

**SISTEMI DI MONITORAGGIO RESIDENTI E NUOVE TECNICHE DI CONTROLLO
DEI MATERIALI NELLA REALIZZAZIONE DI EDIFICI IN CALCESTRUZZO ARMATO**

G. PORCO – D.ROMANO

Sismlab s.r.l. Spin – Off Università della Calabria – Ponte Pietro Bucci Unical –Rende- (CS)
www.sismlab.it

INTRODUZIONE

La presente nota vuole fornire un contributo alla descrizione dei sistemi di monitoraggio a fibra ottica residenti nelle strutture in c.a., utilizzati per misurare in tempo reale le deformazioni e gli sforzi presenti nelle membrature portanti, verranno altresì illustrate, alcune tecniche di controllo NDT, per la verifica dei calcestruzzi strutturali, impiegati per la realizzazione di opere strategiche o con elevato impegno statico.

Tali strumenti, oggi, costituiscono un formidabile supporto per i tecnici che operano nel campo delle costruzioni civili e infrastrutturali, sia per eseguire dei controlli mirati, durante le fasi costruttive, sia per effettuare verifiche di affidabilità statica nel corso della vita utile. In particolare, lo studio di metodologie sperimentali per il controllo dei materiali e delle strutture, è oggi un campo di ricerca in notevole espansione, dove sono disponibili diverse tecniche di indagine. Tra queste, quelle riportate nel presente articolo e finalizzate al controllo dei calcestruzzi, ed alla verifica della integrità strutturale, mediante il monitoraggio in tempo reale, forniscono ai tecnici del settore, l’opportunità di dotare le nuove costruzioni, quali ponti o edifici, di requisiti di affidabilità e sicurezza di gran lunga superiori a quelli ottenuti fino ad oggi.

Con riferimento ad un caso reale dove, entrambe le tecniche sono state applicate, verranno illustrate le peculiarità delle metodologie sperimentali in situ, effettuando alcune considerazioni ingegneristiche, con l’ausilio di risultati acquisiti sul campo.

L’edificio preso in esame è stato realizzato nella città di Cosenza, è di proprietà della Skyline s.r.l., e rappresenta, per le particolari caratteristiche geometriche e strutturali, rispetto al contesto urbano dove è stato edificato, una singolare opera architettonica-ingegneristica. Il controllo, dei calcestruzzi impiegati per la costruzione dello Skyline, in fase di pre-qualifica e nelle fasi di messa in opera, è stato condotto, oltre che con le procedure proprie delle NT in vigore, principalmente con tecniche non distruttive, e tutte le fasi costruttive sono state seguite, da un sistema di acquisizione delle deformazioni, in modo, da percorrere sperimentalmente il processo di carico per alcuni elementi portanti, valutando *step by step* il livello di impegno statico sia in fondazione che in elevazione.

Il progetto architettonico dell'edificio è stato ideato (Fig.1), dall'Arch. Marcello Guido, suscitando interesse sin dalle fasi preliminari, non solo nel contesto urbano cosentino, ma su tutto il territorio nazionale. Lo Skyline, definito dagli operatori del settore come intervento di notevole pregio architettonico, si colloca tra le più interessanti realizzazioni nel sud Italia, sia per la gradevolezza estetica, che per impegno statico, ed anche, come uno dei pochi interventi ingegneristici nel meridione dove, sono state impiegate tecniche innovative per il controllo delle strutture e dei materiali.

Complessivamente l'edificio è costituito da 23 piani fuori terra più un interrato, raggiungendo una altezza totale dallo spiccatto delle fondazioni di circa 80 m.

Nelle sezioni seguenti, effettuata una descrizione degli aspetti strutturali, sia geometrici che materici, si passerà in dettaglio alla descrizione delle tecniche sperimentali utilizzate e finalizzate:



FIG.1 – EDIFICIO SKYLINE (CS)

-al controllo dei materiali;

-al controllo delle membrane resistenti in c.a. in fondazione ed in elevazione.

Prima di entrare nel merito agli aspetti tecnici, è importante sottolineare che, l'intervento Skyline testimonia una delle poche sinergie attive, tra il mondo dell'imprenditoria locale, più specificatamente quello delle costruzioni, ed il nostro Ateneo di Arcavacata. Infatti, tutte le attività sperimentali effettuate sui materiali, nonché le fasi di progettazione, installazione ed interpretazione dei dati del sistema di monitoraggio, sono state condotte dalla Sismlab srl, Spin-Off dell'Università della Calabria.

1.0 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA IN C.A.

La progettazione strutturale dell'immobile è stata effettuata in riferimento alle normative vigenti all'epoca della realizzazione, considerando l'immobile ubicato in zona sismica di prima categoria.

Sono stati predisposti, anche in questa circostanza degli accorgimenti tecnici di calcolo e di realizzazione non usuali per gli edifici con geometria classica. In particolare l'analisi è stata effettuata utilizzando codici di calcolo agli elementi finiti dedicati, e la progettazione degli elementi resistenti è stata condotta per conferire livelli di duttilità in linea con le recenti normative europee. Inoltre, per quanto l'altezza non sia estremamente impegnativa, la struttura resistente ricalca i sistemi portanti con nucleo resistente centrale di un vero e proprio edificio multipiano alto (Fig.2).

In riferimento alla fondazione, lo Skyline presenta un sistema di trasmissione dei carichi di tipo profondo. Gli scarichi prodotti dalla sovrastruttura sono distribuiti su una palificata, solidarizzata ad una piastra continua con spessore di tre metri, posta immediatamente al di sotto del corpo di fabbrica che si propone in elevazione. Nelle zone periferiche, dove gli sforzi diminuiscono la piastra è sostituita con un sistema a trave rovescia che presenta un minore approfondimento.

Per quanto attiene più specificatamente alla zona con maggiore impegno statico, al di sotto della piastra irrigidente e nei punti di singolarità degli sforzi, sono stati ubicati 128 pali di fondazione con diametro di 1 m e profondità di 22 m (Fig.3).

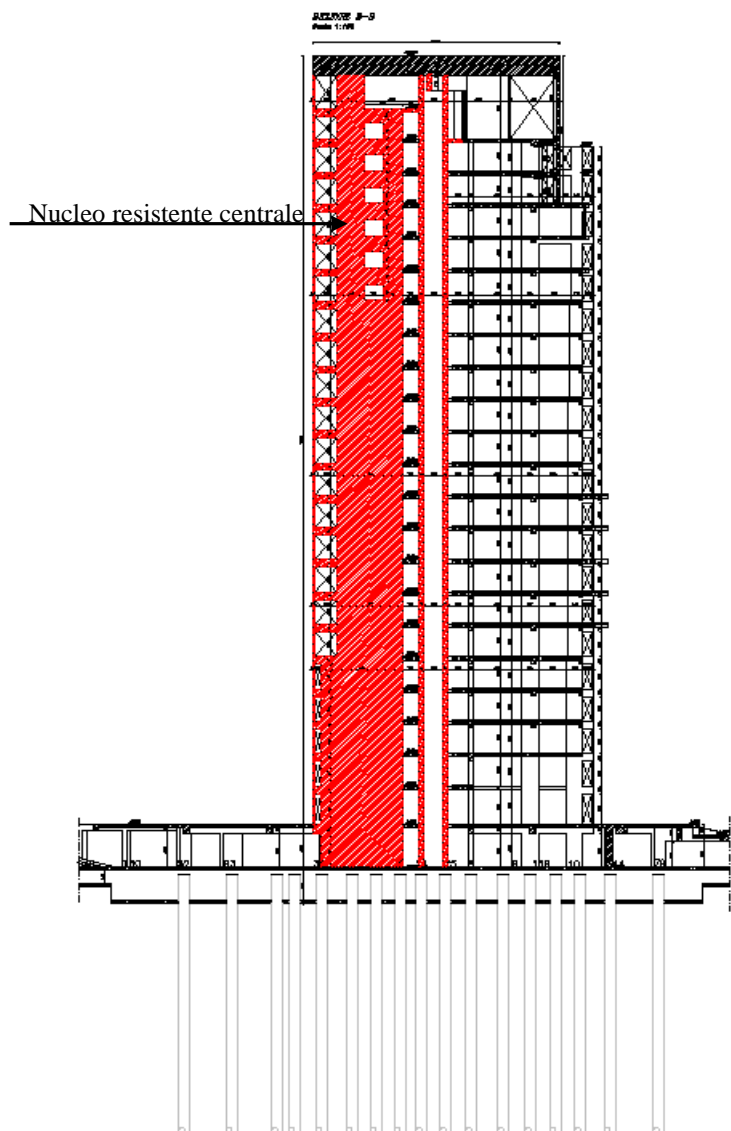


FIG. 2 – NUCLEO RESISTENTE



FIG. 3 – REALIZZAZIONE DELLA FONDAZIONE

La struttura portante in elevazione è stata realizzata mediante elementi monodimensionali, ossia travi e pilastri in c.a. con alcune pareti a taglio, tutte collegate, mediante impalcati rigidi ad un nucleo - irrigidente coincidente con il vano scala e con i vani ascensori. Di seguito, sono riportate rispettivamente, la carpenteria di I impalcato e quella di un piano tipo (Fig.4-5).

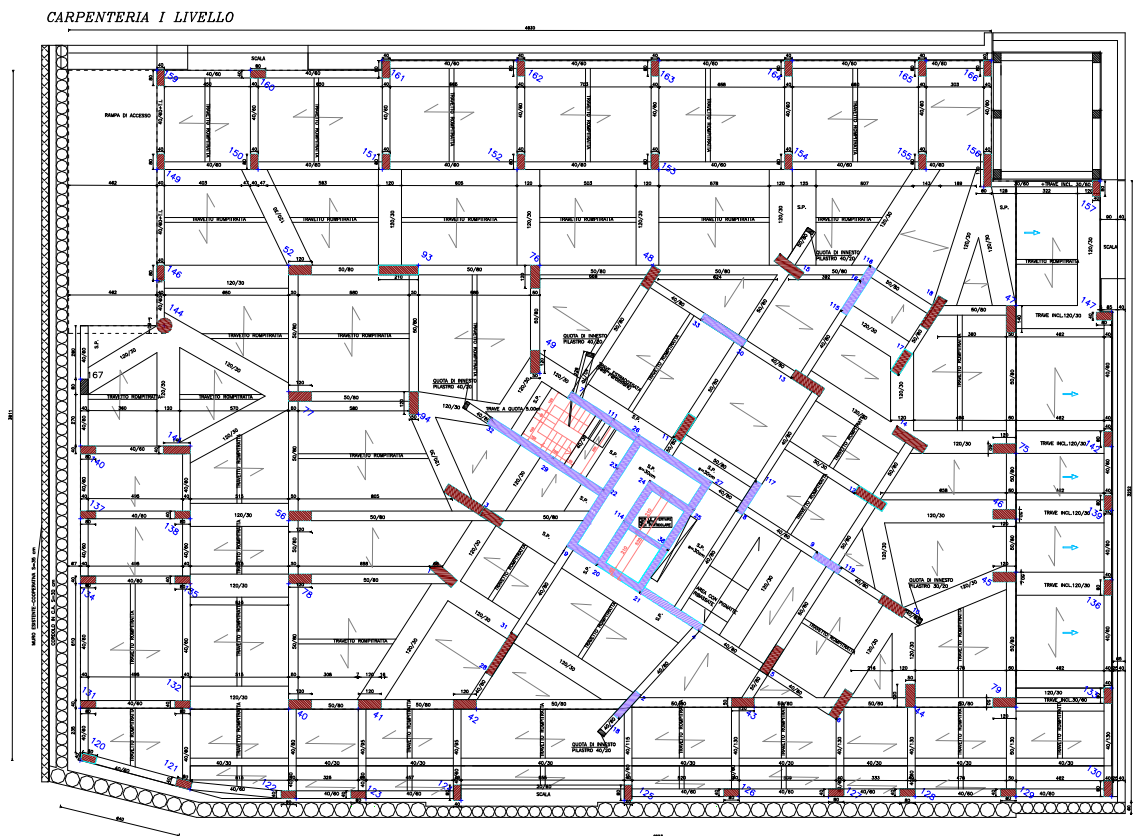


FIG. 4 – CARPENTERIA I LIVELLO

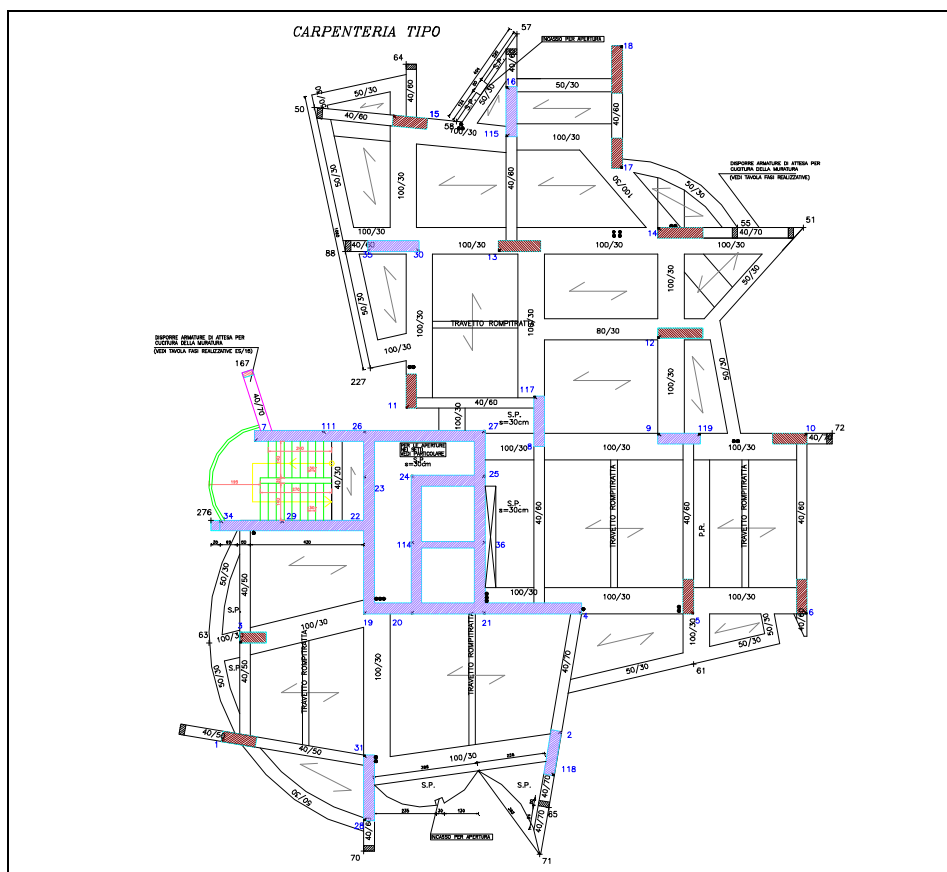


FIG. 5 – CARPENTERIA TIPO

Per tutti i livelli sono stati adottati solai del tipo a travetto singolo in c.a.p. con interposizione di laterizi con altezza pari a 30.0cm.

Infine, in riferimento alle opere di sostegno realizzate, esse consistono principalmente in delle pareti in c.a. del tipo a mensola e in pali accostati di diversa geometria. In particolare, per esigenze costruttive, si è optato per la palificata continua, per le aree limitrofe con la strada pubblica e soggetta a carichi di transito di prima categoria e per quelle prossime ad altre proprietà.

2.0 CONTROLLO SUI CALCESTRUZZI MEDIANTE TECNICHE NDT.

L'attività sperimentale condotta sui calcestruzzi ha consentito di perseguire due obiettivi principali.

Il primo, quello della progettazione delle miscele di calcestruzzo, da utilizzare per la realizzazione delle membrature portanti dell'edificio. Infatti, le ricette previste e utilizzate, sono state diversificate in fase progettuale, in termini di resistenza a rottura e di classe di lavorabilità, in funzione delle geometrie degli elementi resistenti, del loro impegno statico e del quantitativo di armatura presente. Per quanto attiene al secondo obiettivo raggiunto, è stato possibile fornire,

alla Direzione Lavori, curve proprie di correlazione per i calcestruzzi, basate su parametri NDT, per controllare tutte le membrature realizzate in fase di costruzione. Le curve naturalmente, hanno anche una valenza applicativa per il futuro, al fine di effettuare eventuali controlli in esercizio sull'edificio. Lo Skyline infatti, è stato dotato di Piani Manutentivi, integrati sinergicamente con le indagini sperimentali, affinché, nel corso della sua vita utile, sia sempre possibile effettuare, in modo non invasivo e programmato, una verifica sulla affidabilità e sulla conservazione del calcestruzzo presente sulle sezioni resistenti, al fine di valutare l'eventuale degrado del materiale in opera.

Attraverso la fase di prequalifica, sono state messe a punto tre diverse ricette per la produzione dei calcestruzzi da impiegare nella realizzazione di travi di fondazione (Rck 300 – classe di consistenza S3), delle strutture di elevazione, travi e pilastri (Rck 400 – classe di consistenza S3) e dei setti di irrigidimento (Rck 400 – classe di consistenza S4).

Per tutte e tre le tipologie sono state ricavate sperimentalmente, curve di correlazione per applicare il metodo sclerometro (Fig.6), il metodo ultrasonoro (Fig.7) e il metodo Sonreb. Ogni curva di correlazione è stata ottenuta su un campione rappresentativo di 20 cubi confezionati prima della realizzazione dell'opera. Tali curve, proprie dei materiali impiegati, hanno consentito, in corso d'opera, di verificare la qualità puntuale delle membrature portanti registrando gli incrementi di resistenza al passare del tempo e consentiranno, per come già detto, nel corso della vita dell'opera, di eseguire un controllo di natura comparativa, rilevando eventuali scadimenti delle proprietà meccaniche dei materiali.



FIG. 6 – INDAGINE SCLEROMETRICA

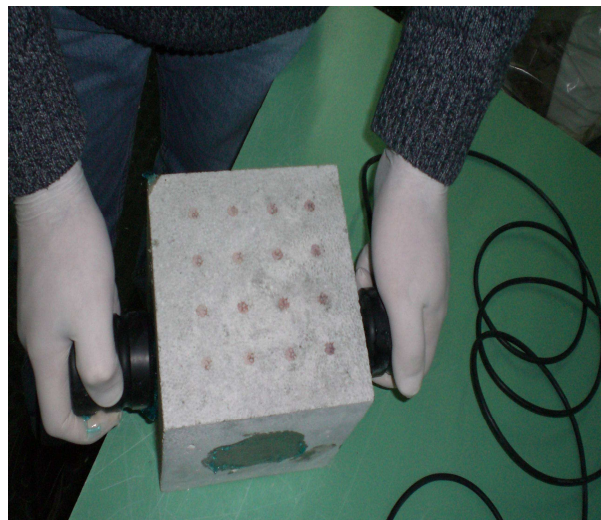


FIG. 7 – INDAGINE ULTRASONORA

3.0 CONTROLLO DELLE STRUTTURE PORTANTI MEDIANTE MONITORAGGIO A FIBRA OTTICA

Il monitoraggio strutturale, eseguito con la tecnologia dei sensori a fibra ottica, residenti per annegamento nelle membrature portanti, permette di sorvegliare nel tempo, con periodicità programmata, la funzionalità statica delle strutture, mediante il controllo delle deformazioni e degli spostamenti. I sensori a fibra ottica sono rilevatori di spostamento e deformazione che,



FIG. 8 – INSTALLAZIONE DI UN SENSORE SU UN PALO DI FONDAZIONE

sfruttando i principi di ottica ondulatoria, adottano per le misurazioni non più le proprietà della corrente elettrica bensì quelle della luce.

E' importante sottolineare, soprattutto nel caso di strutture di nuova costruzione che, la posa in opera di un sistema di monitoraggio strutturale a fibra ottica, a fronte di un costo percentualmente minimo rispetto a quello dell'opera, fornisce uno strumento fondamentale per la

valutazione dell'efficienza strutturale nel tempo. Il controllo viene eseguito in tempo reale, acquisendo, su elementi guida opportunamente identificati, i valori di deformazione di alcune barre d'acciaio in essi contenute. Per tutti gli elementi strutturali prescelti sia in fondazione che in elevazione i sensori dovranno essere collocati sulle barre di armatura prima della fase di getto (Fig.8), ciò permetterà, di avere informazioni sul regime di sollecitazione presente e sulla sua evoluzione, sin dalla fase di maturazione del calcestruzzo.

Il sistema di monitoraggio installato sullo Skyline, è stato progettato e realizzato in funzione di precise richieste tecniche, le quali, mirano principalmente a perseguire i seguenti obiettivi:

- Possibilità di eseguire il controllo in opera sulle membrature portanti;
- Possibilità di eseguire misure sperimentali sulla evoluzione del regime di sollecitazione delle sezioni resistenti, nelle fasi costruttive;
- Misura del regime di sollecitazione ad opera completa, per poter eseguire, con metodologia comparativa, verifiche di affidabilità statica nel corso della vita utile.

Il progetto del sistema di acquisizione, pertanto, è stato redatto, partendo dall'analisi delle

sollecitazioni presenti, per effetto delle diverse condizioni di carico previste dalle norme, procedendo, alla identificazione delle membrature guida più sollecitate, da sottoporre a controllo sia in fondazione che in elevazione.

Complessivamente sull'opera sono stati installati n.52 sensori a fibra ottica (Fig.9):

- n. 4 sensori sui pali di fondazione;
- n. 4 sensori sulle travi di fondazione;
- n. 44 sensori sui pilastri e sulle travi in elevazione.

L'installazione dei sensori, sulle strutture in elevazione, ha interessato pilastri e travi per complessivi 11 livelli. Più precisamente, i sensori sono stati posizionati al piano interrato, al piano terra, ed alternativamente ai piani successivi.

Ogni gruppo di sensori, relativo ad un determinato piano, è stato collegato ad un box di connessione, dal quale, potranno essere registrate le deformazioni nei pilastri e nelle travi dell'intero livello.

L'attività sperimentale in particolare, ha interessato sia le fasi costruttive che, la fase di completamento dell'opera per un periodo di tempo sufficientemente rappresentativo. In tutti gli intervalli temporali sono stati acquisiti i valori di deformazione sugli elementi guida fornendo utili comparazioni con i valori teorici attesi. In dettaglio, per le fasi costruttive, si è provveduto a diagrammare i valori di tensione al crescere dei pesi propri della struttura, verificando la rispondenza ai valori teorici, ciò per accertare implicitamente la mancanza di difetti costruttivi e

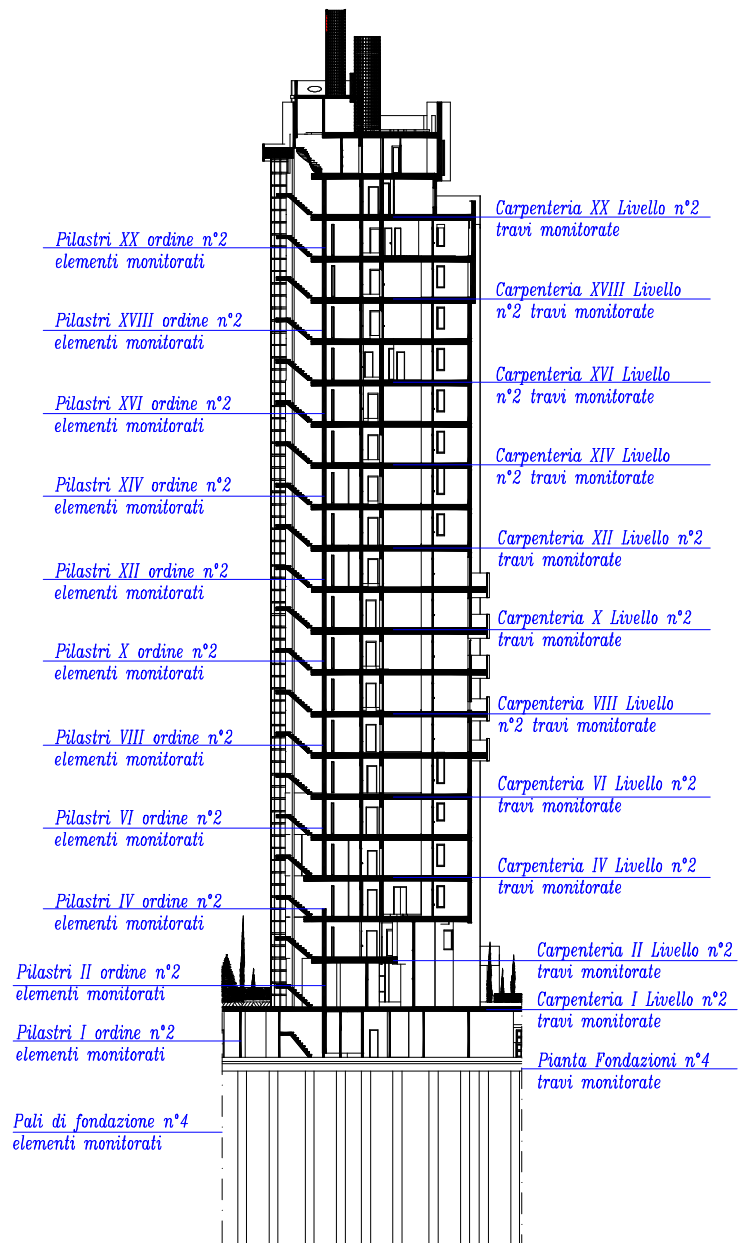
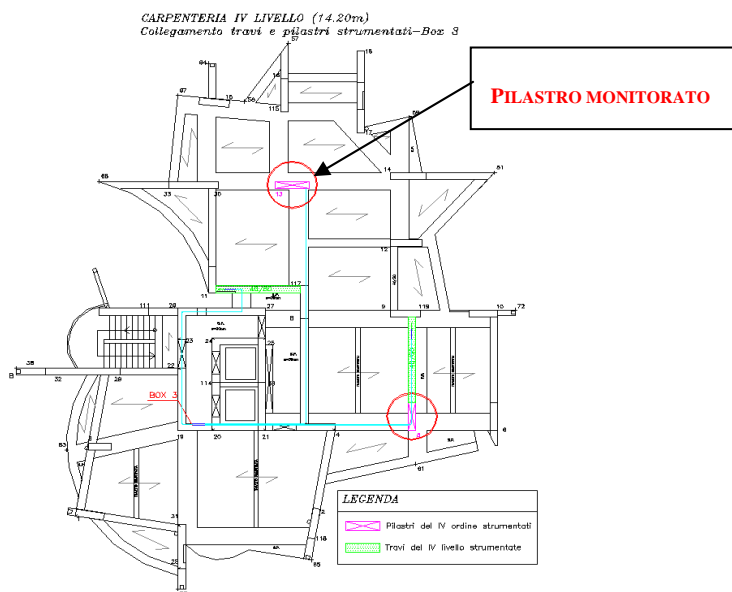


FIGURA 9 – ELEMENTI RESISTENTI MONITORATI



**FIGURA 10 – CARPENTERIA IV –ELEMENTI MONITORATI:
TRAVI E PILASTRI**

la realizzazione a perfetta opera d'arte dell'edificio. Per quanto attiene invece alla sperimentazione ad opera completa, sono stati diagrammati i livelli di deformazione sulle membrane portanti, relativi a tutti i pesi propri presenti e le loro escursioni per effetto delle variazioni termiche stagionali. Ciò costituirà in futuro, un utile elemento di comparazione per verificare periodicamente lo stato di salute della struttura. Per brevità di esposizione, verranno illustrati alcuni

risultati sperimentali relativi ad un pilastro monitorato ed ubicato al IV ordine (Fig.10), mostrando gli incrementi di sforzo registrati a seguito della realizzazione dei solai partendo dall'XI impalcato fino al XVII. I diagrammi riportati nella figura 11 mostrano, in forma adimensionale, gli incrementi di tensione sul pilastro, ottenuti dalle misure sperimentali di deformazione, comparati, con quelli simulati numericamente con un codice agli elementi finiti.

La valutazione teorica delle tensioni è stata effettuata utilizzando le ipotesi canoniche della tecnica delle costruzioni, ossia conservazione delle sezioni piane, omogenizzazione con coefficiente pari a 15, e ipotesi di calcestruzzo teso non collaborante. Per quanto attiene al riscontro tensionale, ricavato dalle misure di deformazione sulla base del sensore, con lunghezza di 30 cm, si è fatto riferimento alla legge di Hooke.

Complessivamente per la membratura si apprezza una discreta concordanza dei valori, con scostamenti che al più, raggiungono variazioni del 20%. La buona aderenza, tra i risultati sperimentali e le previsioni di calcolo, attesta la corretta rispondenza dell'opera al progetto, una buona esecuzione delle strutture ed inoltre, in forma indiretta, che la modellazione di calcolo adottata, simula sufficientemente bene il comportamento reale della struttura.

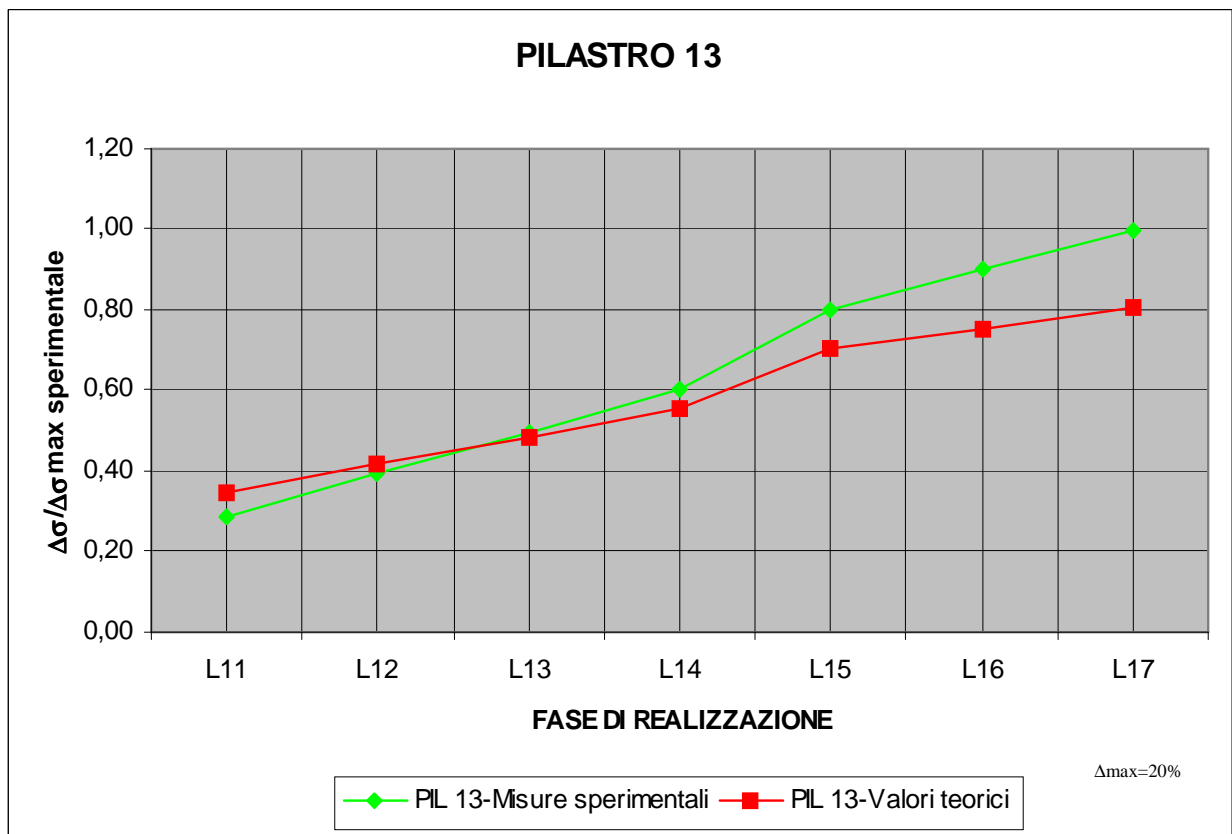


FIGURA 11 – PILASTRO 13 – INCREMENTI DI TENSIONE TEORICI E SPERIMENTALI

4. CONCLUSIONI

La metodologia proposta, basata sull'uso delle tecniche NDT e dei sensori a fibra ottica, costituisce un utile strumento, per il controllo dei materiali in opera e della efficienza statica, sia di edifici in c.a. di nuova costruzione, che di qualsiasi opera infrastrutturale, quali ponti e viadotti. In particolare, mediante un sistema di monitoraggio residente, sarà possibile verificare l'affidabilità delle opere non solo in condizioni ordinarie, ma anche a valle di eventi particolari, quali sismi, o condizioni di carico eccezionali. Inoltre, per come è stato mostrato dai risultati sperimentali, anche l'incremento dei regimi di sforzo, prodotto dalla realizzazione di porzioni di edificio, è rilevabile su travi e pilastri per la verifica della corretta esecuzione e per il controllo di quanto previsto in fase progettuale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Glisic, D. Inaudi. GUIDI – (2007), *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons.
- [2] M. Raymond – (2001), *Structural monitoring with fiber optic technology*, Academic Press.
- [3] P.G. Malerba –(1995) *Monitoraggio delle strutture dell'ingegneria civile*. CISM – International Centre For Mechanical Sciences – Collana di ingegneria strutturale n° 9.