio perseguibile in termini economici, con riferimento ai lavori di realizzazione della Piattaforma Logistica di Trieste interessati dalla sperimentazione, si ritrova un dato molto interessante. Se si immagina, grazie all'uso dei sensori, un risparmio di tempo di mezza giornata per l'avvio delle attività successive alla realizzazione della singola soletta nei primi giorni seguenti il completamento del getto, si ottiene un risparmio economico di circa €2 MLN. In termini percentuali, rispetto all'importo totale dell'intera opera (circa €132 MLN), il risparmio complessivo stimato corrisponde all'1.50%; il valore ottenuto è decisamente significativo, sia in assoluto sia se rapportato al costo totale dell'opera.

CONCLUSIONI

L'utilizzo di strumentazioni in grado di fornire istantaneamente una stima della resistenza a compressione del calcestruzzo in funzione di come si sta sviluppando nel tempo la sua temperatura si è rivelata, dall'applicazione sperimentale estensiva nei lavori di realizzazione della nuova Piattaforma Logistica di Trieste, di significativo interesse.

Non si nascondono alcune difficoltà operative, superabili con l'utilizzo di un numero elevato di sensori e con un'estrema attenzione nella definizione delle curve di calibrazione iniziali.

Con l'utilizzo di questo sistema di monitoraggio è possibile conseguire un elevato risparmio complessivo nella realizzazione di grandi opere strutturali in calcestruzzo grazie all'accelerazione delle lavorazioni di cantiere.

Inoltre rappresenta un sistema ulteriore di controllo della qualità nel tempo dei calcestruzzi impiegati, una sicurezza esecutiva tutt'altro che secondaria in grado di permettere una valutazione continuativa soprattutto della qualità dei cementi la cui variabilità può risultare nel tempo molto più alta di quanto normalmente si pensi.

BIBLIOGRAFIA

- American Society for Testing and Materials, 2011. "Designation C 1074-11 – Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method".
- Poole, T.S., Harrington, P.J., 1996. "An Evaluation of the Maturity Method (ASTM C 1074) for Use in Mass Concrete". US Army Corps of Engineers, Technical Report SL-96-16.