

Revisione	Sostituisce codice	Disegno N°	del	Modifica

Committ.	Comune di Ancona - Direzione Progettazioni, Manutenzioni, Viabilità, Frana e Sicurezza			Disegno	07
Oggetto	Rilievo critico delle strutture del complesso edilizio della Mole Vanvitelliana di Ancona e coordinamento e l'assistenza alle indagini e prove sui materiali			Modifica	A
Elaborato	INDAGINI SULLE STRUTTURE (CALCESTRUZZO) Relazione interpretativa delle prove sperimentali			Serie	IS
Codice	001-16_IS.07.A001	Data	01.06.2016	Scala	--
				Redatto	M. F.

ing. Massimo Formica

viale Carducci, 21 - 62019 Recanati (MC)

e-mail: massimoformica@tin.it

tel: +39 338 3073928

Progettista

Timbro
e firma

Sommario

1	Introduzione	4
2	Descrizione delle strutture e stato di conservazione	4
3	Indagini pacometriche	7
3.1	Indagini eseguite sui telai n.03 e n.09 della struttura “Nervi”	10
3.1.1	Risultati dell'indagine sul telaio n.3	10
3.1.2	Risultati dell'indagine sul telaio n.9	16
3.2	Risultati delle indagini sulle solette del solaio	22
4	Prove dirette mediante carotaggi per la determinazione della resistenza del cls.	23
4.1	Descrizione del metodo	23
4.2	Risultati delle prove eseguite sulla struttura “Nervi”	31
5	Prove di carbonatazione	34
5.1	Profondità di carbonatazione valutata nelle carote eseguite sulla struttura “Nervi”	35
6	Prove di trazione sugli acciai	38
7	Metodo SonReb	39
7.1	Premessa	39
7.2	Durezza superficiale (indice di rimbalzo)	39
7.3	Vibrazioni ad alta frequenza (ultrasuoni).....	42
7.3.1	Principi base del metodo.....	43
7.3.2	Strumentazione di misura.....	43
7.3.3	Tecniche di misura.....	44
7.3.4	Metodo di trasmissione diretta o per trasparenza.....	44
7.4	Metodo SonReb (descrizione)	47
7.4.1	Funzioni di correlazione disponibile dalla letteratura tecnica	47
7.4.2	Funzione di correlazione specifica del sito.....	48

7.4.3	Campo di utilizzo del metodo	49
7.5	Risultati indagine SonReb condotta sui telaio in cls	49
7.5.1	Descrizione generale	49
7.5.2	Risultati ottenuti dei valori di IR e velocità ultrasonica	54
7.5.3	Metodo dei coefficienti di influenza globale.....	55
7.5.4	Risultati da correlazione specifica del sito	56
7.6	Sintesi delle indagini effettuate da UNIAN nel 1990.....	59

1 Introduzione

La presente relazione è relativa alla campagna di indagini eseguita sulle strutture in cls dei telai della struttura "Nervi" presente sul lato BC dell'edificio Mole Vanvitelliana. Le prove condotte sono di tipo distruttivo (carotaggi sulle sezioni in cls e prelievo delle armature in acciaio) e non distruttivo (prove pacometriche, prove SonReb, prove di carbonatazione). Nel seguito sono descritte le caratteristiche delle diverse metodologie di prova ed i risultati in dettaglio, relativi all'opera in oggetto.

2 Descrizione delle strutture e stato di conservazione

La struttura in cls della zona "Nervi" sono costituite da 18 telai piani disposti in direzione ortogonale alle pareti principali in muratura del pentagono e con interasse longitudinale costante di circa 3,56 m. In elevazione ciascun telaio è organizzato in tre livelli (il primo livello si trova alla quota +7.80 m, il secondo alla quota +10.55 m ed il terzo alla quota +13.30 m), con un'ulteriore coppia di pilastri a sostegno della copertura, costituita da capriate lignee. Ogni telaio è composto da due pilastri che rastremano con l'altezza in direzione trasversale (lato corto del pentagono principale) di dimensioni 35x35 cm al primo livello, 35x25 cm al secondo e terzo livello e 25x25 cm per la coppia di pilastri a sostegno della copertura. Le travi a sostegno degli orizzontamenti hanno sezione 25x50 cm, sono ordite solamente in direzione trasversale e presentano un tratto a sezione variabile in corrispondenza dei pilastri. Alle prime due elevazioni le travi si intestano nelle pareti perimetrali in muratura per una profondità di circa 40 cm, mentre al terzo livello la trave collega solamente i due pilastri. Il solaio è costituito da una soletta in c.a. di spessore pari a 11 cm in mezzeria e variabile fino a 14 cm all'attacco con le travi principali.



Figura 2-1 - Vista dei telai in c.a.(quota +7,80 m)



Figura 2-2 - Vista dei telai del telai in c.a. quote +10,55 e +13,30 m

Le fondazioni della struttura in c.a. sono costituite da plinti isolati di dimensioni 2.0 x 2.0 m, approfonditi, rispetto al solaio di calpestio del primo livello, di circa 2.0 m (quota d'imposta del magrone).



Figura 2-3 - Immagini di saggi in fondazione

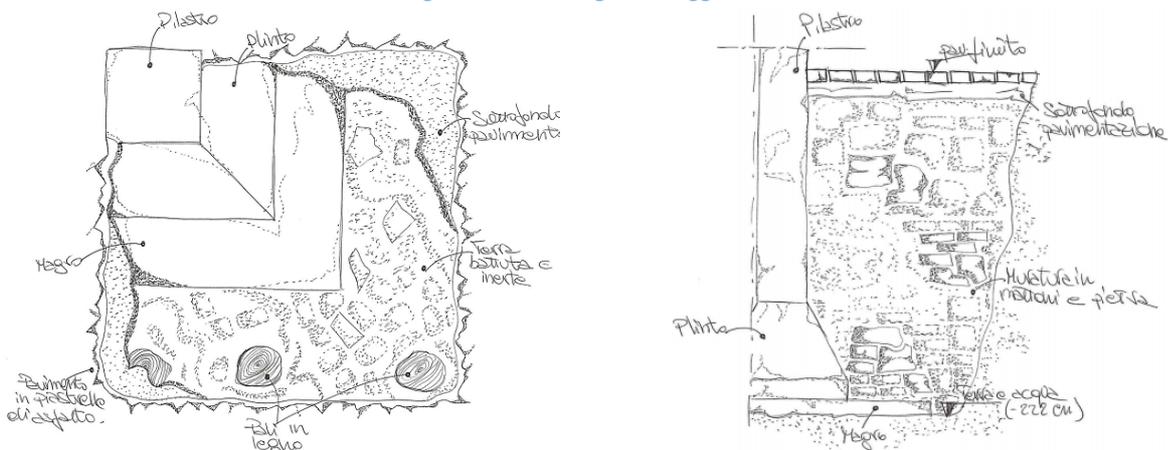


Figura 2-4 - Disegni degli scavi di fondazione

I telai in c.a. presentano al variare delle quote un diverso livello di degrado. In particolare le sezioni maggiormente ammalorate risultano quelle della prima elevazione dei pilastri in quanto soggette in fase di getto a problemi di segregazione del calcestruzzo, caratteristica che allo stato attuale ha determinato una disgregazione evidente del calcestruzzo esterno in un tratto di circa 50-80 cm di lunghezza a partire dall'attuale quota del terreno (+2.65). Tale tratto infatti è stato interessato da cicli asciutto-bagnato a differenza delle altre zone dello stesso pilastro che invece sono state in permanenza bagnate (zone interrate) e asciutte (zone superiori).

Nelle restanti parti dei telai il degrado è comunque evidente ma rilevabile in regioni circoscritte.



Figura 2-5 - Viste delle zone maggiormente ammalorate dei pilastri in calcestruzzo

Le armature interne agli elementi principali (travi e pilastri) ed alle solette sono di tipo liscio, e in corrispondenza dei saggi effettuati evidenziano segni di ossidazione. I copriferri delle armature trasversali sono estremamente esigui (< 10 mm).



Figura 2-6 – Saggi su porzioni di pilastri: barre lisce e copriferri esigui

3 Indagini pacometriche

Lo scopo delle indagini è quello di determinare la posizione delle armature, lo spessore del copriferro e, con buona approssimazione, il diametro dei ferri. I metodi pacometrici sono tecniche di indagine sub-superficiale utilizzate per la ricerca di elementi metallici (ferrosi e non ferrosi) non visibili posti ad una certa profondità (fino a 100 mm) dalla superficie in esame. Tradizionalmente il metodo pacometrico è basato sul principio dell'induzione magnetica e cioè sulla perturbazione di un campo magnetico, generato da una sonda che viene fatta scorrere sulla superficie in modo continuo, operata da elementi con diversa (e più elevata) permeabilità magnetica rispetto a quella che caratterizza il materiale in cui tali elementi sono inglobati. Sul principio delle correnti indotte di Foucault ("eddy currents") viene invece basato un metodo di indagine tecnologicamente più avanzato.

Le bobine presenti nella sonda di rilevazione vengono percorse da impulsi di corrente; al termine di ciascun impulso vengono indotte delle correnti elettriche (correnti di Foucault) attorno all'elemento metallico. La persistenza di tali correnti genera un'eco che viene captata dalla sonda negli intervalli tra i vari impulsi emessi. I vantaggi di questa tecnica rispetto al metodo magnetometrico consistono in una elevata stabilità, nella insensibilità agli effetti ionici dell'umidità presente nel materiale, nell'assoluta indifferenza rispetto ad interferenze dovute alla presenza nel materiale di ingredienti con caratteristiche magnetiche e ad interferenze elettriche ed, infine, nella insensibilità alle variazioni termiche.

L'indagine con pacometro risulta essere un metodo non distruttivo, non invasivo ed in grado di fornire informazioni di tipo quantitativo in ordine alla posizione degli elementi metallici, alla loro profondità e, nel caso di barre cilindriche, al loro diametro.

Il metodo è preciso e affidabile per quanto riguarda la determinazione della posizione, direzione e profondità degli elementi metallici; gli elementi di forma prismatica (con sezione trasversale di forma diversa da un cerchio) vengono "visti" come se fossero di sezione circolare. Sono, in ogni caso, da attendersi errori del 10% sul diametro equivalente per dimensioni trasversali e elevate (oltre 25 mm).

Lo strumento, in genere composto da un'unità di emissione e lettura del campo elettromagnetico, da una o più sonde emittenti-riceventi il campo magnetico e da eventuali spessori di materiale

paramagnetico, consente una ricostruzione affidabile delle armature, soprattutto quando si intende controllarne le modalità di posa in opera. Il pacometro infatti:

- permette di determinare la posizione, la direzione ed il numero delle barre di armatura principali e secondarie;
- fornisce la misura del copriferro fino a circa nove centimetri;
- valuta il diametro delle barre di armatura;
- rileva la presenza di oggetti metallici, quali tubazioni, cavi elettrici, tiranti e può essere utilizzato per la localizzazione di cordoli, architravi, travi e pilastri (immersi nelle murature) nervature di solai non visibili ecc.

Due sonde, una di superficie ed una di profondità, aventi differenti caratteristiche consentono a questo strumento di risolvere in modo sicuro anche problemi più complessi di localizzazione e misurazione. La sonda di superficie localizza esattamente le barre di armatura in disposizioni estremamente complesse e dense e misura il copriferro con errori minimi, anche con barre di diametri non conosciuti o su gruppi di barre. Nel campo da 0 a 6 cm di copriferro, è preferibile usare la sonda di superficie perché il suo potere di analisi è quasi doppio rispetto all'altra. E' invece indispensabile usare la sonda di profondità per coperture oltre i 6 cm di copri ferro. La messa in servizio della strumentazione si effettua tenendo la sonda prescelta, lontano dagli oggetti metallici e quindi, dopo aver chiuso il circuito di misura premendo un tasto dell'apparecchiatura, si ottiene l'azzeramento della stessa. Per individuare la presenza delle barre, la sonda, in un primo tempo, le magnetizza brevemente e quindi ne rivela il campo magnetico indotto man mano che questo si dissolve.

La forza del campo indotto dipende essenzialmente dalla distanza della barra dalla sonda di ricerca e, in misura minore, dal suo diametro. La sonda di ricerca contiene due bobine. Quando ricevono un impulso di corrente, queste bobine creano un campo magnetico che magnetizza la barra di armatura e vi induce delle correnti parassite (correnti Foucault). Esaurito l'impulso di corrente, le correnti parassite si dissolvono creando un campo magnetico di intensità molto ridotta quale "eco" dell'impulso iniziale. Le bobine contenute all'interno della sonda misurano la forza del campo indotto man mano che questo si dissolve e tale segnale viene poi elaborato per fornire la misura della profondità della barra. L'eco delle correnti parassite proveniente dalla barra di armatura non è determinata esclusivamente dal diametro della barra e dalla distanza di quest'ultimo dalla sonda, ma anche dall'orientamento della sonda rispetto alla barra da cui si risale alla direzione delle armature. Gli strumenti che utilizzano il principio operativo delle "eddy current" (correnti parassite)

non sono soggetti a molteplici problemi derivanti da fattori dovuti a condizionamenti fisici, ambientali, e dalle caratteristiche intrinseche del materiale indagato. Infatti, non presentano problemi di interferenze elettriche, magnetiche, termiche e non vi sono condizionamenti dovuti agli effetti ionici dell'umidità nel calcestruzzo non stagionato. La precisione e la ripetibilità, sono ulteriori caratteristiche che producono prestazioni impareggiabili sotto tutti i profili. Per la determinazione della posizione dei ferri, muovendo la sonda si “spazzola” la superficie in esame. Individuata la posizione di assorbimento, si ruota lentamente la sonda fino ad identificarne la direzione di massimo assorbimento che corrisponde a quella di orditura dell'armatura. Per la determinazione del diametro della barra, l'operazione è più complessa e richiede l'esecuzione di almeno due misurazioni.

Tecniche di ricerca delle barre

La sonda di ricerca dello strumento è di tipo direzionale, vale a dire che presenta la massima sensibilità quando viene posizionata con il proprio asse maggiore parallelamente alla direzione delle barre, e la minima quando si trova a 90° rispetto a questa. In fase di ricerca, pertanto, bisogna porre la sonda parallelamente alle barre da individuare e sposterla lateralmente. Se l'armatura metallica è costituita da due file di barre, una verticale e l'altra orizzontale, la ricerca va eseguita due volte, una per ciascuna fila.

Se le due file sono composte da barre di dimensioni simili, di solito è più facile cominciare la ricerca dalle barre più superficiali (dato che producono un segnale più forte e sono meno influenzate dalla presenza delle altre barre). Una volta annotate le posizioni della prima serie di barre, si passa alla localizzazione di quelle della seconda serie facendo scorrere la sonda negli spazi intermedi tra le barre già individuate.

Se invece la parte più superficiale dell'armatura è composta da staffe e legature relativamente sottili, mentre le barre strutturali principali sono più in profondità, è preferibile cominciare le indagini ricercando prima quest'ultime.

Nella parte inferiore dello schermo dello strumento appare una striscia indicante l'intensità del segnale che aiuta ad individuare i punti di picco per la ricerca delle barre. Tuttavia, il dispositivo di segnalazione acustica incorporato risulta molto più comodo e utile in quanto l'operatore può tenere lo sguardo sulla struttura senza dover tenere costantemente d'occhio lo schermo dello strumento.

3.1 Indagini eseguite sui telai n.03 e n.09 della struttura "Nervi"

Con riferimento alla struttura in calcestruzzo della zona "Nervi" è svolta una campagna di indagini pacometriche dalla ditta Technogeo di Montecosaro (MC) sugli elementi principali (travi e pilastri) telai n.03 e n.09 e su porzioni di soletta orizzontale. Per i telai, considerata la simmetria delle sezioni, l'indagine è stata svolta su una sola metà della struttura. Sono messe a disposizione le tavole di progetto originarie della struttura in cui sono presenti le distinte delle armature.

L'attrezzatura di prova utilizzata è un pacometro Elcometer 331 composto da:

- centralina di misura matricola MC016;
- sonda matricola MD77978-014.

Per il rilievo delle barre di armatura inferiori delle travi è stato necessario procedere, in alcune aree, all'esecuzione di saggi diretti mediante asportazione dei copriferri, data l'impossibilità degli strumenti di rilevare l'esatto numero e diametro delle barre perché in quantità elevata e troppo ravvicinate.

L'indagine ha messo in evidenza l'esiguità dei copriferri rilevata sia strumentalmente sia con asportazione localizzata degli stessi. Il valore del copriferro è risultato inferiore alla profondità di carbonatazione.

Nel seguito sono riportati i risultati delle indagini che hanno mostrato una sostanzialmente corrispondenza con la distinta presente negli elaborati di progetto originari.

3.1.1 Risultati dell'indagine sul telaio n.3

Trave esterna piano terra

Dal rilievo effettuato dopo la rimozione del copriferro a 2,15 m dal pilastro, sono stati individuati 6 ferri longitudinali inferiori, 3 ϕ 16 e 3 ϕ 8. Individuati, in prossimità dell'appoggio sulla parete, 2 ϕ 16 longitudinali, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 2 cm.

Il passo delle staffe rilevato dal pilastro alla parete è di: 18, 18, 18, 20, 25, 25, 25, 23, 28, 31, 30, 31, 20, 26, 27, 21, 25 e 15 cm.



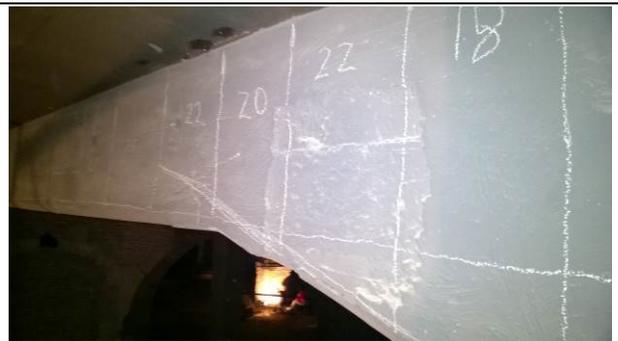
Trave centrale piano terra

Individuati 6 ferri longitudinali inferiori 4 ϕ 16, 1 ϕ 10 ed 1 ϕ 8 in mezzeria e 2 ϕ 16 longitudinali agli appoggi. Individuati inoltre 4 ϕ 10 obliqui all'intradosso del ringrosso in prossimità del pilastro, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 2 cm.

Il passo delle staffe rilevato dal pilastro alla mezzeria della trave è di: 16, 18, 22, 20, 22, 26, 23, 28, 28, 30, 30, 33 e 25 cm.



Fotografia 3

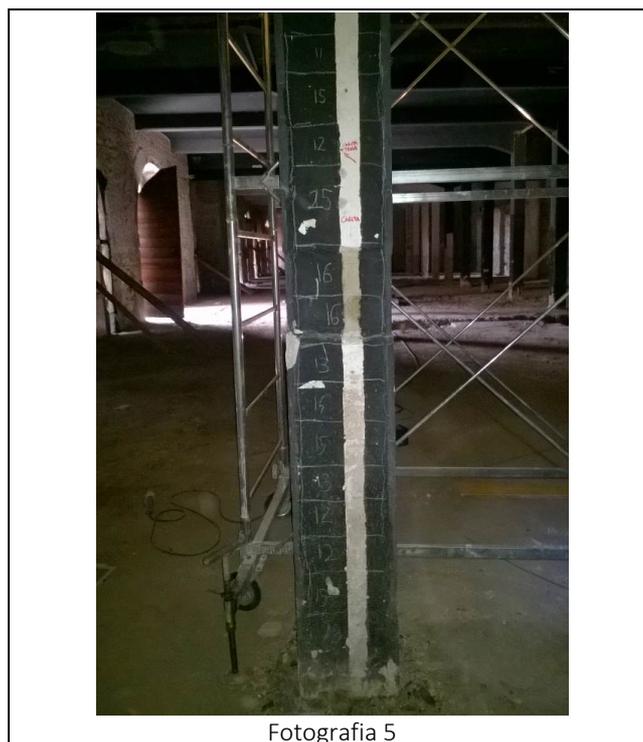


Fotografia 4

Pilastro esterno piano terra

Individuati 3 ϕ 14 verticali per ognuna delle facce ortogonali alle travi, staffe ϕ 5 e copriferro di circa 2 cm.

Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 37, 31, 18, 17, 12, 15, 12, 17, 15, 13, 14, 12, 13, 15, 11, 15, 12, 25, 16, 16, 13, 14, 15, 13, 12, 12, 15 e 13 cm



Fotografia 5

Trave esterna piano primo

Dal rilievo effettuato dopo la rimozione del copriferro sono stati individuati 6 ferri longitudinali inferiori, 4 ϕ 16, 1 ϕ 10 ed 1 ϕ 8 in mezzeria e 2 ϕ 16 agli appoggi. Individuati inoltre 2 ϕ 16 e 2 ϕ 8 obliqui all'intradosso del ringrosso in prossimità del pilastro, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 1,5 cm.

Il passo delle staffe rilevato dalla parete al pilastro è di: 15, 16, 12, 26, 23, 27, 25, 30, 27, 24, 42, 31, 29, 30, 17, 30, 20, 16, 15, 15, 16, 13 e 7 cm.

Trave centrale piano primo

Individuati 6 ferri longitudinali inferiori, 4 ϕ 16, 1 ϕ 10 ed 1 ϕ 8 in mezzeria e 2 ϕ 16 longitudinali agli appoggi. Individuati inoltre 2 ϕ 16 e 2 ϕ 8 obliqui all'intradosso del ringrosso in prossimità del pilastro, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 1,5 cm.

Il passo delle staffe rilevato dal pilastro alla mezzeria della trave è di: 8, 14, 16, 17, 16, 29, 25, 23, 25, 30, 28 e 30 cm.



Pilastro esterno piano primo

Individuati 2 ϕ 14 verticali per ognuna delle facce, staffe $<|>$ 5 e copriferro di circa 1,5 cm.

Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 36, 24, 13, 10, 11, 13, 13, 12, 14, 15, 13, 10, 11, 12, 11, 14, 13 e 10 cm.



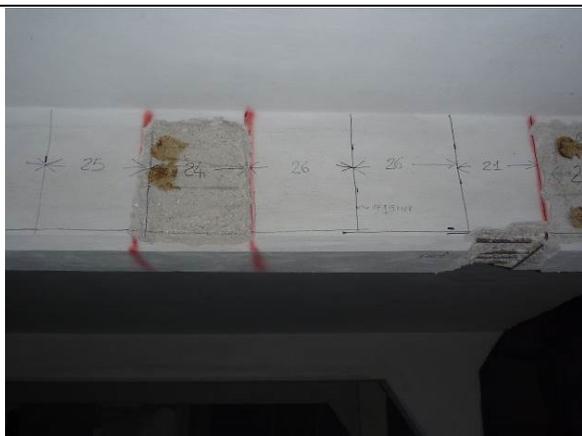
Fotografia 8



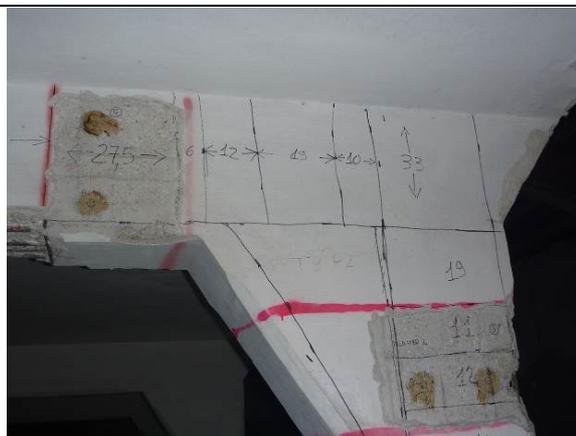
Fotografia 9

Trave centrale piano secondo

Dal rilievo effettuato dopo la rimozione del copriferro sono stati individuati 4 ferri longitudinali inferiori, 3 ϕ 16 ed 1 ϕ 20 a circa 90 cm dal pilastro. Individuate staffe ϕ 8 e copriferro di circa 1,5 cm. Il passo delle staffe rilevato dalla mezzeria al pilastro è di: 19, 28, 26, 25, 24, 26, 26, 21, 27,5, 6, 12, 19 e 10 cm.



Fotografia 60

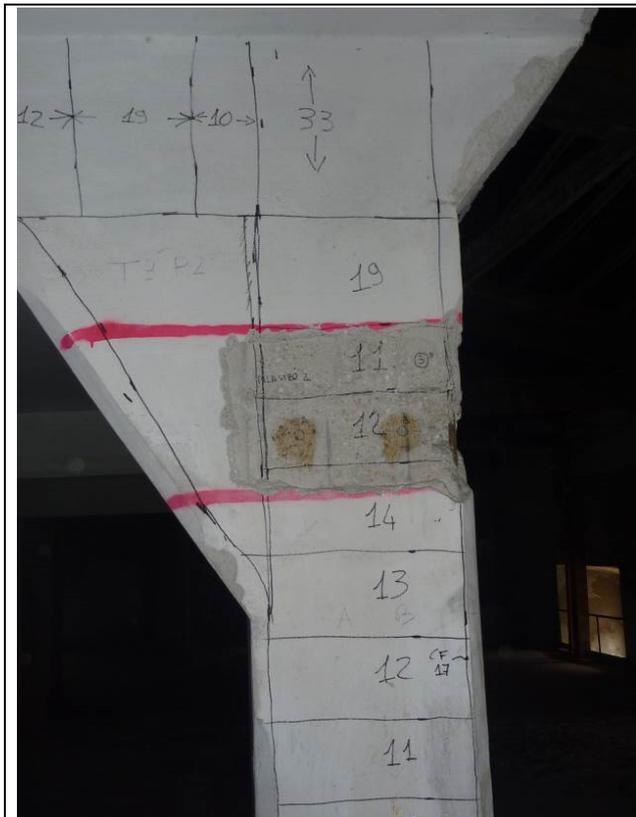


Fotografia 11

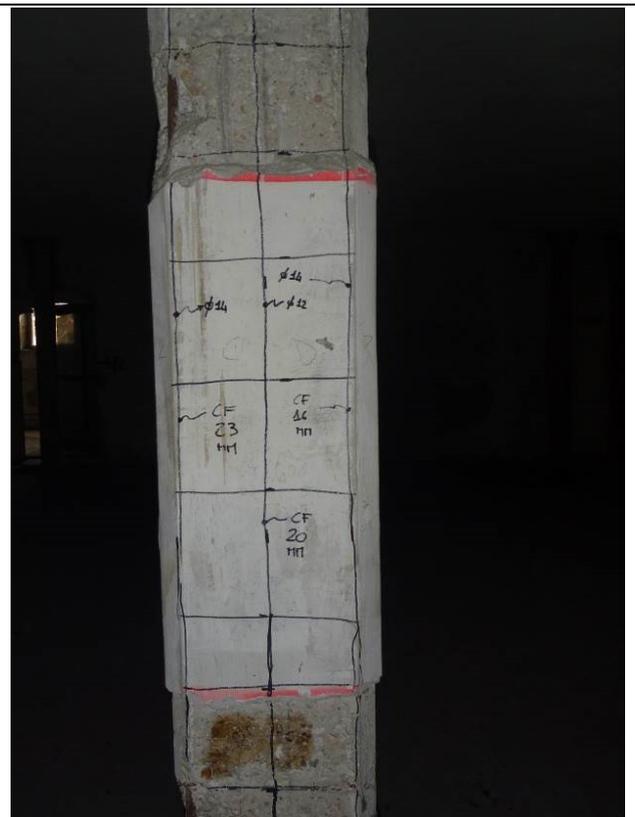
Pilastro esterno piano secondo

Individuati 2 ϕ 14 verticali per ognuna delle facce, staffe ϕ 5 e copriferro di circa 2 cm. Individuato 1 ϕ 12 verticale centrale per 1,75 m dalla soletta verso il basso sulla faccia esterna del pilastro.

Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 33,19,11, 12, 14, 13, 12, 11,12,13, 12, 13,11,15, 8,5,12,14 e 13 cm.



Fotografia 72



Fotografia 13

Pilastro esterno piano terzo

Individuati 2 ϕ 10-12 verticali per ognuna delle facce, staffe ϕ 5 e copriferro di circa 2 cm.
Individuato 1 ϕ 10-12 verticale centrale sulla faccia interna del pilastro.

Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 21, 7, 14, 13, 10, 13, 10, 14, 15, 12, 11, 10, 10, 16, 12 e 10 cm.



Fotografia 14



Fotografia 15

3.1.2 Risultati dell'indagine sul telaio n.9

Trave esterna piano terra

Dal rilievo effettuato dopo la rimozione del copriferro sono stati individuati 8 ferri longitudinali inferiori, 5 ϕ 16 e 3 ϕ 8 in mezzeria e 4 ϕ 16 agli appoggi. Individuati inoltre 4 ϕ 10 obliqui all'intradosso del ringrosso in prossimità del pilastro, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 2 cm.

Il passo delle staffe rilevato dalla parete al pilastro è di: 20, 20, 19, 24, 26, 23, 27, 34, 25, 30, 30, 38, 35, 24, 31, 20, 31 e 20 cm.



Fotografia 86

Trave centrale piano terra

Dal rilievo effettuato dopo la rimozione del copriferro sono stati individuati 6 ferri longitudinali inferiori, 4 ϕ 16, 1 ϕ 10 ed 1 ϕ 8 a circa 2 m dal pilastro e 4 ϕ 10 obliqui all'intradosso del ringrosso in prossimità del pilastro, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 2 cm.

Il passo delle staffe rilevato dal pilastro verso la mezzeria è di: 15, 20, 17, 20, 20, 30, 26, 24, 30, 32, 33, 26 e 32 cm.



Fotografia 97

Pilastro esterno piano terra

Individuati 3 ϕ 14 verticali per ognuna delle facce ortogonali alle travi, staffe ϕ 5 e copriferro di circa 2 cm. Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 34, 23, 10, 17, 15, 17, 21, 17, 15, 16, 14, 13, 18, 14, 16, 15, 13, 13, 12, 16, 10, 13, 14 e 10 cm.



Fotografia 108



Fotografia 19

Trave esterna piano primo

Individuati 6 ferri longitudinali inferiori, 4 ϕ 16, 1 ϕ 10 ed 1 ϕ 8 in mezzeria e 2 ϕ 16 agli appoggi. Individuati inoltre 2 ϕ 16 e 2 ϕ 8 obliqui all'intradosso del ringrosso in prossimità del pilastro, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 1,5 cm. Il passo delle staffe rilevato dalla parete al pilastro è di: 5, 16, 21, 26, 25, 20, 30, 29, 34, 23, 35, 30, 35, 28, 27, 30, 24, 26, 24, 15, 13, 16, 15 e 20 cm.



Fotografia 20

Trave centrale piano primo

Individuati 6 ferri longitudinali inferiori, 4 ϕ 16, 1 ϕ 10 ed 1 ϕ 8 in mezzeria e 2 ϕ 16 longitudinali agli appoggi. Individuati inoltre 2 ϕ 16 e 2 ϕ 8 obliqui all'intradosso del ringrosso in prossimità del pilastro, staffe ϕ 8 e copriferro di circa 2 cm.

Il passo delle staffe rilevato dal pilastro alla mezzeria della trave è di: 20, 13, 16, 15, 13, 23, 25, 23, 30, 28, 30, 32, 33 e 31 cm.



Fotografia 211

Pilastro esterno piano primo

Individuati 2 ϕ 14 verticali per ognuna delle facce, staffe ϕ 5 e copriferro di circa 1,5 cm. Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 31, 23,13,14,14,10,12,14,13,14,13,15,12,12,12, 9 e 13 cm.

Trave centrale piano secondo

Dal rilievo effettuato dopo la rimozione del copriferro sono stati individuati 4 ferri longitudinali inferiori, 3 ϕ 16 ed 1 ϕ 20 a circa 90 cm dal pilastro. Individuate staffe ϕ 8 e copriferro di circa 1,5 cm. Il passo delle staffe rilevato dalla mezzeria al pilastro è di: 25, 27, 23, 24, 25, 25, 27, 23, 25 ed 11 cm.



Pilastro esterno piano secondo

Individuati 2 ϕ 14 verticali per ognuna delle facce, staffe ϕ 5 e copriferro di circa 2 cm. Individuato 1 ϕ 12 verticale centrale per 1,8 m dalla soletta verso il basso sulla faccia esterna del pilastro.

Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 33, 25, 9, 12, 12, 13, 14, 13, 9, 12, 12, 12, 16, 7, 11, 12, 14 ed 11 cm.



Fotografia 24



Fotografia 125

Pilastro esterno piano terzo

Individuati 2 ϕ 10-12 verticali per ognuna delle facce, staffe ϕ 5 e copriferro di circa 2 cm.

Individuato 1 ϕ 10-12 verticale centrale sulla faccia interna del pilastro.

Il passo delle staffe rilevato dall'alto verso il basso è di: 18, 25, 12, 13, 10, 12, 14, 14, 10, 12, 12, 12, 17 e 17 cm.



Fotografia 26



Fotografia 137

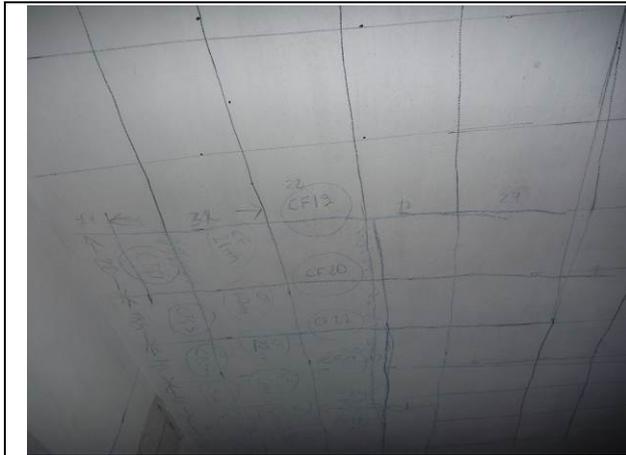
3.2 Risultati delle indagini sulle solette del solaio

Soletta terza elevazione tra Telaio 9 e 10

Individuati ferri longitudinali paralleli alle travi ϕ 10 e ferri trasversali ϕ 5. Copriferrati variabili tra i 2 cm nella parte centrale e 4,5 cm in prossimità delle travi.

Il passo medio delle barre longitudinali rilevato è di circa 19 cm.

Il passo medio delle barre trasversali rilevato è di circa 18 cm.



Fotografia 28



Fotografia 149

4 Prove dirette mediante carotaggi per la determinazione della resistenza del cls.

4.1 Descrizione del metodo

Per la valutazione della resistenza meccanica del calcestruzzo in situ si ricorre alla tecnica del prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo indurito mediante l'ausilio di macchina carotatrice a solo rotazione. Essa è costituita da un motore che fa ruotare un "carotiere" munito di corona a diamanti impregnati raffreddata ad acqua, di tipo adatto alla durezza del conglomerato ed al tipo di aggregato in esso contenuto.

Il blocco motore-carotiere viene fissato alla struttura sottoposta ad indagine mediante un telaio e l'operatore, mediante rotazione di un volantino, regola l'avanzamento del carotiere all'interno del materiale.

L'operazione di estrazione va eseguita con la massima cautela, in modo da arrecare il minimo disturbo al campione. Il carotiere va ancorato in modo opportuno al gruppo motore e l'operazione di avanzamento deve avvenire senza indurre vibrazioni e spostamenti, così da ottenere una carota con diametro costante ed asse rettilineo.

Le carote dovrebbero essere sempre passanti su tutto l'elemento al fine di consentire un prelievo indisturbato del campione.

Si dovrà avere particolare cura ad impiegare una velocità moderata in modo che il campione non risulti disturbato e quindi non utilizzabile ai fini della prova di rottura.

La UNI EN 12504-1:2009 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Carote - Prelievo, esame e prova di compressione", specifica il metodo per il prelievo di carote dal calcestruzzo indurito, il loro esame, la loro preparazione per le prove e la determinazione della resistenza alla compressione.

Il rapporto della dimensione massima dell'aggregato presente nel calcestruzzo rispetto al diametro della carota influenza significativamente la resistenza misurata, quando si avvicina a valori di 1:3 circa.

Posizione

Le carote dovrebbero essere prelevate preferibilmente in punti lontano da giunti o bordi dell'elemento di calcestruzzo. Si deve inoltre evitare, eseguendo una preliminare indagine pacometrica, di eseguire il carotaggio nelle aree interessate dal passaggio delle armature ed in vicinanza dei cavi e dei fili di precompressione. E' quindi necessario eseguire apposita rilevazione

della disposizione dei ferri d'armatura su entrambe le facce dell'elemento indagato mediante pacometro e loro segnatura sull'elemento stesso. Prima del carotaggio, è fondamentale valutare qualsiasi implicazione strutturale derivante dal prelievo di una carota. In particolare per i pilastri, occorre scegliere quale zona oggetto di prove quella soggetta a modeste sollecitazioni tenendo presente che:

- si possono ottenere valori falsati, in quanto gli stati tensionali peggiori si hanno in prossimità della testa e del piede del pilastro, dove il conglomerato può avere una elevata segregazione fra i componenti;
- la diminuzione della sezione resistente derivante dal prelievo può comportare problemi in una zona particolarmente sollecitata ed in presenza di un calcestruzzo di qualità scadente.

Pertanto si sceglierà una zona in una fascia intermedia rispetto all'altezza del pilastro, dove il momento è pressoché nullo.

Per le travi il ragionamento è analogo a quello affrontato per i pilastri. In questo caso non si hanno in genere fenomeni di segregazione dei componenti del conglomerato se non alla base della trave stessa. Si cercherà di scegliere, per comodità operative, travi alte e si eseguirà l'eventuale carotaggio sul fianco della trave, avendo cura, ove possibile, di porsi a circa $1/5$ della luce della trave. Per evitare di tagliare le barre di armatura bisogna eseguire il campionamento in prossimità della parte in cui si hanno le tensioni inferiori, cioè nelle vicinanze dell'asse neutro. E' da notare però che, se è vero che nella zona descritta si hanno momenti bassi, è anche verosimile che in questa zona si possono trovare barre sagomate che assorbono le sollecitazioni di taglio (a volte non facilmente rilevabili mediante l'indagine pacometrica).

Raccomandazioni per l'esecuzione del carotaggio

Occorre eseguire il carotaggio perpendicolarmente alla superficie in modo da non danneggiare le carote e tenere la carotatrice rigidamente posizionata durante l'intera durata del processo.

Immediatamente dopo l'estrazione è necessario richiudere i fori provocati dalle operazioni di carotaggio, impiegando apposite malte o betoncini preferibilmente a ritiro compensato.

Lunghezza delle carote

Nel decidere la lunghezza delle carote da prelevare per le prove di resistenza, occorre considerare:

- il diametro della carota;
- il metodo di rettifica applicabile;

- se il confronto deve essere effettuato con resistenza cubica o resistenza cilindrica.

Marcatura ed identificazione

Immediatamente dopo il carotaggio, è opportuno marcare in modo chiaro ed indelebile ciascuna carota e fotografarla.

Inoltre occorre registrare la posizione e l'orientamento all'interno dell'elemento dal quale è stata prelevata. Se una carota viene successivamente tagliata per creare un certo numero di provini, è necessario marcare ciascun provino indicandone la posizione e l'orientamento all'interno della carota originaria.

Esame

Dopo aver eseguito il carotaggio si procede ad un'accurata ispezione visiva del campione in modo da identificare eventuali anomalie. Successivamente si eseguono le misurazioni del diametro della carota, della lunghezza iniziale e della lunghezza dopo il completamento della preparazione finale.

Preparazione delle carote

La preparazione dell'estremità delle carote per le prove di compressione deve seguire le prescrizioni della UNI EN 12390-3:2009 "Appendice A". Qualora sia necessario ridurre le dimensioni di un provino, esso deve essere molato o segato. Le superfici destinate a sopportare il carico devono essere preparate mediante molatura o coppatura. Le limitazioni per i metodi di rettifica vengono riportati nel seguente schema:

METODO (*)	LIMITAZIONE BASATA SULLA RESISTENZA ATTESA
Molatura	senza limitazioni
Malta di cemento alluminoso	fino a circa 50 MPa
Malta di zolfo	fino a circa 50 MPa
Scatola di sabbia	senza limitazioni
(*) In caso di controversia, la molatura è il metodo di riferimento.	

Tabella 4-1

I rapporti preferenziali lunghezza/diametro sono:

- 2,0 se il risultato di resistenza deve essere paragonato alla resistenza cilindrica;
- 1,0 se il risultato di resistenza deve essere paragonato alla resistenza cubica.

Prova di compressione

Prima di procedere alla prova di compressione occorre registrare le condizioni del provino. La prova deve essere effettuata in accordo con la UNI EN 12390-3:2009 "Prova sul calcestruzzo indurito -

Resistenza alla compressione dei provini" utilizzando una macchina per la prova di compressione conforme alla UNI EN 12390-4:2002 "Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova". Non è possibile sottoporre a verifiche provini con superfici fessurate, incavate o scagliate. Prima di procedere alla prova occorre rimuovere eventuali residui di sabbia o altro materiale dalla superficie del provino e registrare la condizione di umidità della sua superficie (bagnata/asciutta) laterale. La velocità di carico deve essere mantenuta costante per tutta la durata della prova e compresa tra 0,4 MPa/sec e 0,8 MPa/sec. Il carico deve essere applicato al provino senza colpi ed aumentato in modo continuo fino a quando non può più essere sopportato un ulteriore carico. A questo punto si può registrare il carico massimo indicato.

Espressione dei risultati

La resistenza alla compressione di ciascun provino si ottiene dividendo il carico massimo per l'area della sezione trasversale, calcolata dal diametro medio; il valore così ottenuto deve essere arrotondato a 0,1 MPa. Nella figura seguente sono riportati alcuni esempi di rotture soddisfacenti e di rotture non soddisfacenti di provini cilindrici (rif. punto 8 della UNI EN 12390-3:2009).

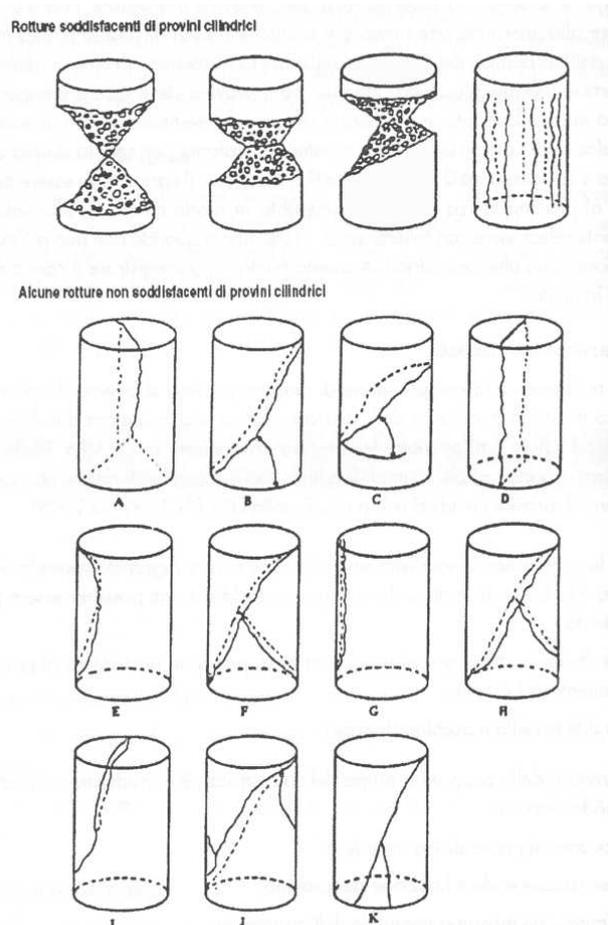


Figura 4-1 - Esempi di rotture di provini cilindrici regolari ed irregolari

Se la rottura non è soddisfacente, ciò deve essere registrato facendo riferimento alla forma di rottura. Le rotture non soddisfacenti possono essere provocate da:

- insufficiente attenzione ai procedimenti di prova, in particolare al posizionamento del provino;
- un difetto della macchina di prova.

La rottura della coppatura prima del calcestruzzo è considerata una rottura non soddisfacente.

- Il resoconto di prova dovrà includere:
 - descrizione e identificazione del provino;
 - dimensione massima nominale dell'aggregato;
 - data del carotaggio;
 - ispezione visiva, annotando qualsiasi anomalia identificata;
 - armatura (se presente): diametro, in millimetri, posizione/i in millimetri;
 - metodo utilizzato per la preparazione del provino (taglio, spianatura o rettifica);
 - lunghezza e diametro della carota;
 - rapporto lunghezza/diametro del provino dopo la sua preparazione;
 - condizione di umidità della superficie al momento della prova;
 - data di esecuzione della prova;
 - resistenza alla compressione della carota, in MPa o N/mm²;
 - qualsiasi deviazione dal metodo normalizzato dell'ispezione visiva o della prova di compressione;
 - dichiarazione della persona responsabile dell'ispezione e della prova attestante che sono state eseguite come da norma.

Interpretazione dei risultati

La resistenza che si determina sperimentalmente non è di tipo "convenzionale" (che, per le nuove costruzioni, viene definita "di progetto"), ma è una resistenza "attuale" che si indica più propriamente come "resistenza su carota" f_{car} . Dalla resistenza su carota (sarebbe più appropriato dire sul "provino" ricavato dalla carota), mediante adeguati coefficienti correttivi che tengono conto della direzione del carotaggio, del rapporto tra l'altezza ed il diametro del provino (snellezza) e del rapporto tra il diametro massimo dell'aggregato ed il diametro del provino, si valuta la "resistenza a compressione in situ" f_{cil} definibile come la resistenza equivalente di un provino cilindrico di dimensioni standard. Da questa, attraverso ulteriori coefficienti correttivi che tengono conto

dell'effetto di disturbo dovuto alla modalità di prelievo e delle condizioni di stagionatura che, in situ, sono differenti da quelle che devono essere garantite in condizioni standard, si può ottenere la resistenza convenzionale equivalente $f_{cil,conv,j}$ a "j" giorni di stagionatura (pari all'età del calcestruzzo al momento dell'estrazione del campione). Infine, se richiesto, il valore della resistenza convenzionale equivalente a "j" giorni di stagionatura può essere trasformato nel valore $f_{cil,conv,28}$ a 28 giorni di stagionatura (stagionatura standard).

I valori delle resistenze "cilindriche" possono essere trasformati in resistenze su provino cubico adottando un opportuno coefficiente di trasformazione (coefficiente di forma). Quindi si può passare dal $f_{cil,conv,j}$ al valore $R_{cub,conv,j}$.

I fattori che influenzano la resistenza su carota possono essere suddivisi in due gruppi; nel primo sono compresi i fattori che sono associati alla caratteristica del calcestruzzo, al secondo appartengono quei fattori che dipendono dalle modalità di prelievo e dalle condizioni di prova del campione. La resistenza in situ sarà influenzata dalla modalità di stagionatura della struttura e dall'età del calcestruzzo al momento del prelievo. Alcuni dei fattori di influenza devono essere presi in considerazione al momento dell'elaborazione dei risultati. Alcuni altri possono essere trascurati mentre altri ancora vengono normalmente ignorati.

Fanno parte del gruppo che dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo i seguenti fattori:

- umidità contenuta all'interno della carota al momento della prova. La resistenza di un campione saturo è dal 10 al 15% inferiore a quella di un analogo campione allo stato secco. Tipicamente si assume nell'intervallo da 8 a 12%;
- presenza di vuoti (porosità). La resistenza diminuisce all'aumentare dell'indice dei vuoti. L'eccesso di vuoti è valutato per pesatura rispetto ad un calcestruzzo di densità normale (che si può assumere uguale a 22,5-23 kN/m³);
- direzione di getto rispetto alla direzione di prelievo. La resistenza di una carota prelevata in direzione verticale (coincidente con la direzione del getto) può essere maggiore della resistenza di un provino estratto in direzione ortogonale. Questo dipende dalla modalità di getto e costipamento del calcestruzzo. La differenza può essere stimata tra lo 0% e l'8%;
- imperfezioni di getto. Nidi di ghiaia, vuoti dovuti a congestione di armatura, effetto di bleeding possono essere intercettati dal carotaggio. In questo caso è molto difficile stabilire che la resistenza determinata su questi campioni sia effettivamente rappresentativa della resistenza strutturale. Per questo motivo i campioni che presentano queste imperfezioni dovrebbero essere scartati.

Fanno parte del gruppo che dipende dalle modalità di prelievo e di prova:

- diametro della carota. Il diametro della carota influenza il valore della resistenza e la sua variabilità. La resistenza di una carota prelevata orizzontalmente di 100 mm di diametro e rapporto di snellezza uguale a 1 corrisponde a quella di un provino cubico standard di 150 mm di lato. Se il diametro è inferiore a 100 mm e il rapporto di snellezza rimane uguale a 1, la variabilità della resistenza è generalmente maggiore;
- rapporto di snellezza (lunghezza su diametro). La resistenza diminuisce per rapporti di snellezza maggiori di 1 ed aumenta per rapporti minori di 1. Questo fenomeno è associato all'influenza dell'attrito che si sviluppa tra la superficie del provino ed i piatti della macchina di compressione ed alla "cerchiatura" o "confinamento" del calcestruzzo che ne consegue;
- planarità delle facce compresse. La resistenza dipende dalla planarità delle facce e dall'ortogonalità tra queste e l'asse del cilindro. Nel primo caso, infatti, si genera una componente di forza trasversale rispetto all'asse del provino; nel secondo caso si crea un'eccentricità del carico di prova e, conseguentemente, uno stato di sollecitazione composta;
- rettifica delle facce. Premesso che la semplice rettifica meccanica non è sufficiente a garantire la tolleranza di planarità (a meno che le superfici non siano tornite), una bassa resistenza del materiale di apporto necessario alla coppatura influenza negativamente la resistenza del provino. Se, al contrario, vengono utilizzate coppature a base di malte cementizie ad alta resistenza o miscele di solfuri di zolfo e sabbia, la resistenza del provino non è sostanzialmente influenzata;
- effetto dell'operazione di carotaggio. Il carotaggio può produrre un danneggiamento in calcestruzzi non sufficientemente maturati o intrinsecamente deboli e, normalmente, l'effetto di disturbo non è visibile. A differenza di un provino cilindrico standard, la carota include frammenti di aggregati tagliati che possono soltanto essere trattieneuti per adesione alla matrice cementizia ma che verosimilmente non contribuiscono alla resistenza del provino;
- presenza di spezzoni di armatura. La presenza di pezzi di barre d'armatura con asse inclinato rispetto all'asse della carota, porta ad una diminuzione della resistenza del materiale perché costituisce una zona di concentrazione di tensioni. Una barra posta in corrispondenza o nelle immediate vicinanze dell'asse della carota, comporta l'esclusione automatica del provino.

L'esigenza di convertire i valori della resistenza in situ di un conglomerato di età uguale a j giorni in valori di resistenza standard che lo stesso conglomerato avrebbe esibito a 28 giorni di maturazione comporta l'adozione di coefficienti correttivi (e spesso riduttivi) della resistenza in situ essendo noto che questa ha una tendenza a crescere in modo significativo seppure asintoticamente.

Si precisa di seguito il significato dei termini utilizzati:

f_{car} = Resistenza cilindrica unitaria determinata dalla rottura della carota avente un rapporto di snellezza $\lambda = H/\Phi$ (con H altezza del provino e Φ diametro medio) qualsiasi;

f_{cil} = Resistenza cilindrica, ovvero di un provino cilindrico di dimensioni definite standard, cioè con rapporto di snellezza $\lambda = H/\Phi$ uguale a 2;

$f_{cil,conv,j}$ = Resistenza cilindrica, a j giorni di età, di un provino maturato in condizioni di stagionatura standard;

$R_{eff/cub}$ = Resistenza effettiva cubica in situ, ovvero la resistenza che manifesterebbe un provino cubico di dimensioni standard dello stesso materiale costituente la carota ed estratto al momento del carotaggio sulla struttura esaminata. Il valore si ottiene moltiplicando f_{cil} per un fattore di correzione che tiene conto delle diverse dimensioni di un provino cubico rispetto ad uno cilindrico (differente rapporto altezza-lato, differente rapporto massa-superfici, differente direzione di prova);

$R_{cub,conv,j}$ = Resistenza convenzionale ottenuta da cubi confezionati al momento del getto in opera e maturati in condizioni di temperatura e umidità standard. Si ottiene moltiplicando $R_{eff/Cub}$ per dei coefficienti correttivi che tengono conto dei fattori perturbativi dovuti alle operazioni di getto, alle differenti condizioni termoigrometriche ed all'età di maturazione;

$f_{cil,conv,28}$ e $R_{cub,conv,28}$ = Resistenza cilindrica e cubica, a 28 giorni di età, di un provino maturato in condizioni di stagionatura standard.

L'interpretazione dei risultati delle prove è effettuata impiegando le espressioni contenute nella normativa tecnica italiana (NTI). La resistenza cubica convenzionale $R_{cub,conv,28}$ è espressa a partire dalla resistenza in situ determinata su carota mediante l'espressione:

$$R_{cub,conv,28} = C_{\lambda} * C_f * C_s * f_{car}$$

nella quale si assumono i seguenti valori dei coefficienti:

- C_{λ} : fattore di snellezza; la UNI EN 12504-1:2002, si limita a dichiarare che si assume $\lambda=2$ se si fa riferimento alla resistenza cilindrica e $\lambda=1$ se si fa riferimento alla resistenza cubica;
- $C_f=1/0.83=1.20$ (come indicato dal D.M. 14/01 /2008, al punto 11.2.10.1): fattore di forma;

- $C_s=1/0.85=1.18$ (come indicato dal D.M. 14/01 /2008, al punto 11.2.6): fattore di conversione tra la resistenza cubica in situ alla resistenza cubica convenzionale.

4.2 Risultati delle prove eseguite sulla struttura "Nervi"

Sulla struttura "Nervi" sono state eseguite n.11 prove di estrazione diretta di carote per la determinazione della resistenza del calcestruzzo. Le carote sono state eseguite sui telai 03 e 09 e sulle solette prossime agli stessi telaio. Le carote da C01 a C05 sono relative al telaio 09, mentre le carote da C06 a C09 sono sul telaio 03. Le carote C10 e C11 sono ricavate dalle solette rispettivamente in prossimità del telaio 09 e 03.

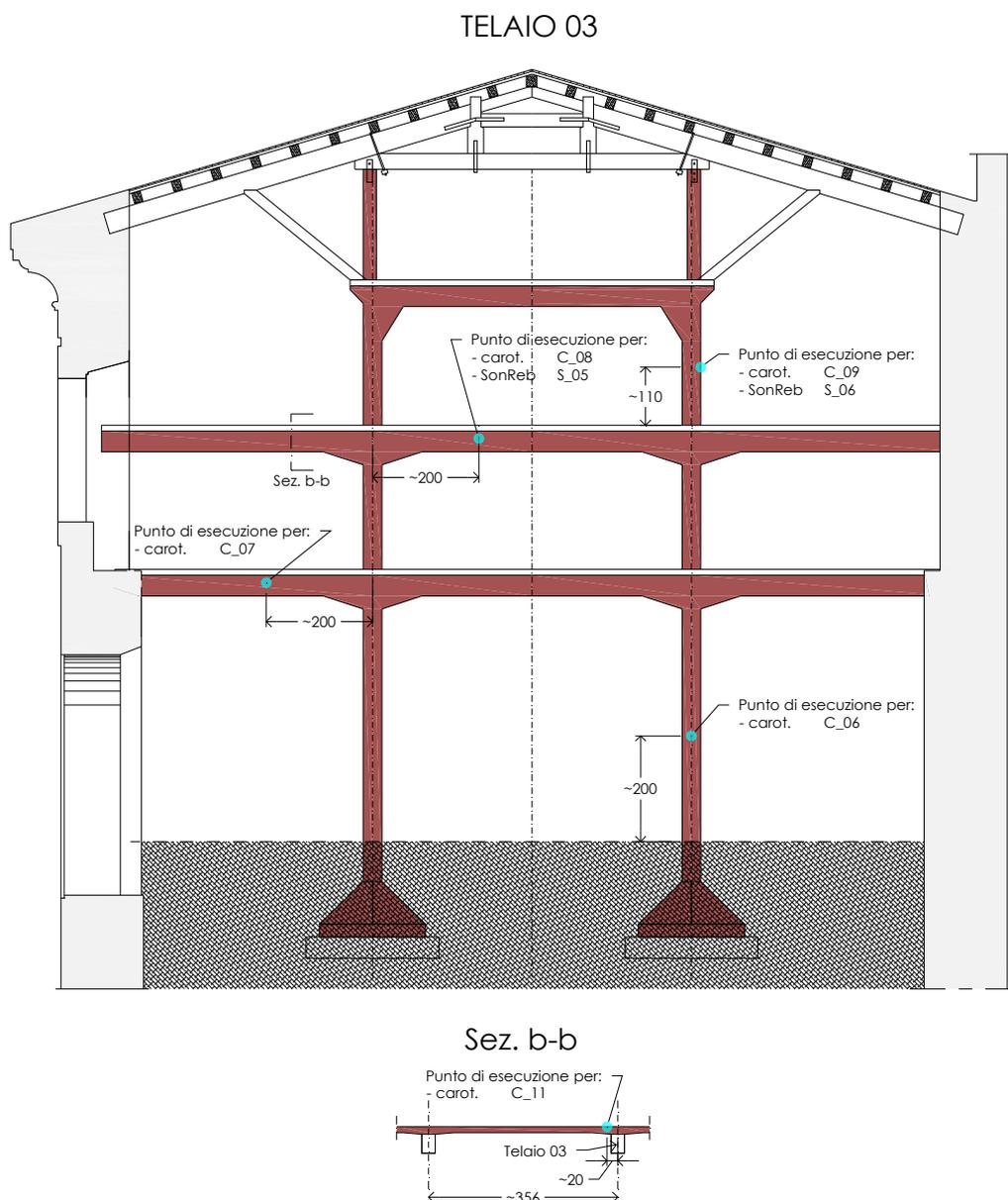


Figura 4-2 – Posizione dei carotaggi sul telaio 03

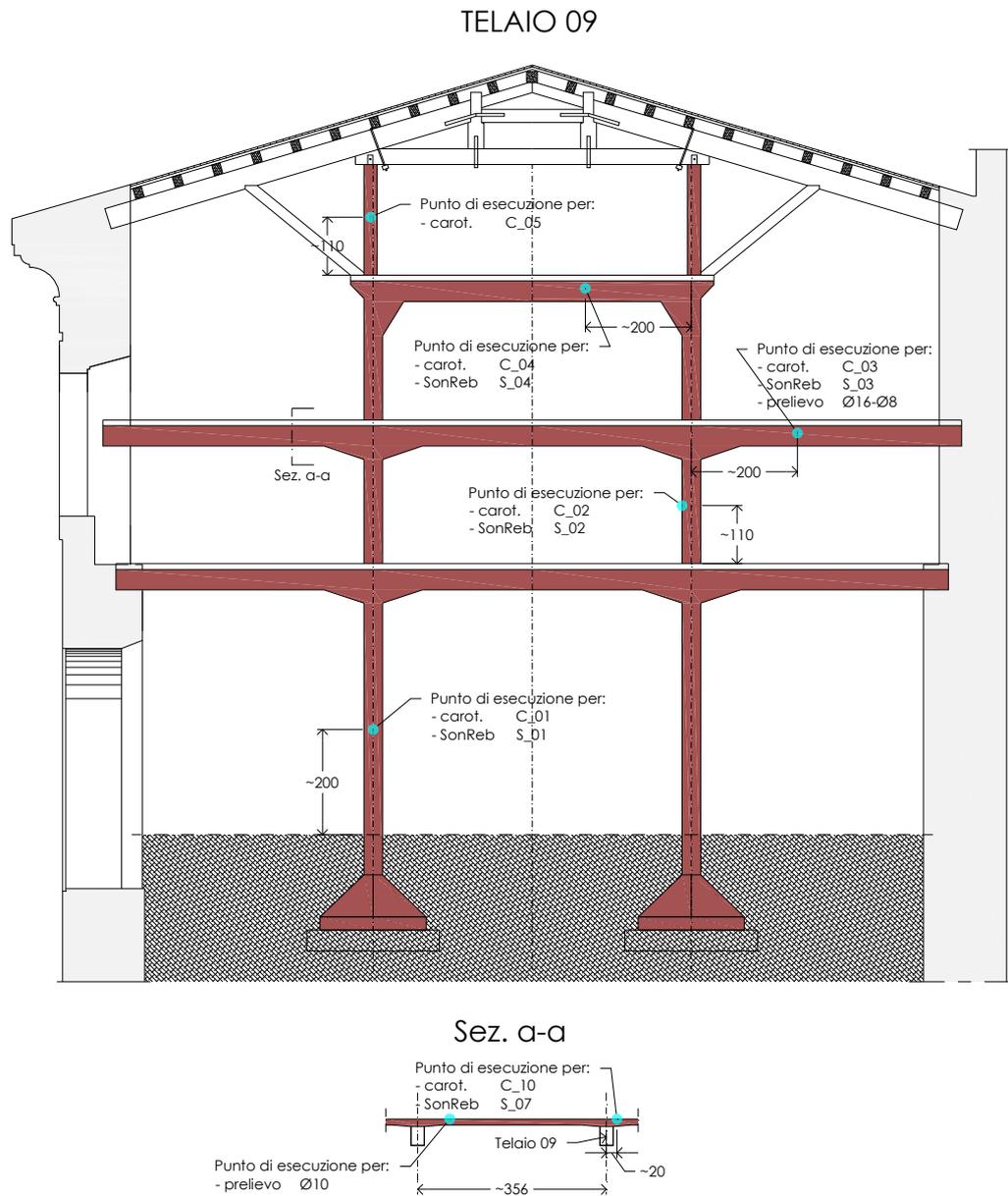


Figura 4-3 – Posizione dei carotaggi sul telaio 09

CAROTA	f_c [N/mm ²]	ϕ	h/ϕ	f_{cil} [N/mm ²]	$f_{cil,conv}$ [N/mm ²]	$R_{cub,conv}$ [N/mm ²]
C_01 (pilastro)	10,10	94	2	10,10	11,88	14,32
C_02 (pilastro)	13,50	94	2	13,50	15,88	19,14
C_03 (trave)	12,50	94	2	12,50	14,71	17,72
C_04 (trave)	9,40	94	2	9,40	11,06	13,32
C_05 (pilastro)	13,00	94	2	13,00	15,29	18,43
C_06 (pilastro)	7,50	94	2	7,50	8,82	10,63
C_07 (trave)	10,20	94	2	10,20	12,00	14,46
C_08 (trave)	10,40	94	2	10,40	12,24	14,74
C_09 (pilastro)	13,40	94	2	13,40	15,76	18,99
				Valori medi	13,07	15,75

Tabella 4-2 - $R_{cub,conv,28}$ determinata sulle carote prelevate da travi e pilastri

CAROTA	f_c [N/mm ²]	ϕ	h/ϕ	f_{cil} [N/mm ²]	$f_{cil,conv}$ [N/mm ²]	$R_{cub,conv}$ [N/mm ²]
C_10 (soletta)	34,20	74	1	27,36	32,19	38,78
C_11 (soletta)	24,20	74	1	19,36	22,78	27,44
				Valori medi	27,48	33,11

Tabella 4-3 - $R_{cub,conv,28}$ determinata sulle carote prelevate dalle solette

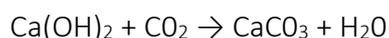
Dall'analisi della resistenza a compressione cilindrica i valori derivanti da carote prelevate da travi e pilastri sono risultati molto differenti dai valori misurati sulle carote prelevate dalle solette di solaio. Pertanto si è stato deciso di separare i risultati dell'interpretazione delle prove.

5 Prove di carbonatazione

In un calcestruzzo integro e ben confezionato le barre di armatura sono protette da un film di ossido che impedisce l'innesco della corrosione. La protezione naturale dell'acciaio deriva dall'ambiente fortemente alcalino ($p_H = 12,5-13,5$) che si instaura nel conglomerato durante la fase di idratazione del cemento.

Tuttavia, se le proprietà passivanti del calcestruzzo vengono meno per una drastica riduzione dell'alcalinità del materiale (il calcestruzzo è diffusamente poroso, subisce una carbonatazione che raggiunge strati molto profondi e vi è una forte aggressione da cloruri dall'ambiente esterno), il film protettivo viene distrutto e in presenza di acqua (che circola nei pori del conglomerato) e di ossigeno inizia il processo corrosivo.

La carbonatazione è un processo di neutralizzazione tra i componenti alcalini presenti negli strati esterni della superficie del calcestruzzo e le sostanze acide provenienti dall'ambiente esterno. Queste sostanze acide sono generalmente l'anidride carbonica (CO_2) contenuta nell'aria ed in particolari atmosfere industriali e l'anidride solforosa (SO_3) contenuta nella pioggia. La carbonatazione comporta l'abbassamento del pH dal valore iniziale di 13-14 a valori di $pH < 9$. La reazione chimica è la seguente:



In tale ambiente acido aumenta la solubilità del carbonato di calcio presente nel calcestruzzo sia sotto forma di inerte sia per trasformazione dell'idrossido di calcio ($Ca(OH)_2$). Si innesca quindi un processo chimico che porta alla formazione del bicarbonato di calcio, solubile in acqua, quindi facilmente asportabile dalla pioggia.

Emerge quindi la necessità di un controllo sia dell'effetto della carbonatazione, sia della penetrazione di ioni cloro all'interno del conglomerato per valutare la capacità residua di passivazione. Per questi tipi di controllo si applicano i cosiddetti "metodi colorimetrici". I metodi colorimetrici si basano sulle proprietà di alcune sostanze chimiche di "virare", cioè di cambiare colore, in presenza di ambienti a bassa alcalinità o in presenza di ioni cloro.

Per il controllo della carbonatazione il metodo colorimetrico si basa sull'uso di una soluzione idroalcolica di fenolftaleina composta da 1 g di fenolftaleina per 100 ml di alcool etilico miscelato ad acqua distillata (rapporto 1 /1). Questa soluzione, originariamente incolore, in presenza di ambiente alcalino assume una colorazione dal rosa al viola all'aumentare del valore di pH (all'aumentare

dell'alcalinità). Al disotto di valori di pH uguali a 8,5 - 9 il viraggio non avviene. Quindi se una superficie "vergine" di conglomerato viene spruzzata con questa soluzione è possibile, con la precisione di 1 -2 mm, delimitare gli strati carbonatati. Indicazioni utili sull'applicazione di questo metodo possono essere trovate nella norma UNI 9944:1992.

Per il controllo dello spessore penetrato da cloruri si utilizzano invece due diverse soluzioni, la prima a base di fluoresceina (0,1 g in 100 cm³ di alcool etilico al 70%) e la seconda contenente nitrato d'argento AgNO₃ in concentrazione acquosa pari a 0,1 mol/l (17 g/l).

Nelle zone penetrate dal cloruro il nitrato d'argento si trasforma in cloruro d'argento e, grazie alla presenza di fluoresceina conferisce al conglomerato una colorazione variabile, a seconda dei casi, dal rosa pallido al marroncino molto chiaro.

Nelle zone di calcestruzzo non penetrate dal cloruro, invece, il nitrato d'argento si ossida ed assume una colorazione variabile dal marrone molto scuro al nero. La formazione dell'ossido di argento ed il conseguente cambio cromatico sono favoriti dalla presenza di luce solare. Recenti studi hanno però evidenziato che, in presenza di carbonatazione e quindi di una riduzione del valore del pH, le due soluzioni non sono sufficienti a definire lo spessore di penetrazione dei cloruri ma è necessario, prima dell'irrorazione di fluoresceina e di nitrato d'argento, di ricostituire le condizioni di alcalinità mediante l'uso di una soluzione acquosa al 6% di idrossido di sodio (NaOH) spruzzata sulla superficie da controllare. La prova è eseguita secondo la norma UNI 9944:2002 – “Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo”.

5.1 Profondità di carbonatazione valutata nelle carote eseguite sulla struttura “Nervi”

La fenolftaleina vira al rosso con materiale il cui pH sia maggiore di circa 9,2 e rimane incolore per valori di pH minori. La profondità di carbonatazione d_k deve essere specificata con precisione di 1 mm. Se il fronte di carbonatazione non corre parallelamente alla superficie la profondità deve essere determinato il valore medio (d_k) ed il valore massimo (d_{kmax}). Nella tabella seguente sono riportate le misurazioni della profondità della carbonatazione.

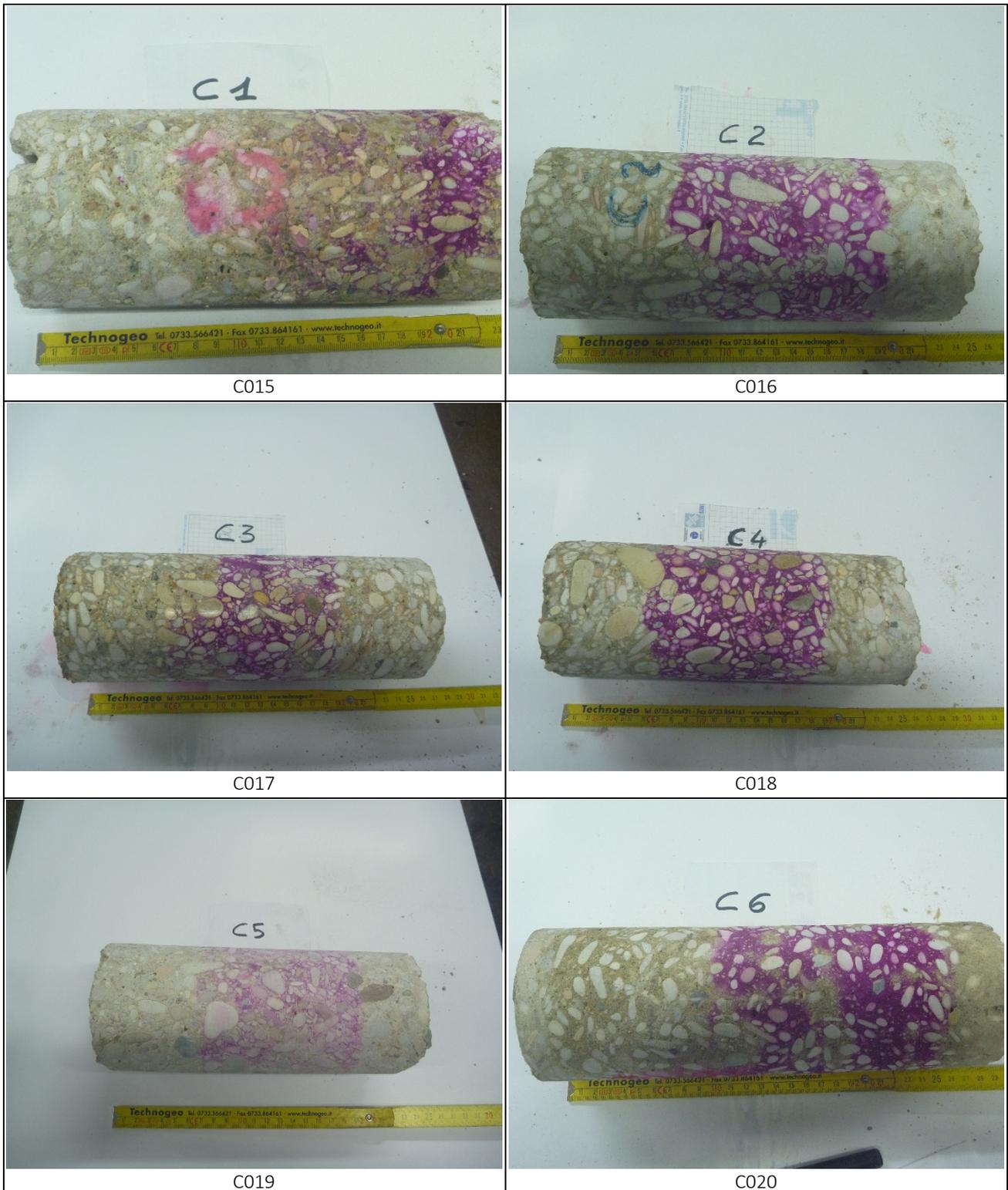
Carota n°	Profondità di carbonatazione $d_k - d_{kmax}$
C01	120 mm
C02	70 – 85 mm
C03	85 – 105 mm
C04	72 mm
C05	65 – 80 mm
C06	90 – 120 mm
C07	90 – 110 mm

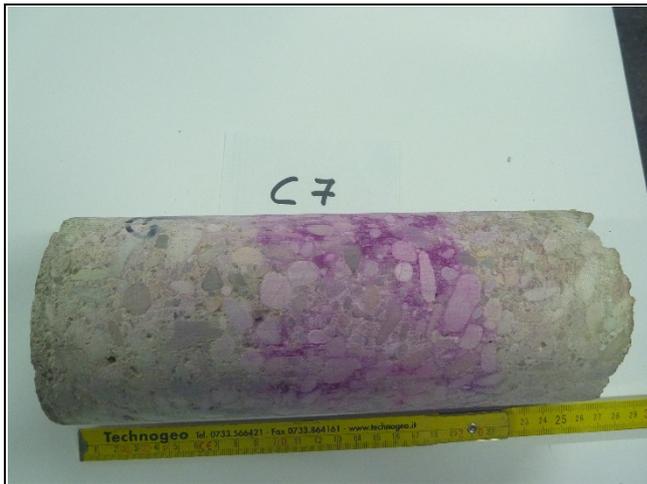
C08	72 – 85 mm
C09	65 – 75 mm
C10	35 – 40 mm
C11	22 – 44 mm

Tabella 5-1 - Risultati della prova alla fenolftaleina

Fotografie

Si allegano le fotografie delle carote sottoposte alla prova.





C07



C08



C09



C10



C11

6 Prove di trazione sugli acciai

Con riferimento alle barre di armatura del telaio in acciaio sono state eseguite n.4 prelievi in opera su barre estratte dagli elementi del telaio (travi con previsione di essere demolite in fase di progetto) e dalla soletta. Le sezioni degli spezzoni prelevati sono pari a $\varnothing 5$, $\varnothing 8$, $\varnothing 10$ e $\varnothing 12$. L'acciaio risulta essere di tipo liscio.

Le prove di trazione sulle barre prelevate sono state eseguite in laboratorio con le modalità di prova indicate nella norma UNI EN ISO 15630-1:2004 "Acciaio per calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso - Metodi di prova - Parte 1: Barre, rotoli e fili per calcestruzzo armato così come prescritto dal DM 14/01/2008".

I risultati delle prove sono sintetizzati nella seguente tabella:

Elemento strutturale di provenienza	Diametro nominale mm	Diametro effettivo mm	Tensione di snervamento MPa	Tensione di rottura MPa	Allungamento %
Soletta II elevazione	5	5.41	379.01	505.35	33.2
Telaio 9 Trave interna II elev.	8	8.61	418.54	537.10	31.0
Soletta II elevazione	10	9.68	332.95	406.16	31.2
Telaio 9 Trave interna II elev.	16	16.28	322.94	454.94	32.8

Tabella 6-1 - Risultati della prova sugli acciai da cemento armato

Si riporta nel seguito una tabella con il riepilogo delle caratteristiche meccaniche degli acciai da cemento armato regolamentati dal RDL 2229/1939 (precedente alla data di realizzazione della struttura) a cui si può far riferimento per la classificazione.

Normativa	R.D.L n°2229/1939			LL.PP. n°1472/1957			
Tipologia	liscio			liscio			a.m.
Denominazione	Dolce	Semi	Duro duro	Aq42	Aq50	Aq60	
Snervamento (kgf/mm ²)	≥ 23	≥ 27	≥ 31	≥ 23	≥ 27	≥ 31	/
Rottura (kgf/mm ²)							
Allungamento (%)	42-50	50-60	60-70	42 - 50	50 - 60	60-70	/

Tabella 6-2 – Caratteristiche meccaniche acciai da carpenteria in base alle norme RDL 2229/1939 e LLPP 1472/1957

7 Metodo SonReb

7.1 Premessa

Una stima delle resistenze locali del calcestruzzo può essere effettuata adottando metodi non invasivi combinati. Le combinazioni che possono essere realizzate fra i singoli metodi non distruttivi sono molte. Il metodo combinato più utilizzato per la stima della resistenza del calcestruzzo in situ è il SonReb che si basa su correlazioni di tipo sperimentale tra la resistenza e la velocità degli ultrasuoni combinata con il valore dell'indice di rimbalzo. Per correlazione sperimentale si intende un legame funzionale o semplicemente grafico che si ottiene come curva di interpolazione attraverso una campagna di prove su un sufficiente numero di campioni di calcestruzzo aventi diverse resistenze, misurando dapprima la velocità di propagazione di impulsi ultrasonici e l'indice di rimbalzo dello sclerometro e, immediatamente dopo, la resistenza mediante una prova di compressione diretta. Per ciascuno dei campioni si ha quindi un valore della resistenza e una coppia di parametri non distruttivi.

7.2 Durezza superficiale (indice di rimbalzo)

Il metodo si basa sulla corrispondenza esistente tra il carico unitario di rottura a compressione e la durezza superficiale del conglomerato misurando sia l'energia elastica rimanente (metodi di rimbalzo) sia l'energia di deformazione (metodi di impronta).

Rientra nella categoria dei metodi di rimbalzo la prova condotta a mezzo di sclerometro. Le prove sclerometriche sono utilizzate per stimare, con le dovute limitazioni del procedimento, la resistenza a compressione del calcestruzzo in strutture già realizzate. Infatti la UNI EN 12504-2:2001 al punto 1 Nota 2, prescrive che il metodo di prova non è inteso come una alternativa per la determinazione della resistenza alla compressione del calcestruzzo ma, con una opportuna correlazione, può fornire una stima della resistenza in situ. L'indice sclerometrico determinato mediante questo metodo può essere utilizzato per la valutazione dell'uniformità del calcestruzzo in situ, per delineare le zone o aree di calcestruzzo di scarsa qualità o deteriorato presenti nelle strutture. Il principio di funzionamento dello strumento è che una massa scagliata da una molla colpisce un pistone a contatto con la superficie ed il risultato della prova viene espresso in termini di distanza di rimbalzo della massa. L'apparecchiatura è costituita da una massa mobile con una certa energia iniziale, che urta la superficie di una massa di calcestruzzo. In seguito all'urto si ha una redistribuzione

dell'energia cinetica iniziale e cioè, una parte è assorbita dal calcestruzzo sotto forma di energia di deformazione plastica ed un'altra parte di energia è restituita alla massa mobile che rimbalza per un tratto proporzionale all'energia rimasta disponibile. Per tale distribuzione dell'energia condizione essenziale è che la massa del calcestruzzo sia praticamente infinita in rapporto con la massa dell'equipaggio mobile, altrimenti una parte dell'energia iniziale, essendo dipendente dalle masse relative dei due corpi che si scontrano, sarebbe trasferita al calcestruzzo sotto forma di energia cinetica. La condizione di massa infinita del calcestruzzo si realizza usando masse d'impatto molto piccole. Per ottenere l'energia necessaria per l'impatto si usa un sistema di molle. La corsa di rimbalzo è determinata dall'energia di rimbalzo in seguito all'urto con il calcestruzzo e dalle caratteristiche del sistema di molle. Tutti i dispositivi di prova che si basano sull'utilizzazione dei risultati dovuti all'energia d'impatto, devono essere provvisti di controllo della taratura in quanto, dopo un uso prolungato, le molle modificano le loro costanti elastiche. Sono commercialmente disponibili diversi tipi e formati di sclerometri per il controllo di varie classi di resistenza e tipi di calcestruzzo.

Ciascun tipo e formato di sclerometro dovrebbe essere utilizzato solo per le classi di resistenza ed il tipo di calcestruzzo per il quale è stato progettato. Lo strumento viene fornito con pietra abrasiva al carburo di silicio con tessitura granulare media o materiale equivalente. L'incudine in acciaio di taratura per la verifica dello sclerometro deve essere caratterizzata da una durezza minima di 52 HRC (durezza Rockwell tipo C), da una massa di 16 ± 1 Kg ed un diametro di circa 150 mm.

La verifica di taratura su un'incudine non garantisce che sclerometri diversi abbiano a produrre gli stessi risultati in altri punti della scala sclerometrica. Per la verifica della taratura dello sclerometro l'incudine in acciaio dovrà essere collocata su un piano rigido. Azionare lo strumento almeno tre volte prima di iniziare ad effettuare le letture all'incudine di taratura, per assicurarsi che la meccanica dello stesso funzioni correttamente. Successivamente si provvederà all'inserimento dello sclerometro nell'anello di guida dell'incudine ed all'esecuzione di una serie di battute ($n > 10$). La UNI 9189:1988 prescriveva che la media degli indici di rimbalzo dello sclerometro (modello N) posto in verticale a contatto con l'incudine di taratura doveva essere 80 ± 2 . Ora, la UNI EN 12504-2:2001 non fornisce alcuna prescrizione al riguardo, demandando al produttore dello strumento l'incombenza di dichiarare, nel manuale d'istruzioni dello stesso, il valore richiesto per la verifica di taratura dello sclerometro di propria produzione.

Gli elementi di calcestruzzo da sottoporre a prova devono essere di almeno 100 mm di spessore e fissati all'interno di una struttura. Possono essere sottoposti a prova campioni più piccoli purché

siano rigidamente supportati. Dovrebbero essere evitate aree che rivelano la presenza di nidi di ghiaia, sfaldature, tessitura grossolana o altre porosità ed in prossimità di grossi inerti. Si deve altresì evitare, eseguendo una preliminare indagine pacometrica, di eseguire le battute sclerometriche nelle aree interessate dal passaggio delle armature ed in vicinanza dei cavi e dei fili di precompressione.

Nel selezionare l'area da sottoporre a prova si devono considerare i seguenti fattori:

- identificazione delle aree interessate al passaggio delle armature;
- tipo di superficie;
- stato di umidità della superficie;
- carbonatazione;
- movimento del calcestruzzo durante la prova;
- valutazione del livello di danneggiamento della superficie sottoposta a prova;
- direzione della prova;
- altri fattori appropriati come, per esempio, il tipo di calcestruzzo e la classe di resistenza dichiarata.

L'area da sottoporre a prova deve essere approssimativamente di 300 mm x 300 mm. Occorre assicurarsi che la distanza tra due punti di impatto sia di non meno di 25 mm e che nessuno sia meno di 25 mm dal bordo. La preparazione della prova viene eseguita utilizzando la pietra abrasiva per rettificare le superfici a tessitura ruvida o tenera o le superfici con resti di malta, fino a renderle lisce. Le superfici levigate o frattazzate possono essere sottoposte a prova senza rettifica ma occorre rimuovere eventuali residui di acqua presenti sulla superficie del calcestruzzo. Lo sclerometro deve essere utilizzato ad una temperatura compresa tra i 10°C e 35°C.

Si consiglia di utilizzare sempre lo sclerometro seguendo le istruzioni d'uso del produttore. La procedura di prova è la seguente:

- azionare lo strumento almeno tre volte prima di iniziare ad effettuare qualsiasi lettura, per assicurarsi che la meccanica dello stesso funzioni correttamente;
- prima di una sequenza di prove su una superficie di calcestruzzo, effettuare la verifica di taratura dello sclerometro utilizzando l'incudine di acciaio di riferimento e controllare che essa sia conforme ai limiti raccomandati dal produttore;
- tenere saldamente lo sclerometro in una posizione che consenta al pistone di avere un impatto perpendicolare alla superficie di prova;
- aumentare gradualmente la pressione sul pistone fino all'impatto del martello;

- dopo l'impatto registrare l'indice sclerometrico;
- utilizzare un minimo di nove misure per ottenere una stima affidabile dell'indice sclerometrico di un'area di prova;
- registrare la posizione e l'orientamento dello sclerometro per ciascuna serie di misurazioni;
- esaminare tutte le impronte lasciate sulla superficie dopo l'impatto e se l'impatto ha frantumato o sforato a causa di un vuoto vicino alla superficie, scartare il risultato;
- dopo le prove, rieseguire la verifica di taratura dello sclerometro utilizzando l'incudine di acciaio di riferimento. Se il risultato è diverso dai limiti raccomandati, annullare le prove e contattare il/i laboratorio/i di assistenza del produttore per far tarare lo strumento.

Il risultato deve essere calcolato come la media di tutte le misure, aggiustata se necessario in base all'orientamento dello sclerometro come da istruzioni del produttore, ed espressa come numero intero. Se oltre il 20% di tutte le misure si discosta dalla media per più di 6 unità, deve essere scartata l'intera serie di misure.

Il resoconto di prova dovrà includere:

- identificazione dell'elemento di calcestruzzo;
- posizione delle aree di prova;
- identificazione dello sclerometro;
- descrizione della preparazione delle aree di prova;
- dettagli sul calcestruzzo e sua condizione;
- data e ora di esecuzione della prova;
- risultato della prova (valore medio) e orientamento dello sclerometro per ciascuna area di prova;
- risultati della prova aggiustati in base all'orientamento dello sclerometro (se necessario);
- eventuali deviazioni dal metodo di prova normalizzato;
- dichiarazione della persona tecnicamente responsabile della prova, che attesti che la prova è stata effettuata in conformità alla UNI EN 12504-2:2001, eccetto per quanto riferito al punto precedente.

7.3 Vibrazioni ad alta frequenza (ultrasuoni)

Il metodo degli ultrasuoni presenta, rispetto allo sclerometro, il vantaggio di indagare in profondità la struttura da esaminare. Le onde di pressione acustica interagiscono fortemente con la materia, soprattutto allo stato solido; pertanto nella loro propagazione sono modificate dallo stato e dalla

natura del mezzo in cui si propagano. Si presenta il problema di come estrarre, leggere e compattare la grande quantità di informazioni che le onde elastiche hanno raccolto durante l'interazione con la materia. Interviene a questo punto la grossa potenzialità dei metodi di trattamento del segnale.

La norma che disciplina la determinazione dei tempi di propagazione di impulsi di vibrazione in campioni o strutture di calcestruzzo fra una o più coppie di punti di rilievo è la UNI EN 12504-4:2009. Scopo dei rilievi è di dedurre essenzialmente la "velocità virtuale o apparente" di propagazione degli impulsi (intesa come rapporto fra la distanza geometrica tra i punti di rilievo e tempo di transito rilevato), e da essa trarre informazioni sul calcestruzzo in termini di caratteristiche ed omogeneità.

Con la metodologia descritta si può indagare:

- sull'omogeneità del calcestruzzo;
- su difetti di getto;
- su variazioni delle proprietà causate dalla storia dell'elemento (manutenzione, sollecitazioni, degrado ecc.);
- sul modulo di elasticità dinamico;
- in combinazione con altre determinazioni, per stimare la resistenza del calcestruzzo in sito.

La metodologia può essere applicata:

- nella ricerca di laboratorio;
- nella prefabbricazione di elementi strutturali di calcestruzzo;
- nelle strutture in corso d'opera;
- nelle strutture già esistenti.

7.3.1 Principi base del metodo

Il metodo in esame, in relazione alle modalità di propagazione di impulsi vibrazionali, si basa sul fatto che:

- la velocità con cui tali impulsi si propagano in un mezzo è funzione delle caratteristiche elastiche del mezzo (modulo di elasticità) e della sua densità;
- le disomogeneità (per esempio fessure, zone degradate, cavità ecc.), variando la velocità di propagazione ed assorbendo parzialmente ed attenuandola secondo determinate direzioni, possono essere indagate analizzando tali processi.

7.3.2 Strumentazione di misura

L'apparecchiatura generalmente è composta da un dispositivo che ha le seguenti caratteristiche:

- emette impulsi di vibrazioni meccaniche (sondo emittente) in sincronismo con un segnale elettrico. Questo pilota l'avvio di una unità di misura di intervalli di tempo e di una unità di visualizzazione della vibrazione in ricezione;
- riceve delle vibrazioni meccaniche e le trasforma in segnali elettrici (sonda ricevente);
- amplifica e regola il trattamento del segnale emesso dalla sonda ricevente;
- attraverso un dispositivo elettronico misura l'intervallo di tempo fra istante di emissione ed istante di ricezione dell'impulso o della parte di esso che si analizza.

L'impulso di vibrazione che perviene alla sonda ricevente, trasformato in un segnale elettrico opportunamente amplificato, viene visualizzato sullo schermo di uno oscilloscopio (generalmente video a cristalli liquidi o monitor di personal computer).

7.3.3 Tecniche di misura

La misura dei tempi di propagazione degli impulsi di vibrazione viene normalmente eseguita secondo tre diverse modalità in relazione alla direzione di propagazione degli impulsi rispetto alle superfici di emissione e di ricezione della struttura. Nella campagna di indagini effettuata è stato utilizzato il metodo di trasmissione diretta (per trasparenza).

7.3.4 Metodo di trasmissione diretta o per trasparenza

I trasduttori (emittitore e ricevitore) vengono applicati su due facce opposte dell'elemento da saggiare. In questo caso (angolo retto tra l'asse della sonda e la superficie del campione) l'energia pulsante trasmessa dai trasduttori è massima.

La precisione nella misurazione del tempo di attraversamento delle onde ultrasoniche dipende da due fattori:

- buon accoppiamento fra la superficie del trasduttore e la faccia del conglomerato;
- buon allineamento tra le sonde.

7.3.4.1 Accoppiamento

Se la superficie dell'elemento da indagare è:

- abbastanza liscia: è sufficiente spolverare il manufatto ed interporre un grasso minerale leggero o medio;
- umida: non vi sono problemi;
- moderatamente scabra: si può usare un grasso più consistente;

- decisamente irregolare: la si può regolarizzare mediante un riempitivo (ad esempio stucco) dando il tempo al materiale di permeare la superficie e di farne presa.

L'elemento strutturale va preventivamente preparato in superficie in modo da garantire l'aderenza tra trasduttore e superficie di calcestruzzo ed eliminare le micro asperità o vuoti che possano falsare la misura. L'accoppiamento acustico deve quindi garantire da una parte la trasparenza acustica e dall'altra la facile rimozione.

7.3.4.2 Allineamento

Occorre assicurarsi del corretto allineamento delle sonde lungo la traiettoria di transito degli ultrasuoni. Un allineamento non ottimale comporta, infatti, difficoltà nella lettura del tempo di transito per l'instabilità dello stesso rilevabile al display dell'apparecchio.

L'indagine richiede la preventiva impostazione di una griglia di misura i cui vertici costituiscono i punti di applicazione delle sonde (stazioni di misura). Le operazioni richiedono normalmente per ogni stazione di misura 3 letture, i cui valori andranno mediati. Nel caso che la lettura dei tempi di transito risulti eccezionalmente alta, con relative velocità basse ($V < 3000$ m/sec) o nel caso delle letture risulti un'eccessiva dispersione dei valori, è richiesta la conferma dei dati con l'effettuazione di nuove letture. Le serie di letture si conducono di norma secondo i metodi di seguito indicati.

7.3.4.3 Calibrazione

La calibrazione del dispositivo di misura del tempo di transito può essere eseguito sia su un tempo nullo sia su un tempo prestabilito. Nel primo caso le superfici attive dei due trasduttori devono essere accostate direttamente, mentre nel secondo devono essere applicate agli estremi di una barra di riferimento, per la quale sia noto il tempo di transito (le cui dimensioni siano compatibili con le frequenze delle sonde). In ogni caso, l'accoppiamento fra i due trasduttori o tra la barra e i trasduttori deve essere effettuato con le stesse modalità adottate per l'accoppiamento fra i trasduttori e la superficie dell'elemento da sottoporre a prova.

L'operazione di calibrazione deve essere ripetuta più volte durante una campagna di prove, e soprattutto qualora vengano sostituiti i trasduttori e/o i cavi di collegamento, o quando si verificano variazioni sensibili delle condizioni ambientali.

7.3.4.4 Preparazione della superficie

La superficie di calcestruzzo dell'elemento di prova, nei punti di applicazione delle sonde, deve essere:

- pulita;
- levigata mediante smerigliatura, qualora risulti eccessivamente rugosa;
- sufficientemente piana, tale da permettere un contatto uniforme con le sonde.

7.3.4.5 Applicazione delle sonde

L'accoppiamento delle sonde alla superficie dell'elemento da sottoporre a prova deve essere particolarmente accurato, al fine di evitare la presenza di aria, la cui impedenza acustica provoca l'attenuazione del segnale. A questo scopo possono essere impiegati diversi materiali tra cui plastilina, sapone liquido, grasso, di vasellina od altri tipi di grasso. Le sonde devono essere premute contro la superficie del calcestruzzo. La pressione da applicare deve essere tale da comprimere detto materiale fino ad ottenere una lettura stabile e ripetibile del tempo di propagazione.

In caso di superficie curva dell'elemento in esame, le dimensioni della superficie utile delle sonde (emittente e ricevente) devono essere tali che la distanza fra superficie di prova e superficie delle sonde sia < 1 mm.

7.3.4.6 Misura della lunghezza del percorso di propagazione

La misura L del percorso degli impulsi è la distanza tra i centri delle superfici di contatto dei trasduttori. Qualora la misura diretta non sia praticamente possibile, si devono effettuare stime indirette facendone menzione nel verbale di prova.

Misure del tempo di propagazione

Misure effettuate con strumentazione a soglia fissa, a cui il più delle volte il segnale dalla sonda ricevente perviene ad amplificazione costante, richiedono verifiche sullo schermo di un oscilloscopio. A tale scopo su questo vengono visualizzati l'onda di vibrazione ricevuta, e, se possibile, gli istanti di partenza e di arresto della strumentazione di misura dell'intervallo di tempo. In caso di incongruenza fra lettura sul display digitale e lettura sull'oscilloscopio si deve procedere alle opportune verifiche e correzioni. In ogni caso, il valore del tempo di propagazione, da

esprimersi in microsecondi, deve essere determinato con approssimazione all'intero per tempi non minori di 100 μ s, ed alla prima cifra decimale per tempi minori di 100 μ s.

7.4 Metodo SonReb (descrizione)

La correlazione tra i due parametri non distruttivi e la resistenza (cubica) stimata R_s del calcestruzzo in situ, viene svolta adottando la forma analitica di tipo esponenziale che meglio sembra descrivere il legame, di seguito riportata:

$$R_s = a * N^b * V^c$$

dove "N" rappresenta l'indice di rimbalzo derivante da prova sclerometrica, "V" la velocità media di propagazione degli ultrasuoni e le costanti a, b e c dipendono da diversi fattori come ad esempio la qualità degli ingredienti che costituiscono il calcestruzzo, il dosaggio degli ingredienti, le modalità di maturazione, le condizioni di stagionatura.

7.4.1 Funzioni di correlazione disponibile dalla letteratura tecnica

Nella letteratura tecnica sono presenti diverse funzioni di correlazione, ma quelle maggiormente utilizzate hanno le seguenti espressioni:

- $R_s = 7.546 * 10^{-11} * N^{1.4} * V^{2.6}$ (Giacchetti - Lacquaniti);
- $R_s = 8.06 * 10^{-8} * N^{1.246} * V^{1.85}$ (Gasparik);
- $R_s = 1.20 * 10^{-9} * N^{1.058} * V^{2.446}$ (De Leo - Pascale);
- $R_s = 0.00004 * N^{1.88148} * V^{0.8084}$ (Bufarini - D'Aria - Menditto);

in cui " R_s " è la resistenza cubica stimata espressa in MPa, "V" è la velocità di propagazione espressa in m/sec e "N" è l'indice di rimbalzo dello sclerometro. La validità dell'equazione di stima si basa sull'ipotesi di integrità del calcestruzzo.

Poiché le diverse correlazioni derivano da prove su calcestruzzi diversi, a parità di valori di V e di N restituiscono valori stimati della resistenza diversi tra loro e, soprattutto, potenzialmente diversi da quelli che caratterizzano il calcestruzzo in situ.

Si pone dunque il problema di uniformare le diverse curve di correlazione, in altri termini, di eseguire una stima più vicina al caso.

7.4.1.1 Metodo del coefficiente di influenza globale

La correzione viene fatta applicando il metodo del coefficiente di influenza globale. Questo metodo consiste nel determinare il rapporto tra il valore "vero" della resistenza, determinata con la prova di compressione su carota, ed il valore "stimato" attraverso la funzione di correlazione introducendo

nel legame funzionale la misura dei parametri non distruttivi eseguita in corrispondenza della zona in cui la carota è stata prelevata. Avendo a disposizione diverse carote, il coefficiente di influenza globale (Φ_g) può essere assunto come media dei valori che si ricavano dai singoli campioni.

Le quattro funzioni di correlazione danno origine a quattro diversi coefficienti di influenza globale medi. Per la stima corretta si assumerà il coefficiente che, tra i quattro, darà il valore medio delle resistenze stimate più prossimo al valore medio delle resistenze "vere". I rapporti tra i valori delle resistenze "vere" e quelli stimati sono però caratterizzati da una certa dispersione e, di conseguenza, i valori medi dei coefficienti di influenza spesso restituiscono valori medi delle resistenze stimate abbastanza discosti dai valori medi "veri". Per questo motivo i valori medi dei coefficienti di influenza globali vengono moltiplicati per i fattori di peso (P) che sono calcolati sulla base dell'imposizione che i valori medi stimati e veri coincidano.

Quindi, si possono scrivere le funzioni correlative valide per le stime corrette nella forma:

- $R_s = P(1)\Phi(1) * 7.546 * 10^{-11} * N^{1.4} * V^{2.6}$ (Giacchetti - Lacquaniti);
- $R_s = P(2)\Phi(2) * 8.06 * 10^{-8} * N^{1.246} * V^{1.85}$ (Gasparik);
- $R_s = P(3)\Phi(3) * 1.20 * 10^{-9} * N^{1.058} * V^{2.446}$ (De Leo - Pascale);
- $R_s = P(4)\Phi(4) * 0.00004 * N^{1.88148} * V^{0.8084}$ (Bufarini - D'Aria - Menditto);

nelle quali " Φ "(1 ...4) sono i coefficienti d'influenza globale e " P "(1 ...4) sono i fattori di peso. Moltiplicando i fattori di peso per i coefficienti d'influenza globali medi si ottengono i fattori di media ponderata.

7.4.2 Funzione di correlazione specifica del sito

In alternativa all'impiego delle funzioni di correlazione presenti in letteratura si può adottare una procedura mediante la quale è possibile ricavare una funzione di correlazione specifica per il sito, sempre del tipo:

$$R_s = a * N^b * V^c$$

in cui le costanti a, b e c sono calcolate imponendo che sia minima la somma dei quadrati delle differenze tra i valori "veri" ed i valori stimati. In sostanza, la funzione di correlazione è la migliore "interpolante" della distribuzione dei valori "veri".

$$\min \sum_{i=1}^n (R_{vera} - R_{curva,stimata})^2$$

con "n" numero delle carote combinate con la prova SonReb.

Per minimizzare tale somma agendo sulle variabili a,b,c, che incidono sulla R stimata, è agevole l'utilizzo della funzione "risolutore" implementata in un foglio di calcolo.

Una volta che sia stato scelto la metodologia di approccio al problema della stima con il metodo SonReb, avendo tarato il metodo attraverso i valori "veri" delle resistenze in situ, il metodo stesso può essere applicato a tutti i risultati della campagna di controlli non distruttivi combinati permettendo quindi di estendere la numerosità dei dati disponibili e valutare il valore medio con maggiore attendibilità.

7.4.3 Campo di utilizzo del metodo

La stima con il metodo SonReb della probabile resistenza a compressione del calcestruzzo in situ, è applicabile per valori di attraversamento degli impulsi ultrasonori superiori a $3100 \div 3200$ m/sec, mentre per valori inferiori risulta sempre meno attendibile poiché esterna al dominio delle curve sperimentali sulla cui base si applicano le formule stesse. Nel caso di valori molto bassi della velocità (< 3000 m/sec), pur non essendo possibile stimare con adeguato livello di affidabilità la resistenza a compressione del calcestruzzo, si ottiene quasi sicuramente un valore della resistenza del conglomerato inferiore a 15 N/mm². Per valori particolarmente bassi di velocità ultrasoniche rilevate ($1000 \div 2000$ m/sec) il dato ottenuto perde praticamente di significato.

Per quanto riguarda i valori forniti dallo sclerometro, si ottengono limiti accettabili di resistenza a compressione per valori dell'indice di rimbalzo medio maggiori di 30 (per $\alpha=0^\circ$). Le formule presentate richiedono, per una più affidabile stima della resistenza a compressione in situ, apposita taratura da eseguirsi ricorrendo all'estrazione di un numero significativo di carote di calcestruzzo da alcuni degli elementi strutturali precedentemente saggiati mediante indagine ultrasonora e sclerometrica e successivamente sottoposti a prova di compressione.

È importante che la misurazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni venga effettuata esattamente nella stessa area indagata con le battute sclerometriche e nella stessa area dove, successivamente, sarà prelevato il campione di taratura tramite carotaggio.

7.5 Risultati indagine SonReb condotta sui telaio in cls

7.5.1 Descrizione generale

La struttura in c.a. del telaio "Nervi" è stata indagata mediante l'esecuzione di n.33 punti di misurazione non distruttivi SonReb (pari a 3 volte il numero di prove di determinazione diretta della resistenza: carotaggi), le cui posizioni sono riportate nelle seguenti figure.

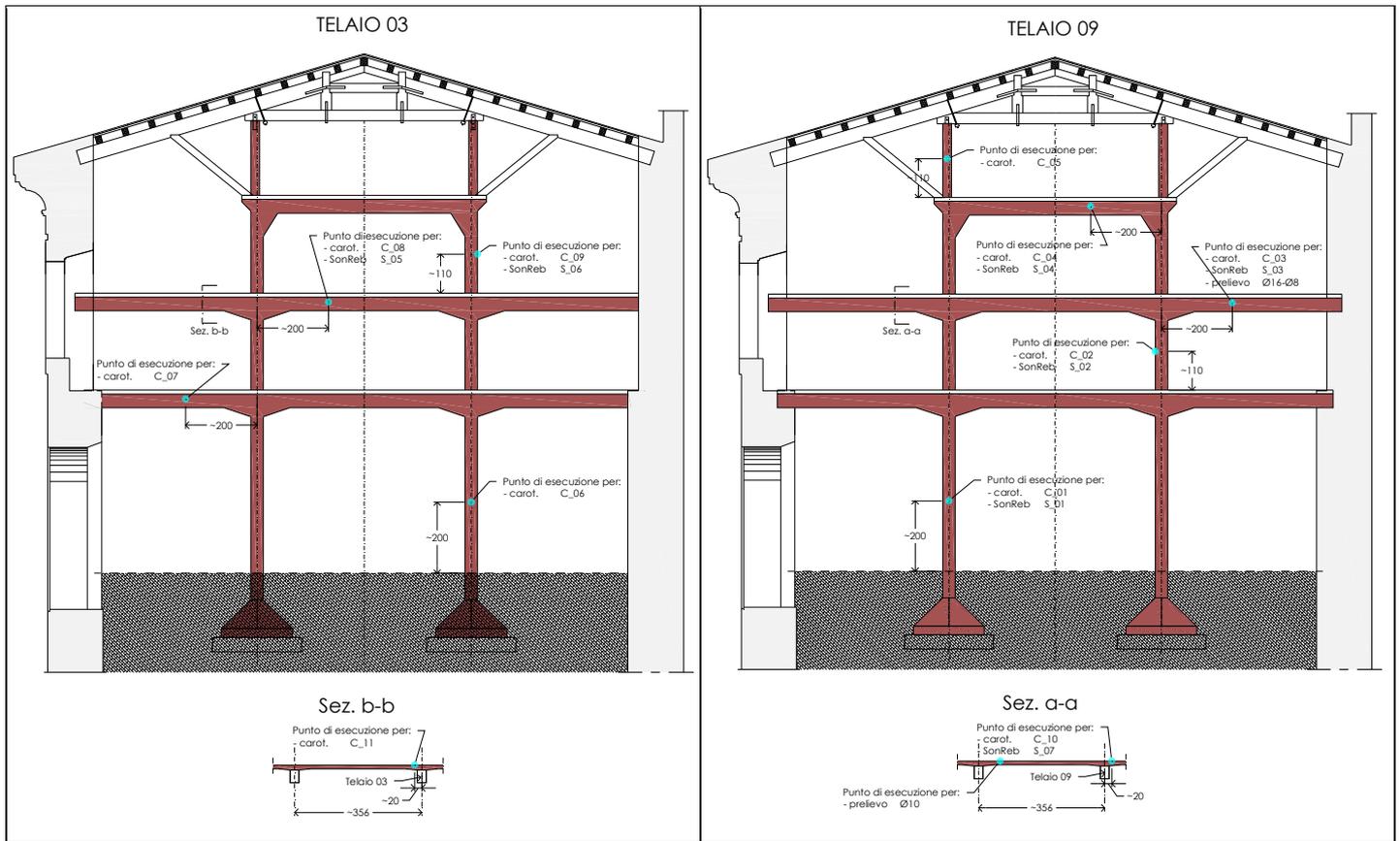


Figura 7-1 – Posizione delle prove SonReb sui telai 03 e 09

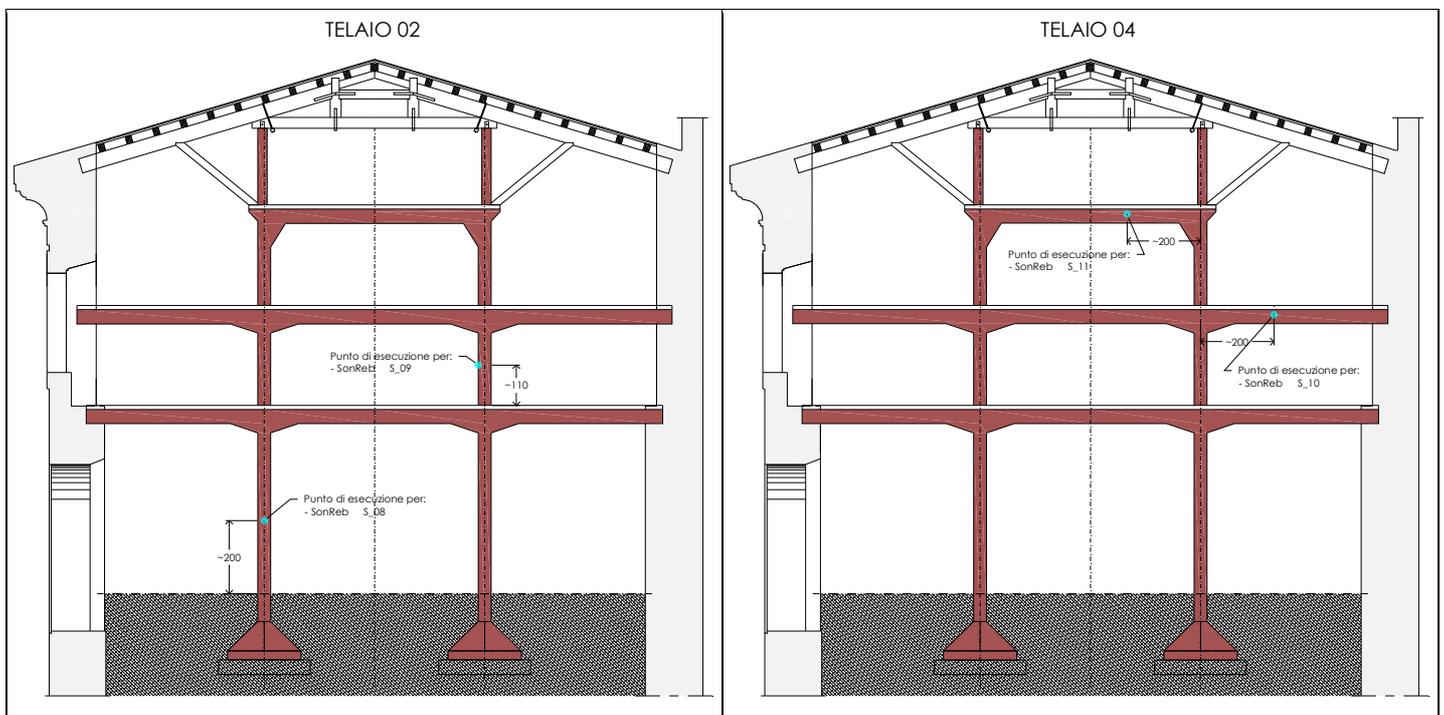


Figura 7-2 – Posizione delle prove SonReb sui telai 02 e 04

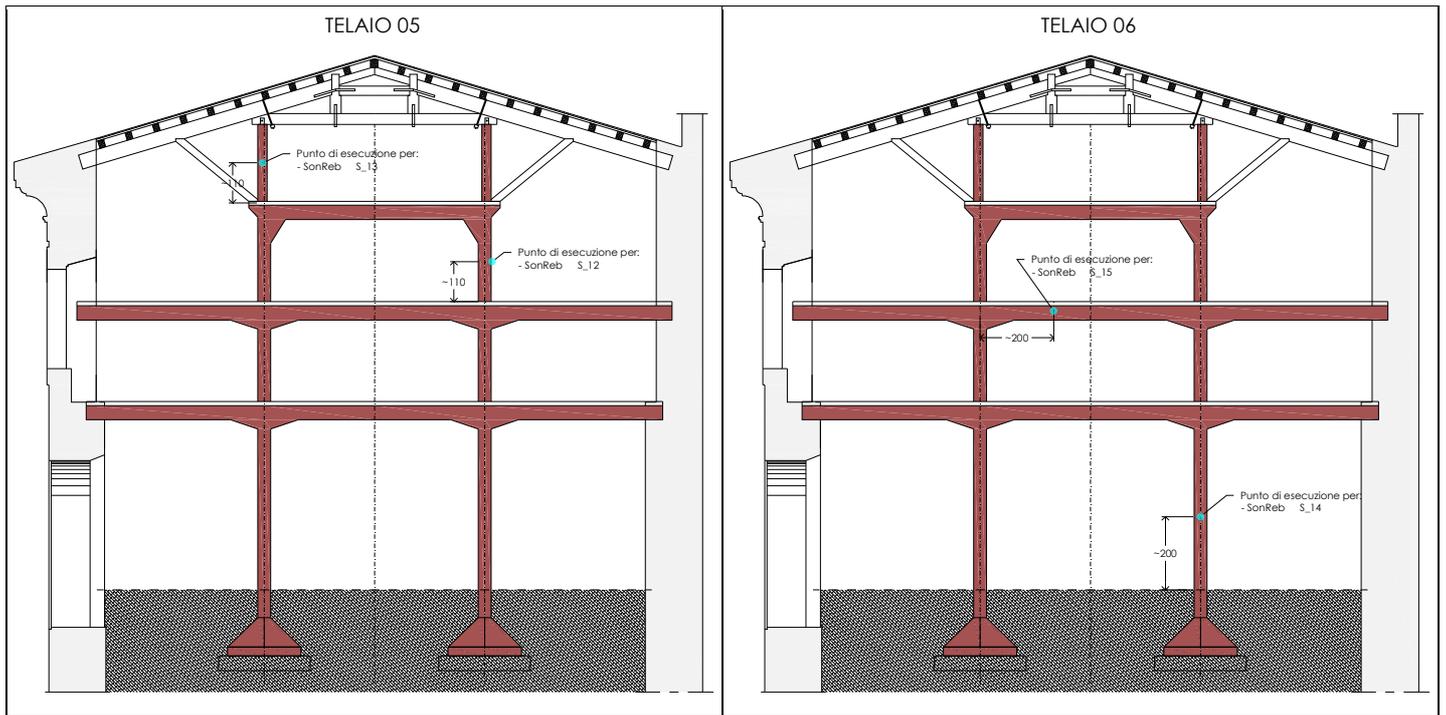


Figura 7-3 – Posizione delle prove SonReb sui telai 05 e 06

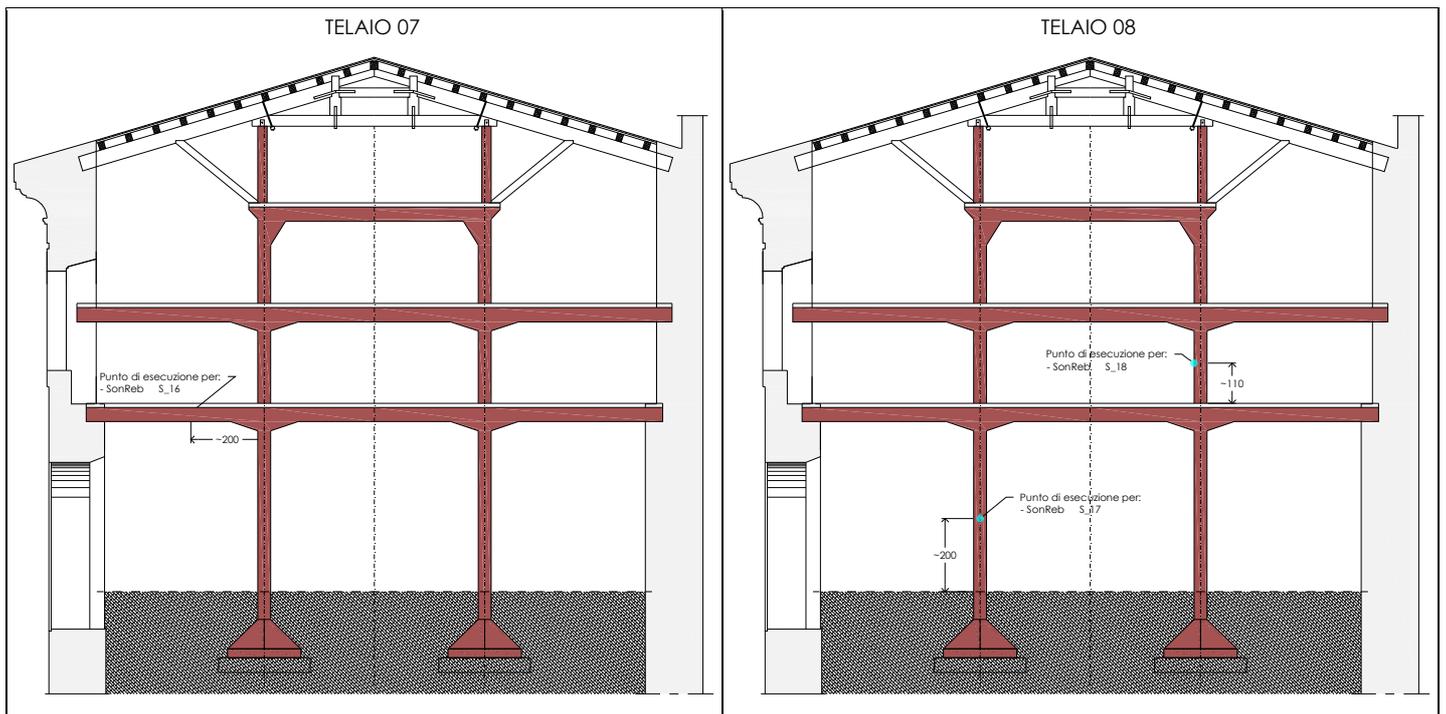


Figura 7-4 – Posizione delle prove SonReb sui telai 07 e 08

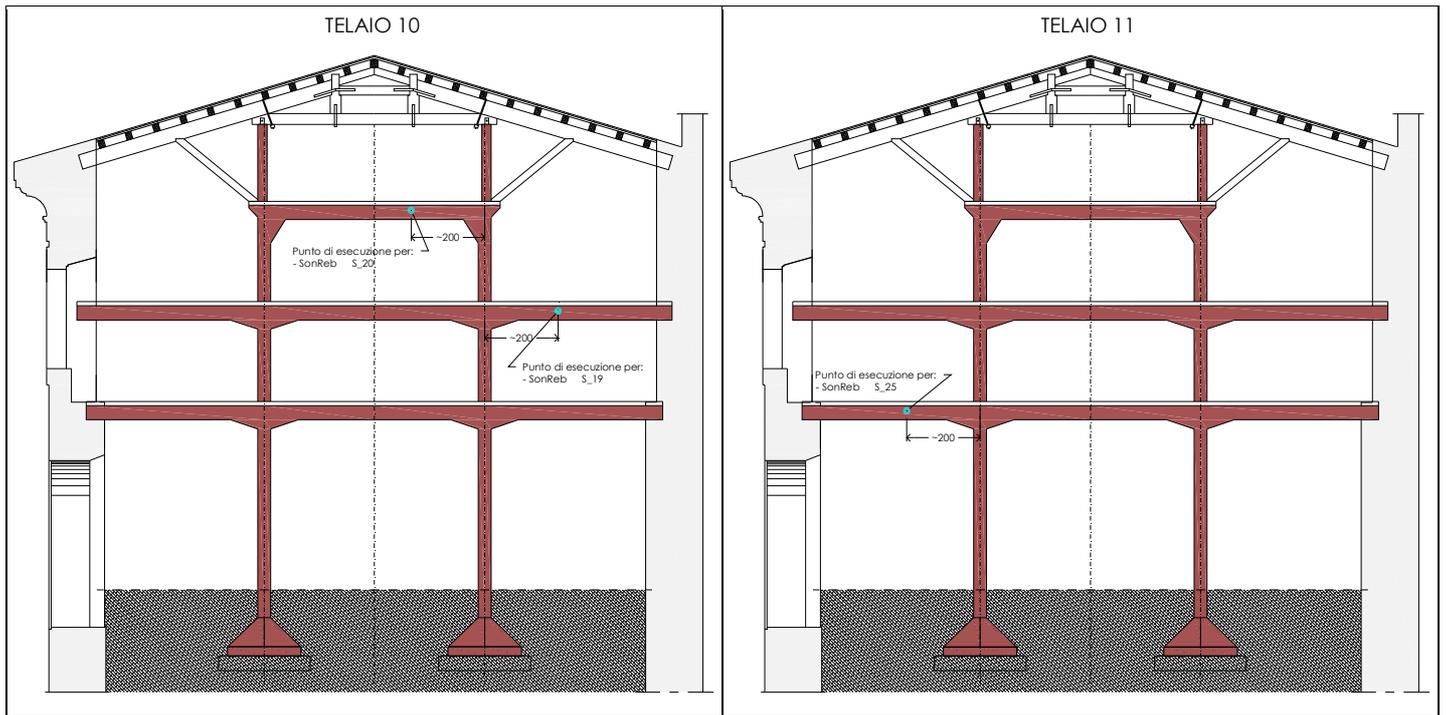


Figura 7-5 – Posizione delle prove SonReb sui telai 10 e 11

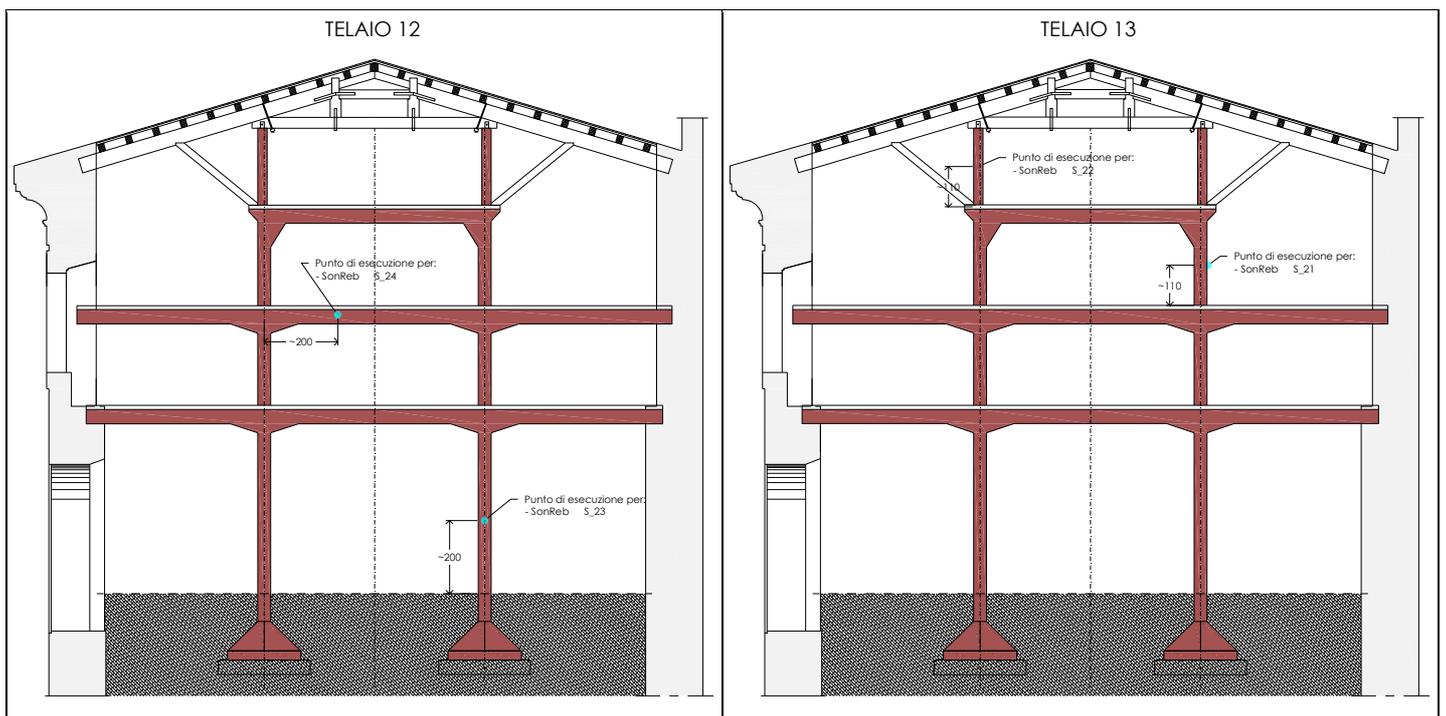


Figura 7-6 – Posizione delle prove SonReb sui telai 12 e 13

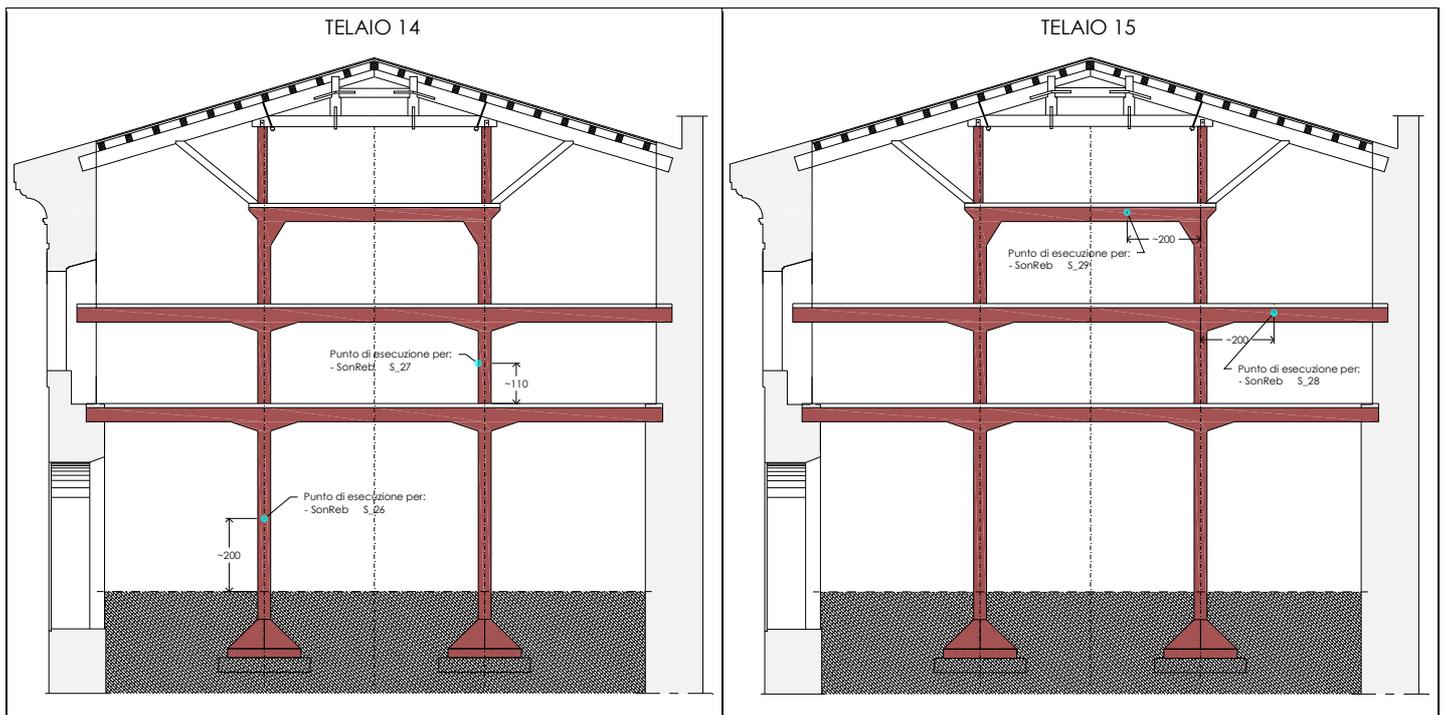


Figura 7-7 – Posizione delle prove SonReb sui telai 14 e 15

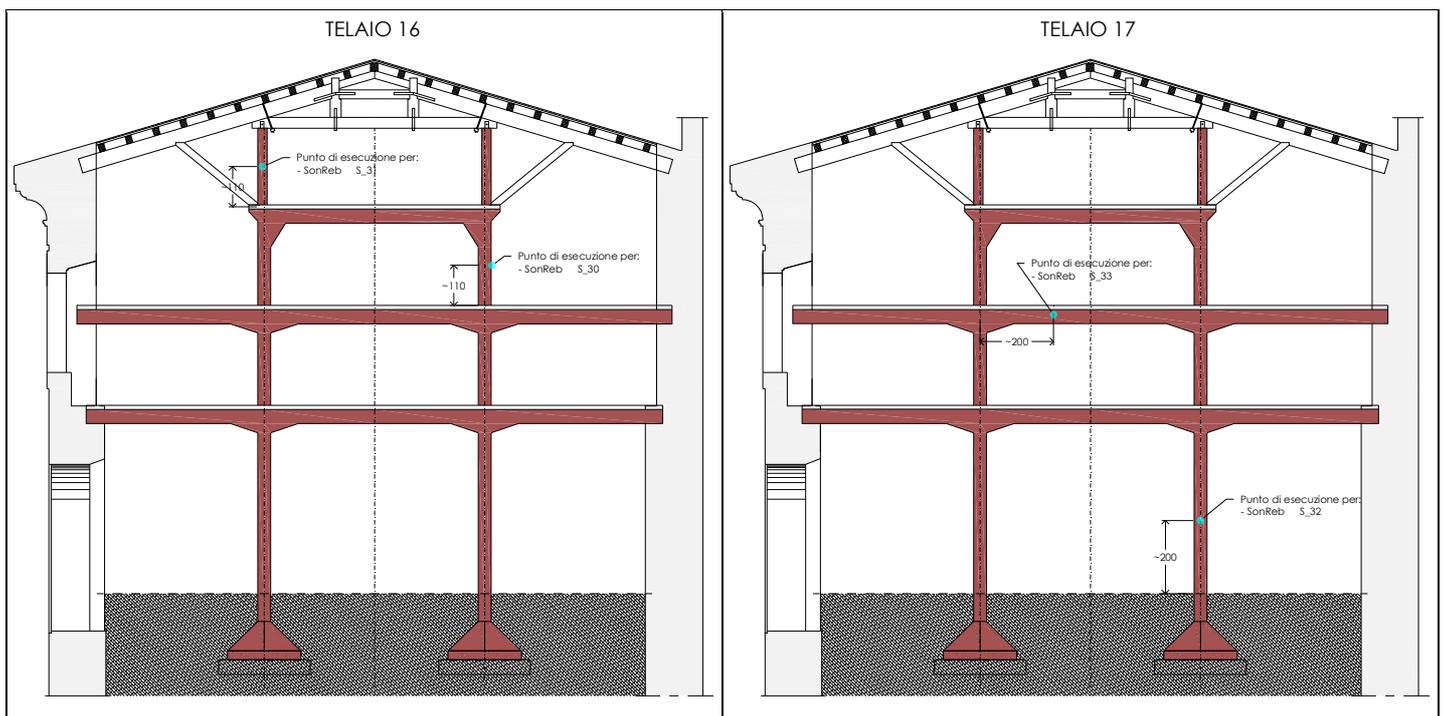


Figura 7-8 – Posizione delle prove SonReb sui telai 16 e 17

L'operazione di taratura delle curve è stata effettuata tramite 6 campioni prelevati, tramite carotaggio, da travi e pilastri. Successivamente sono state calcolate le resistenze a compressione del calcestruzzo, su tutte le 33 aree dove sono state eseguite le prove per il metodo SonReb, utilizzando sia il metodo dei coefficienti di influenza globale, per tutte le 4 curve precedentemente

descritte, sia trovando la legge relativa al sito in esame rendendo minima la somma dei quadrati delle differenze tra i valori "veri" ed i valori stimati.

7.5.2 Risultati ottenuti dei valori di IR e velocità ultrasonica

Si riportano di seguito il valore medio della velocità ultrasonica per ogni prova ultrasonica e l'indice di rimbalzo per ogni prova sclerometrica.

SonReb	Elemento	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	vm [m/s]	Indice di rimbalzo
S01	Pilastro	3448	3518	3486	3484	34
S02	Pilastro	3700	3759	3753	3737	36
S03	Trave	3840	3782	3931	3851	40
S04	Trave	3720	3771	3671	3721	41
S05	Trave	3771	3613	3571	3652	37
S06	Pilastro	3650	3592	3671	3638	40
S08	Pilastro	3646	3751	3593	3663	39
S09	Pilastro	4125	4013	4125	4088	37
S10	Trave	4167	3782	3731	3893	33
S11	Trave	4621	4562	4554	4579	38
S12	Pilastro	4237	4425	4325	4329	38
S13	Pilastro	3782	3882	3715	3793	33
S14	Pilastro	3009	3142	3262	3138	31
S15	Trave	4318	4000	3731	4016	36
S16	Trave	3943	3846	3823	3871	36
S17	Pilastro	3623	3476	3619	3573	31
S18	Pilastro	3788	3650	3794	3744	38
S19	Trave	4378	4230	4112	4240	38
S20	Trave	4808	4817	4562	4729	39
S21	Pilastro	4456	4488	4596	4513	37
S22	Pilastro	4621	4854	4931	4802	40
S23	Pilastro	3408	3462	3521	3464	34
S24	Trave	4409	4167	4401	4326	39
S25	Trave	4281	4132	4160	4191	39
S26	Pilastro	3289	3142	3229	3220	29
S27	Pilastro	3776	3628	3765	3723	36
S28	Trave	4348	4440	4318	4369	38
S29	Trave	4488	4355	4664	4502	37
S30	Trave	4456	4425	4325	4402	36
S31	Pilastro	3828	3782	3737	3782	36
S32	Pilastro	3804	3893	3838	3845	35
S33	Trave	3900	3852	3876	3876	40

Tabella 7-1 Dati provenienti da prova sclerometrica (Indice di rimbalzo) e ultrasonica (vm).

Si riportano di seguito i valori della resistenza cubica a compressione ricavati dalla prova a compressione delle carote estratte aventi diametro 94 mm e altezza pari a 2 volte il diametro.

Carota	Rc [N/mm ²]
	[N/mm ²]
C_01	14,32
C_02	19,14
C_03	17,72
C_04	13,32
C_08	14,74
C_09	18,99
Valore medio	16,37

Tabella 7-2 Resistenze a compressione cubica del calcestruzzo delle carote considerate per l'operazione di taratura

7.5.3 Metodo dei coefficienti di influenza globale

Si riportano di seguito la tabella con:

- i valori della resistenza ottenuti dall'applicazione delle curve di correlazione suggerite in letteratura: Giacchetti - Lacquaniti (G.-L.) curva (1), Gasparik (G.) curva (2), De Leo – Pascale (D.-P.) curva (3), Bufarini – D'Aria – Menditto (B.-D.-M) curva (4).
- coefficienti di influenza Φ
- coefficienti di influenza globale Φ_g
- coefficienti di peso P

SonReb	Elemento	curve				coefficiente di influenza Φ			
		G.- L. (1)	G. (2)	D.- P. (3)	B.- D.- M. (4)	G.- L. (1)	G. (2)	D.- P. (3)	B.- D.- M. (4)
S01	Pilastro	17,029	23,302	23,089	22,229	0,841	0,614	0,620	0,644
S02	Pilastro	22,141	28,492	29,123	26,198	0,864	0,672	0,657	0,730
S03	Trave	27,739	34,341	35,033	32,725	0,639	0,516	0,506	0,541
S04	Trave	26,256	33,229	33,056	33,340	0,507	0,401	0,403	0,400
S05	Trave	21,661	28,244	28,326	27,072	0,681	0,522	0,520	0,545
S06	Pilastro	23,919	30,905	30,474	31,252	0,794	0,615	0,623	0,608
		coefficiente di influenza globale Φ_g							
		G.- L. (1)	G. (2)	D.- P. (3)	B.- D.- M. (4)	G.- L. (1)	G. (2)	D.- P. (3)	B.- D.- M. (4)
		0,721	0,557	0,555	0,578				
		coefficiente di peso P							
		G.- L. (1)	G. (2)	D.- P. (3)	B.- D.- M. (4)	G.- L. (1)	G. (2)	D.- P. (3)	B.- D.- M. (4)
		0,982	0,989	0,988	0,983				

Tabella 7-3 Resistenze stimate dalle correlazioni da letteratura; coefficienti di Influenza e coefficienti di peso

Di seguito si riportano i risultati delle resistenze stimate per ogni indagine SonReb, corrette con l'impiego dei fattori di media ponderata.

SonReb	Elemento	Rc			
		G.- L. (1)	G. (2)	D.- P. (3)	B.- D.- M. (4)
S01	Pilastro	12,06	12,82	12,66	12,63
S02	Pilastro	15,68	15,68	15,97	14,89
S03	Trave	19,64	18,90	19,21	18,60
S04	Trave	18,59	18,28	18,13	18,95
S05	Trave	15,34	15,54	15,54	15,39
S06	Pilastro	16,93	17,01	16,71	17,76
S08	Pilastro	16,65	16,69	16,55	17,03
S09	Pilastro	20,56	19,15	20,47	16,86
S10	Trave	15,43	15,17	16,10	13,07
S11	Trave	28,67	24,42	27,80	19,43
S12	Pilastro	24,78	22,01	24,23	18,57
S13	Pilastro	14,42	14,46	15,10	12,79
S14	Pilastro	8,07	9,42	8,89	9,76
S15	Trave	18,90	17,91	19,05	15,78
S16	Trave	17,17	16,73	17,40	15,32
S17	Pilastro	11,31	11,97	12,21	10,84
S18	Pilastro	16,99	16,83	16,99	16,51
S19	Trave	23,47	21,18	23,03	18,26
S20	Trave	32,33	26,77	30,91	20,94
S21	Pilastro	26,60	23,00	26,08	18,26
S22	Pilastro	34,86	28,42	32,97	22,23
S23	Pilastro	11,87	12,68	12,48	12,58
S24	Trave	25,64	22,70	24,86	19,48
S25	Trave	23,62	21,41	23,01	18,99
S26	Pilastro	7,86	9,09	8,83	8,79
S27	Pilastro	15,52	15,57	15,82	14,84
S28	Trave	25,37	22,39	24,78	18,70
S29	Trave	26,43	22,90	25,93	18,23
S30	Trave	23,99	21,22	23,84	17,00
S31	Pilastro	16,17	16,03	16,45	15,04
S32	Pilastro	16,22	15,95	16,62	14,45
S33	Trave	19,97	19,12	19,52	18,70
Valore medio		19,41	18,17	19,32	16,27

Tabella 7-4 resistenze stimate tramite le curve in letteratura

7.5.4 Risultati da correlazione specifica del sito

Dopo aver ricavato i valori dei parametri a,b,c in modo da minimizzare la somma dei quadrati delle differenze tra resistenze "vere" e "stimate" si è applicato tale taratura a tutti i risultati delle indagini effettuate.

Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo della correlazione adattata al sito.

Elemento	SonReb	Costanti			Resistenza linearizzata	Differenza al quadrato	Resistenza linearizzata	Resistenza
		a	b	c				
Pilastro	S01	-17,18	2,70	-0,60	2,70	0,00	2,70	14,95
Pilastro	S02				2,86	0,01	2,86	17,45
Trave	S03				2,88	0,00	2,88	17,75
Trave	S04				2,77	0,03	2,77	15,94
Trave	S05				2,78	0,01	2,78	16,12
Pilastro	S06				2,72	0,05	2,72	15,22
			Somma dei quadrati delle differenze delle resistenze			0,10		
Pilastro	S08						2,76	15,75
Pilastro	S09						3,08	21,86
Trave	S10						3,02	20,54
Trave	S11						3,38	29,23
Pilastro	S12						3,22	25,11
Pilastro	S13						2,95	19,14
Pilastro	S14						2,48	11,91
Trave	S15						3,05	21,19
Trave	S16						2,95	19,18
Pilastro	S17						2,83	16,91
Pilastro	S18						2,83	16,97
Trave	S19						3,17	23,74
Trave	S20						3,45	31,39
Pilastro	S21						3,35	28,56
Pilastro	S22						3,47	32,21
Pilastro	S23						2,69	14,71
Trave	S24						3,21	24,67
Trave	S25						3,12	22,65
Pilastro	S26						2,59	13,30
Pilastro	S27						2,85	17,27
Trave	S28						3,25	25,74
Trave	S29						3,35	28,38
Trave	S30						3,30	27,15
Pilastro	S31						2,89	18,02
Pilastro	S32						2,95	19,16
Trave	S33						2,89	18,07
							Valore medio	20,63

Tabella 7-5 Resistenze ottenute dal metodo della correlazione adattata al sito

Con l'intento di esplicitare il contenuto delle correlazioni e per confrontare i risultati ottenuti dall'applicazione delle correlazioni da letteratura e dall'applicazione della correlazione adattata al sito (minimi quadrati), si riporta il grafico seguente.

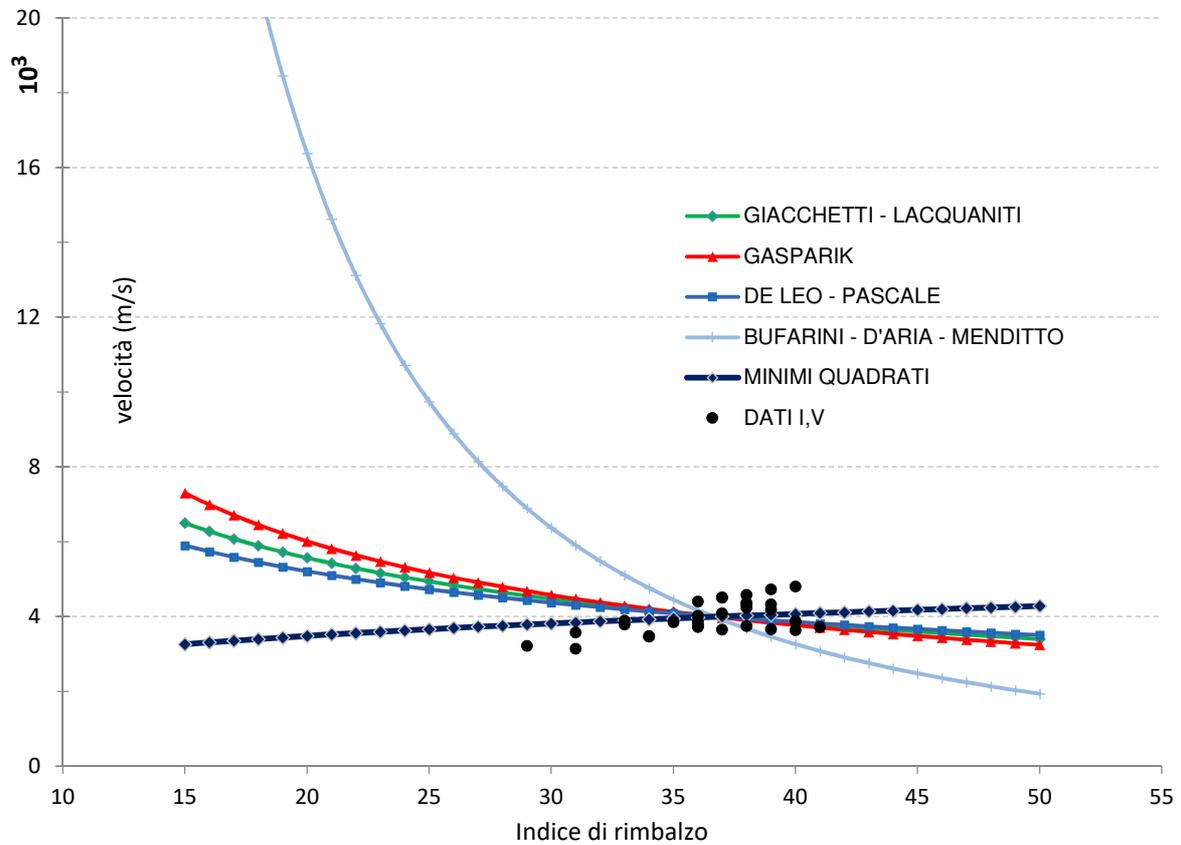


Figura 7-9 - Grafico rappresentante le curve di correlazione da letteratura e la curva adattata al sito con i risultati delle prove sclerometriche e ultrasoniche.

7.6 Sintesi delle indagini effettuate da UNIAN nel 1990

Le indagini furono condotte relativamente al solo telaio 3 evidenziato nella figura seguente.

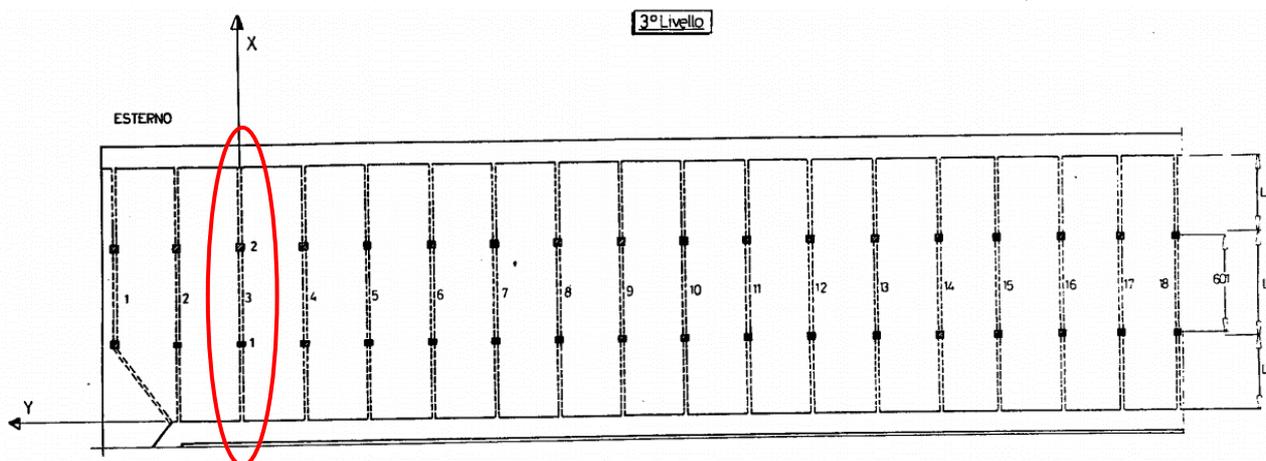
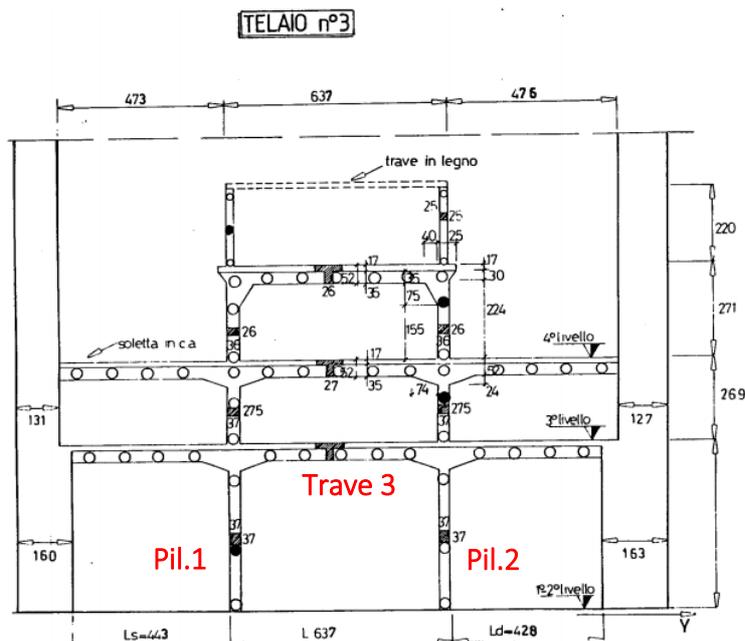


Figura 7-10 - Individuazione del telaio indagato campagna UNIAN 1990



Legenda:

- Carotaggio e stazione di prova
- Stazione di prova standard

Figura 7-11 - Dettaglio dell'ubicazione delle prove sul telaio indagato campagna UNIAN 1990

L'esame dei risultati ottenuti dalle indagini (vedi grafici riportati nel seguito) mostra che, per tutti gli elementi strutturali, le resistenze ed i moduli elastici hanno un incremento salendo di livello altimetrico. Inoltre la resistenza del pilastro è maggiore nel punto di prova inferiore per i livelli terzo e quarto, non per il primo, ove il getto da notevole altezza ha provocato la segregazione del conglomerato, con il conseguente deposito in basso delle parti più pesanti, che ha determinato una zona di minor resistenza.

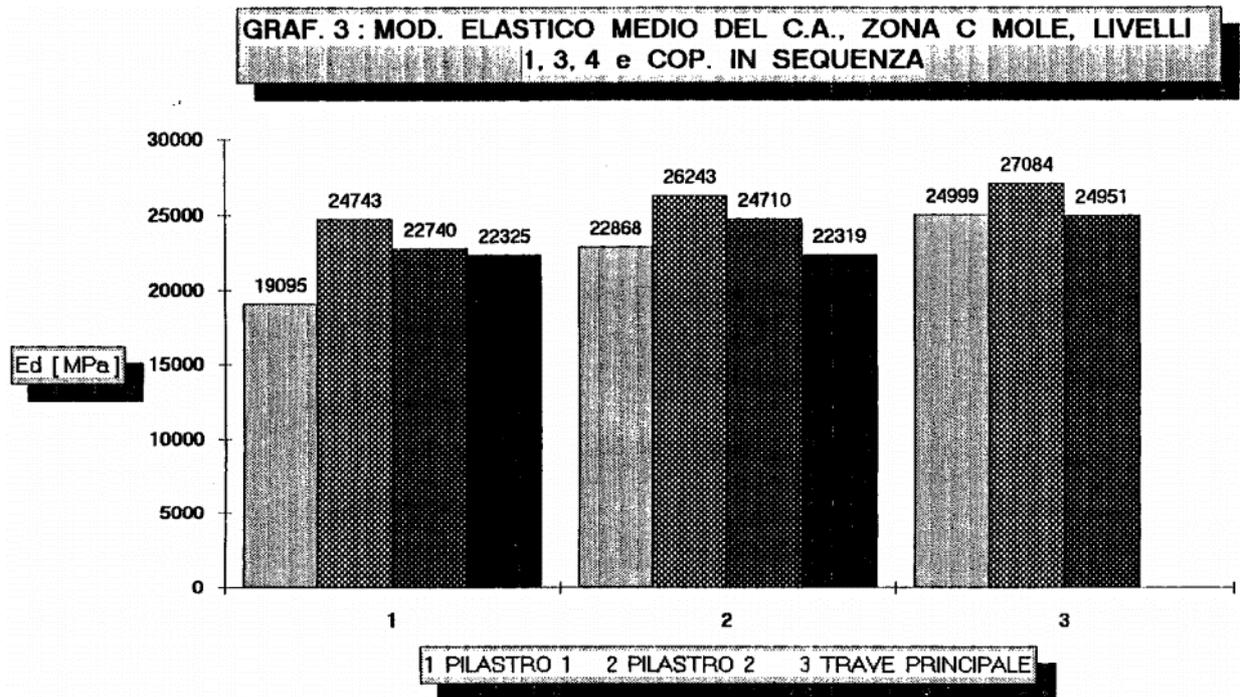


Figura 7-12 - Valori del modulo di elasticità medio delle strutture in c.a. del telaio "Nervi"

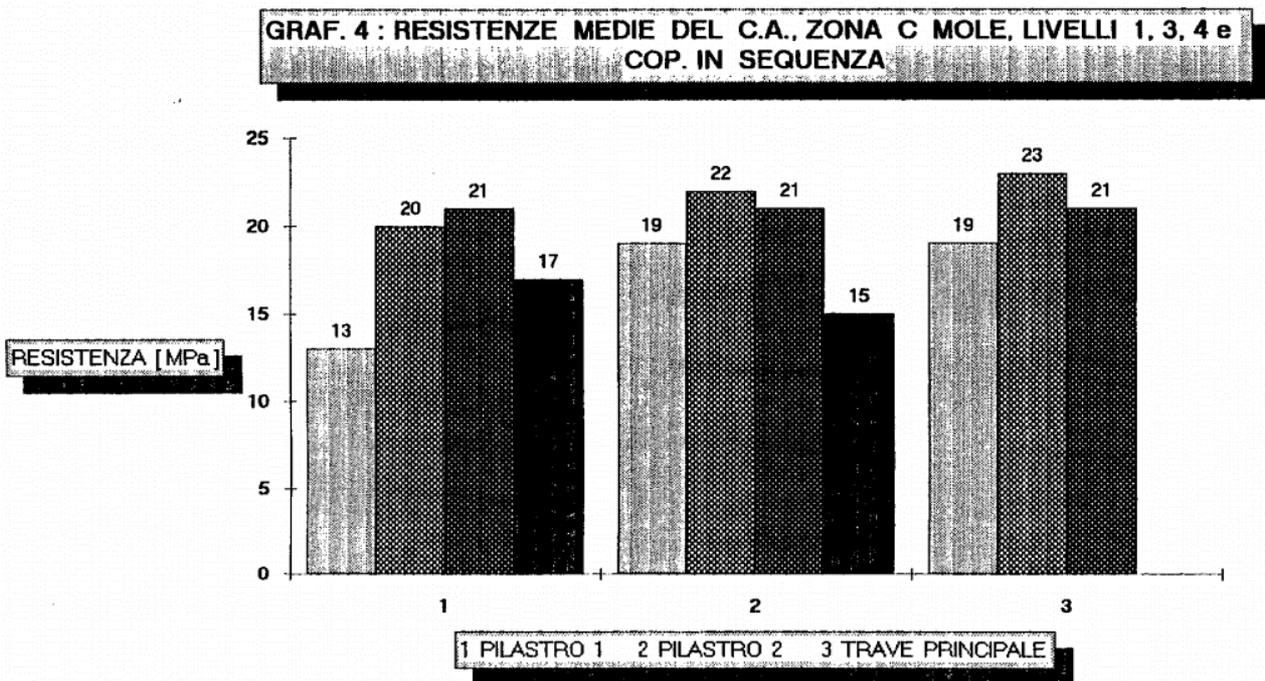


Figura 7-13 - Valori delle resistenze medie delle strutture in c.a. del telaio "Nervi"

Per un maggior dettaglio dei risultati è necessario fare riferimento direttamente agli elaborati dell'indagine UNIAN.