

**RASSEGNA TECNICA
DEL FRIULI VENEZIA GIULIA
& NOTIZIARIO INGEGNERI**

rt
NUOVA SERIE

375

IN QUESTO NUMERO

Bilancio di un anno di Rassegna tecnica “nuova serie”

Determinazione continua della resistenza del calcestruzzo

Il valore strategico della Piattaforma Logistica Trieste

Territorio e società nella ricostruzione del Friuli

Utilizzazione di sistemi BIM per la ottimizzazione energetica di edifici residenziali



RASSEGNA TECNICA DEL FRIULI VENEZIA GIULIA & NOTIZIARIO INGEGNERI

rt
NUOVA SERIE

375

ANNO LXXI - GENNAIO/FEBBRAIO 2020

DIREZIONE

GIORGIO DRI Direttore responsabile
PAOLO ZORZI Direttore editoriale

HANNO COLLABORATO A QUESTO NUMERO

Francesco Alessandrini, Giorgio Dri, Chiara Duranti, Dario Fedrigo, Pierluigi Grandinetti, Roberta Mallardo, Eros Michelin, Elena Moro, Carlo Tomaso Parmegiani, Federica Pedrini, Luca Slobic, Diego Valusso, Andrea Zagolin, Enrico Zorzi

EDITORE

Rassegna tecnica del Friuli Venezia Giulia s.r.l.
33100 Udine, via Monte San Marco, 56
C.F. e P. IVA n. 01339660308

CONSIGLIO DI AMMINISTRAZIONE

Presidente: Antonio Nonino
Consiglieri: Antonino Colussi, Marino Donada, Vittorio Drigo, Adriano Mansutti, Andrea Sarcinelli

SEDE

33100 Udine - via Monte San Marco, 56
e-mail: info@rassegnatecnica.fvg.it
web: www.rassegnatecnica.fvg.it

PROPRIETÀ

Associazione Ingegneri della Provincia di Udine
Associazione Ingegneri e Architetti della Provincia di Pordenone

STAMPA

Cartostampa Chiandetti
33010 Reana del Rojale (UD) - via Vittorio Veneto
tel. 0432 857054 - fax 0432 857712
e-mail: info@chiandetti.it

REGISTRAZIONI

Tribunale Udine n. 245 del 17.1.1970
Iscrizione al R.O.C. n. 1747

ISSN 2421-0889



Associato all'USPI
Unione Stampa Periodica Italiana

La rivista si riceve solo per abbonamento.

L'abbonamento annuo ordinario è di € 15,00 (costo copia € 3,00).
Modalità di pagamento: bonifico su c/c della Banca di Cividale
Filiale di Udine, via Cotonificio (IBAN IT36 805484 12303 CC0530418133),
intestato a Rassegna tecnica del Friuli Venezia Giulia s.r.l.
L'abbonamento annuo per gli iscritti agli albi professionali
degli Ingegneri è ridotto a € 10,00.

La pubblicazione di una memoria non implica riconoscimento
o approvazione dei giudizi espressi dagli autori.

Gli originali dei testi, i disegni e le fotografie, anche se non pubblicati,
non si restituiscono, salvo preventivi accordi con la direzione.

SOMMARIO

- 2 **Bilancio di un anno di Rassegna tecnica "nuova serie",
in forma di propositi per il futuro**
GIORGIO DRI
- 3 **Notizie flash**
- 6 **Determinazione continua della resistenza
del calcestruzzo mediante sensori annegati nel getto.
Prime esperienze applicative**
FRANCESCO ALESSANDRINI, DARIO FEDRIGO, DIEGO VALUSSO,
FEDERICA PEDRINI, EROS MICHELIN, LUCA SLOBIC
- 14 **Il valore strategico
della Piattaforma Logistica Trieste**
CARLO TOMASO PARMEGIANI
- 33 **Territorio e società nella ricostruzione del Friuli.
Una riflessione critica**
PIERLUIGI GRANDINETTI
- 41 **Ottimizzazione energetica di edifici residenziali**
CHIARA DURANTI

AL CENTRO DELLA RIVISTA

NOTIZIARIO INGEGNERI

A CURA DI ELENA MORO

In copertina:

Vista aerea del cantiere dei lavori di realizzazione
della Piattaforma Logistica Trieste

Questa rivista è stata stampata su carta



Determinazione continua della resistenza del calcestruzzo mediante sensori annegati nel getto. Prime esperienze applicative

FRANCESCO ALESSANDRINI,
DARIO FEDRIGO,
DIEGO VALUSSO,
FEDERICA PEDRINI,
EROS MICHELIN, LUCA SLOBIC
 ingegneri,
 Alpe Progetti società di ingegneria

Nei cantieri delle costruzioni civili uno degli aspetti organizzativi di maggior rilevanza è spesso quello di riuscire a 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. Tale è il caso della nuova Piattaforma Logistica di Trieste, dove anticipare anche solo di poche ore le operazioni di precompressione, con la dovuta sicurezza del caso, è un risultato di notevole importanza nelle tempistiche esecutive con consistenti risparmi economici. L'idea alla base di quanto presentato nell'articolo è di sperimentare in forma estensiva 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.

Negli ultimi anni, nel campo dell'ingegneria strutturale, è stato possibile assistere a 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:

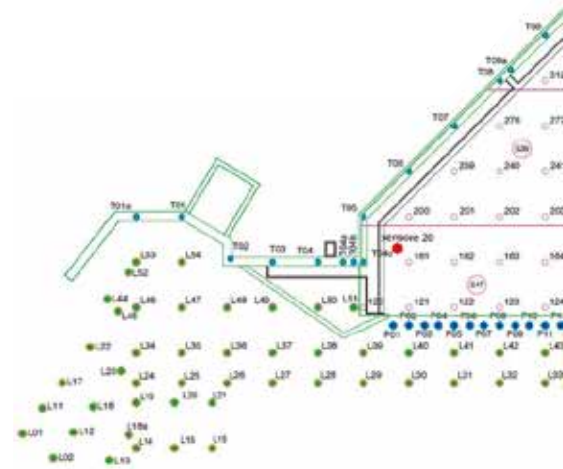
- la curva di calibrazione, ottenuta dalla rottura di cubetti di prova a diversi tempi di maturazione;
- T_0 , la temperatura di riferimento, ovvero quella di maturazione dei provini utilizzati per la curva;
- Q , una costante specifica di ogni calcestruzzo (generalmente ricavata da letteratura);
- Δt , 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-



↓
Figura 1 - Planimetria della disposizione
dei sensori nelle fasi di getto
della banchina a mare (punti rossi)

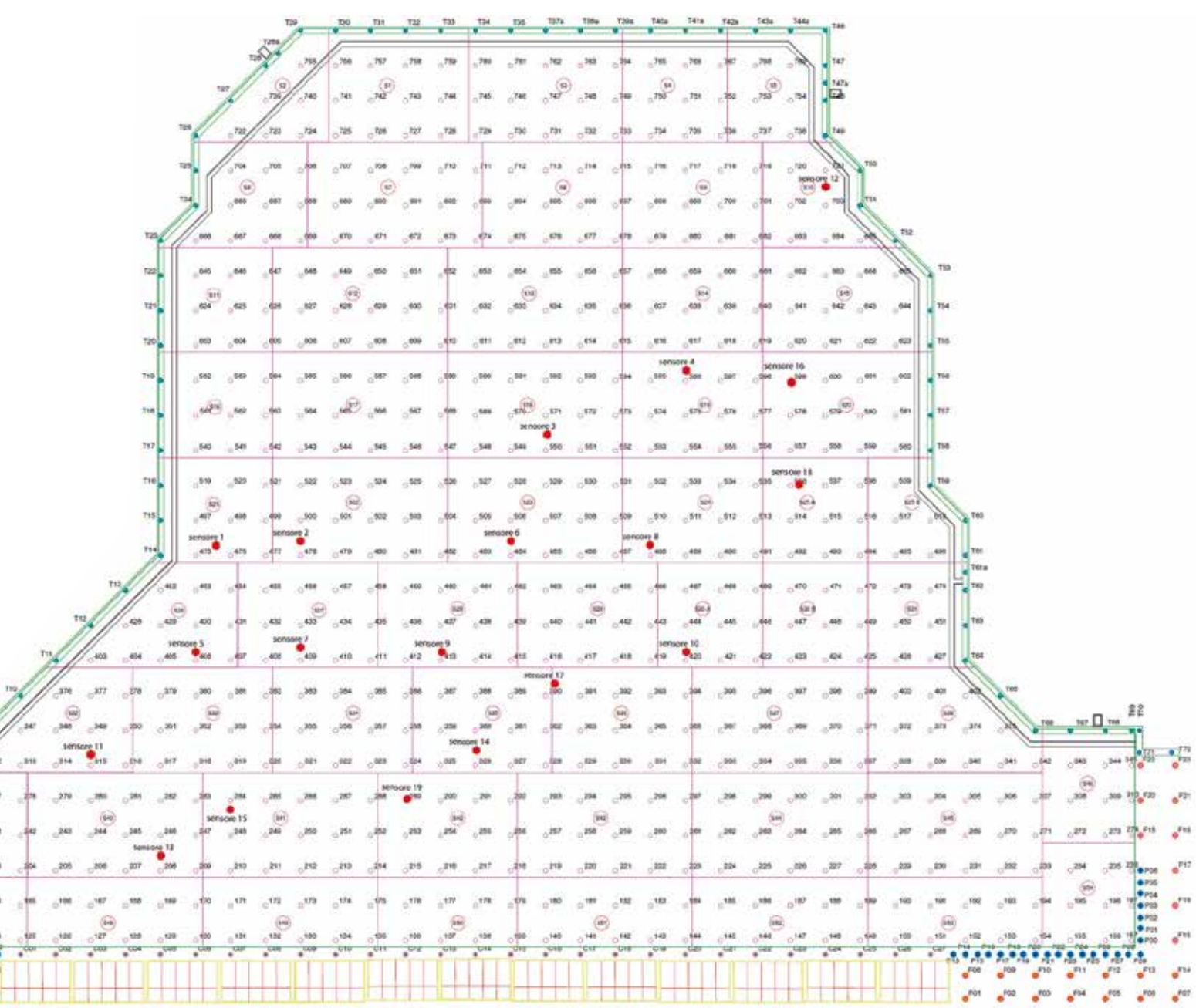
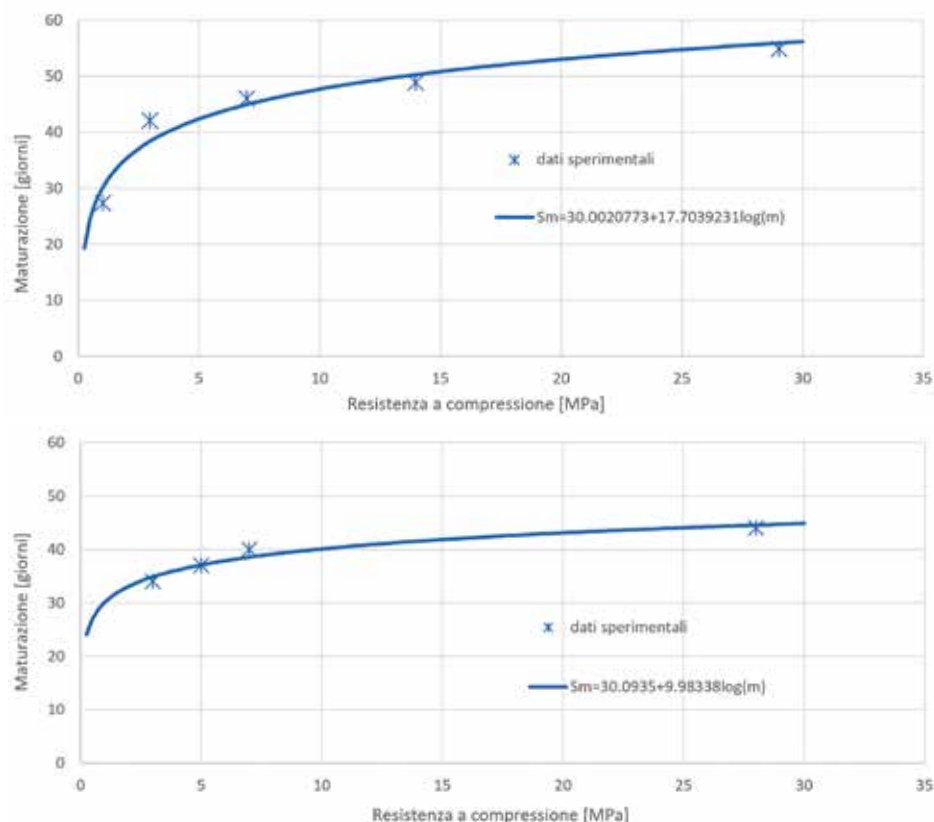


Figura 2 – Curve di calibrazione delle miscele
In alto, miscela n. 1 - cls C35/45 non additivato
In basso, miscela n. 2 - cls C35/45 additivato



est. Si tratta di un'estesa banchina portuale realizzata in calcestruzzo armato post-teso, di spessore minimo 50 centimetri, che poggia su pali realizzati a mare di diametro 127 centimetri. 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 mezzeria alla soletta prima dell'esecuzione del getto; questi dispositivi sono in grado di registrare, a intervalli di 15 minuti e per un periodo massimo di quattro mesi, temperature comprese tra -30°C e $+80^{\circ}\text{C}$, con una precisione di $\pm 1^{\circ}\text{C}$. I dati sono visibili tramite tecnologia Bluetooth con un semplice dispositivo mobile (per esempio, smartphone). I valori ottenuti sono stati poi comparati con i valori di resistenza del calcestruzzo in nostro possesso, derivanti dalla rottura in cantiere di cubetti di prova.

I getti delle diverse fasi di soletta sono stati eseguiti con il medesimo mix-design del calcestruzzo, 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 n. 2).

I sensori sono stati disposti secondo la planimetria riportata (fig. 1), mentre in fig. 2 sono illustrate le due diverse curve di calibrazione (miscela n. 1 e n. 2).

Come si può vedere (fig. 3 e fig. 4 a destra, cerchio verde) i senso-

ri sono dotati di un «apparecchio» di dimensioni circa 4×4 centimetri e spessore 1 centimetro, 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 pari a circa 50 centimetri, al termometro/dispositivo per la misurazione della temperatura (fig. 4 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 mezzeria allo spessore del getto (fig. 4 a sinistra, cerchio blu); una volta installati, sono stati attivati e connessi con l'applicazione scaricata su smartphone (fig. 5), dove sono state impostate le caratteristiche relative al singolo sensore e al getto.

Nel grafico in fig. 6 sono rappresentati gli andamenti delle tem-

perature misurate dai sensori nei primi tre giorni di maturazione: i picchi di temperatura variano da 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 di fig. 7 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 15 centimetri. 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 mag-



←
Figura 3 - Sensore di temperatura
utilizzato

↓
Figura 4 - Applicazione di un sensore nel getto. Fissaggio del sensore
all'armatura della soletta (immagine di dettaglio a destra)



↓
Figura 5 - Schermata di visualizzazione dei dati del sensore
tramite app scaricata sullo smartphone



giori (dell'ordine del 10-15%) rispetto al valore 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, e 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.

Analizzando nel dettaglio i dati ottenuti da tutti i sensori, è stata calcolata la variazione percentuale tra i valori di resistenza del calcestruzzo stimati col sensore e quelli ricavati dalle prove a compressione dei provini cubici (fig. 8) a diversi giorni di maturazione, tramite la formulazione:

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

dove:

R_{sns} , resistenza del calcestruzzo ottenuta dal sensore;

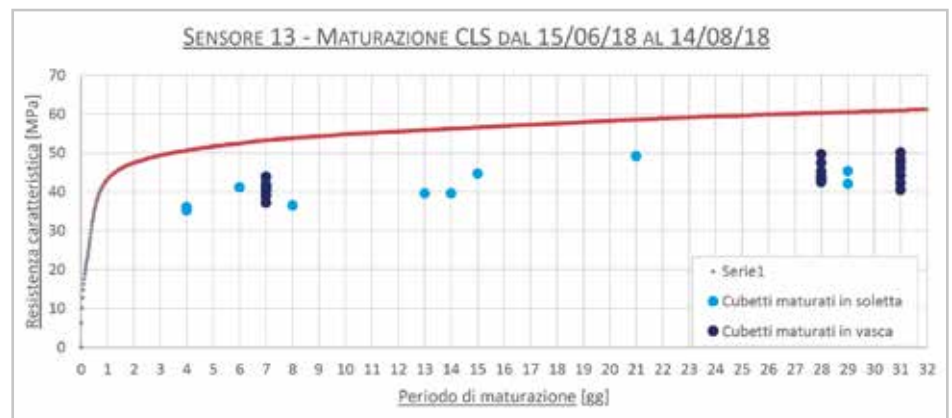
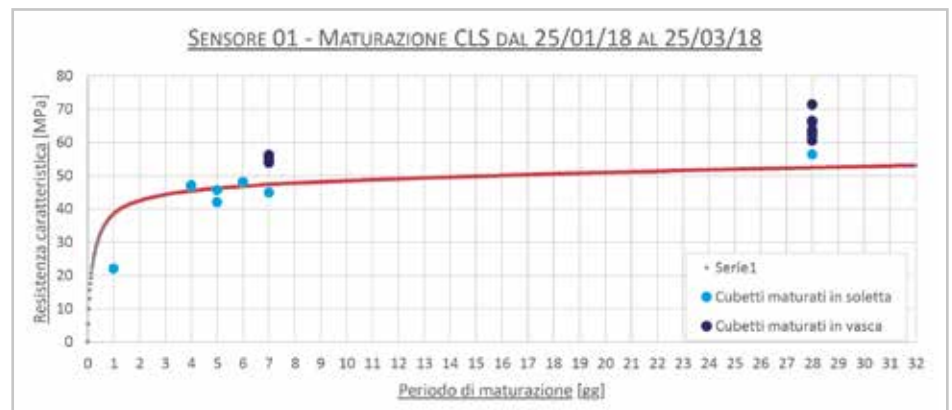
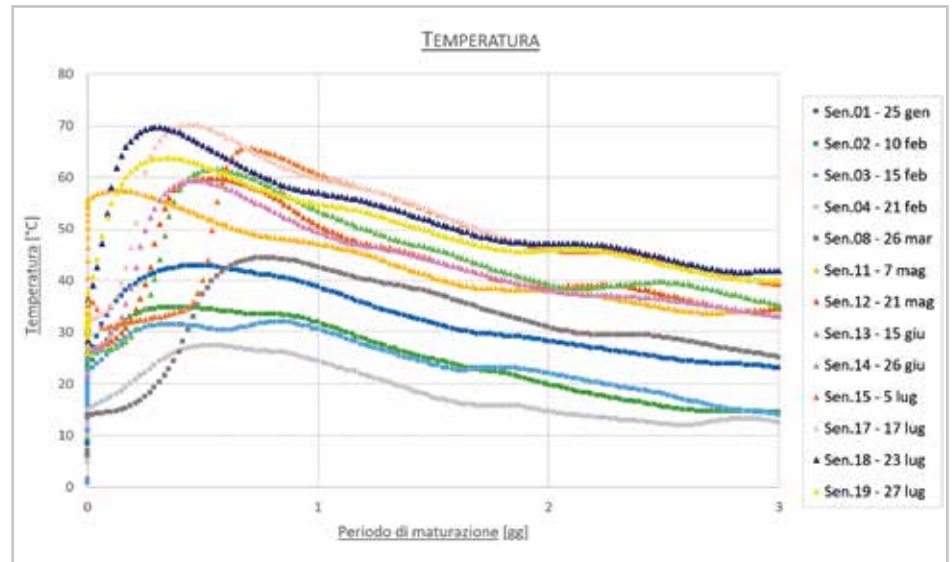
R_{imp} , resistenza del calcestruzzo ottenuta dalla rottura dei cubetti effettuata dal tecnologo in cantiere.

Miscela n. 1 - calcestruzzo C35/45 non additivato

Il grafico di fig. 8 in alto evidenzia che i risultati sono comparabili per i primi sensori (getti corrispondenti ai sensori dall'1 all'8), a differenza invece dei sensori installati

Figura 6 - Andamento della temperatura registrata dai sensori nei primi tre giorni di maturazione del cls

Figura 7 - Curve di resistenza dei sensori 1 (alto) e 13 (basso), con risultati a compressione di cubetti



successivamente, che hanno mostrato differenze anche pari al 50% (sensori 11-12-13). Tale problematica è imputabile a una non perfetta calibrazione dei sensori in fase preliminare.

Miscela n. 2 - calcestruzzo C35/45 additivato

Nella seconda miscela utilizzata (fig. 8 in basso), invece, i risultati sono migliori: la variazione tra i risultati dei sensori e delle prove di compressione è infatti sempre compresa nel range di $\pm 15\%$.

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, e 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 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° e 26°C).

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

- inserire direttamente nel software di gestione del sen-

sore 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 2 e 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 (fig. 9) illustra l'andamento delle resistenze stimate con i sensori, in funzione dei giorni di maturazione dal getto, limitatamente ai primi tre 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).

Criticità

Tra le criticità riscontrabili nel sistema di monitoraggio applicato e qui illustrato si possono isolare vari aspetti.

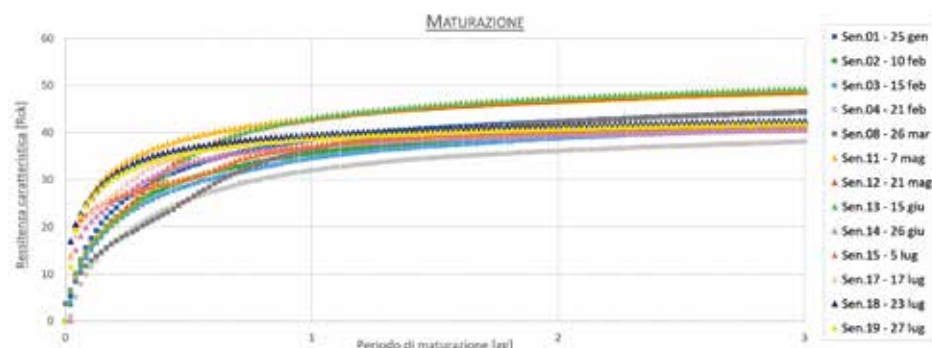
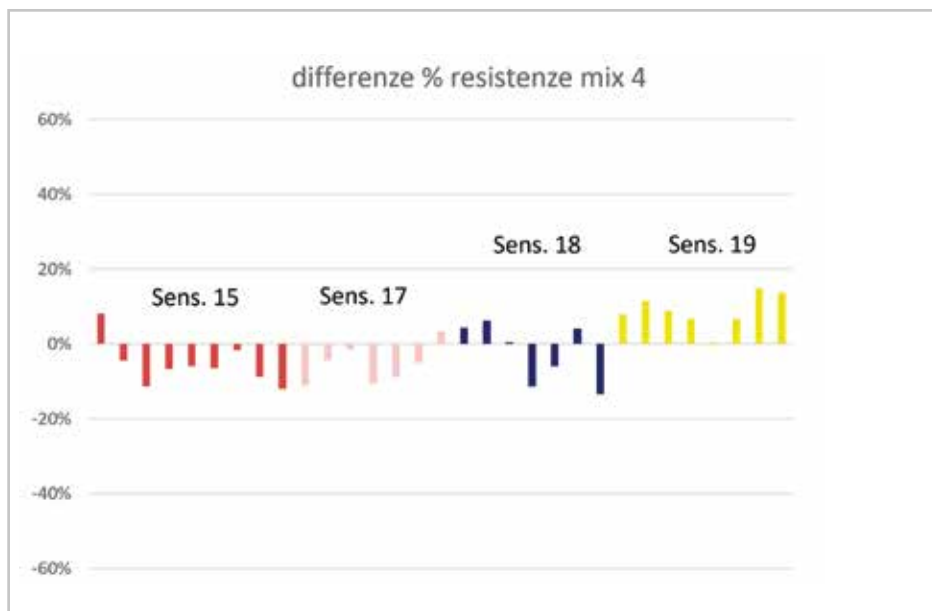
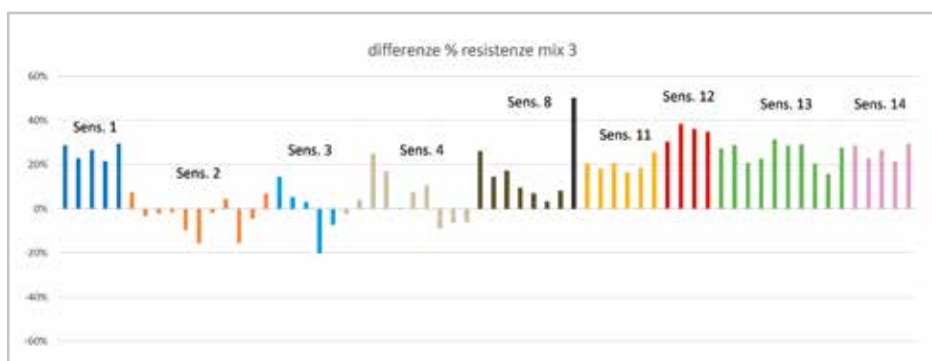
1. *Il sistema di monitoraggio in questione richiede precisione, accuratezza e specificità durante la fase preliminare di calibrazione.*

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 e sia durante le operazioni di getto per evitarne la rottura.
- Nel nostro caso è stato possibile avere riscontro di soli tredici sensori sui venti impiegati in totale. Anche in questo caso,

Figura 8 – Variazione percentuale tra i valori di resistenza stimati con i sensori e quelli ricavati dalle prove a compressione dei cubetti – miscela 1 (9 a) e 2 (9 b)

Figura 9 – Andamento delle resistenze ottenute dai sensori in funzione del tempo di maturazione (fino a tre giorni)



come al punto 2, il problema può essere risolto utilizzando un numero maggiore di sensori.

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 e 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 sperimentazio-

ne, 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 milioni di euro. In termini percentuali, rispetto all'importo totale dell'intera opera (circa 132 milioni di euro), il risparmio complessivo

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

stimato corrisponde all'1,50%; il valore ottenuto è decisamente significativo, sia in assoluto e 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 rive-

lata, dall'applicazione sperimentale estensiva nei lavori 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.

