



Riabilitazione del Patrimonio LM EA

Riabilitazione Strutturale LM Civ, LM Edi

Costruzioni in C.A. – Indagini conoscitive

Prof. Ing. Laura Ragni

Analisi storico-critica

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Indagini diagnostiche sui materiali

Monitoraggi e prove di carico

Analisi storico-critica

Ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale esistente e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire **il processo di realizzazione e le successive modificazioni subite nel tempo dal manufatto**, nonché gli eventi che lo hanno interessato (sismi, etc..).

La conoscenza delle fasi edificatorie e dei successivi interventi sono elementi fondamentali per progettare il **piano delle indagini diagnostiche**, distruttive e non distruttive, da eseguire; il progetto dovrebbe seguire i criteri del minimo numero e minore invasività possibile delle prove, non solo per motivi economici ma soprattutto al fine di limitare il disturbo alle strutture e alla operatività dell'edificio, soprattutto nel caso di beni monumentali e di pregio storico-culturale-artistico.

Le **fonti** possono essere le più svariate, tra cui: archivi tecnici (uffici pubblici, studi privati), archivi storici e biblioteche (comunali, provinciali, della curia, ecc...), documentazioni fotografiche e rappresentazioni grafiche (libri, manuali, riviste, documenti storici, dipinti e disegni, ecc...).

Esempio - Museo Archeologico Nazionale delle Marche

Fasi edificatorie e documentazione



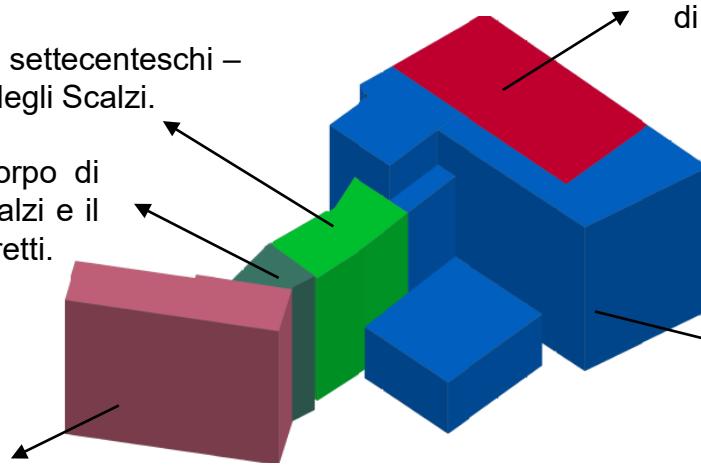
Fase edificatoria 3: ampliamenti settecenteschi –
Corpo B adiacente alla Chiesa degli Scalzi.

Fase edificatoria 5: costruzione del corpo di
collegamento tra l'ex convento degli Scalzi e il
complesso architettonico di palazzo Ferretti.

Fase edificatoria 4: ricostruzione
dell'ex convento degli Scalzi a
seguito dei bombardamenti
bellici (1954).

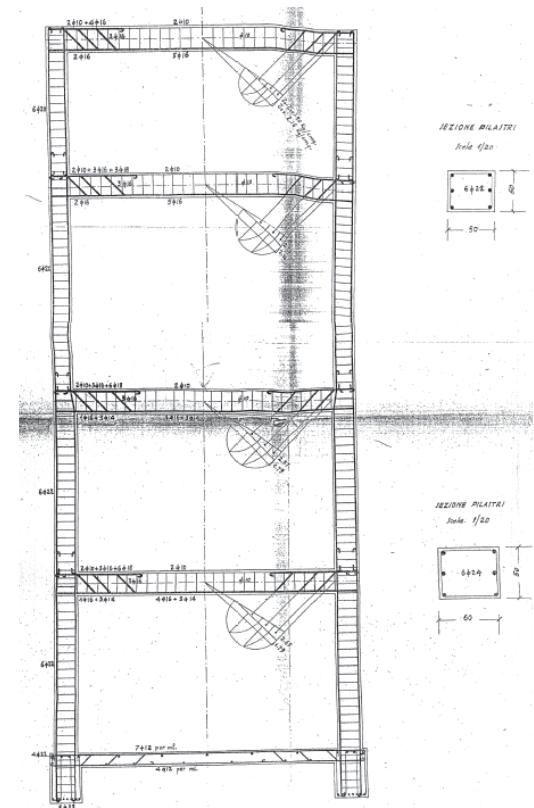
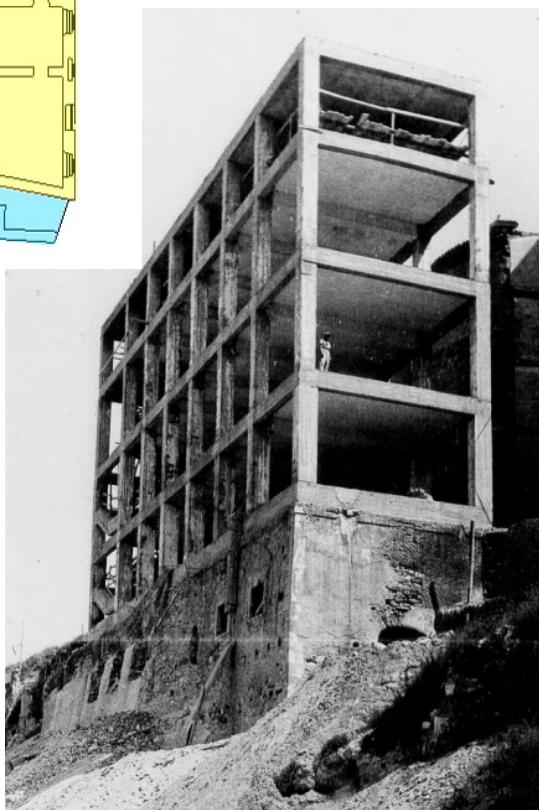
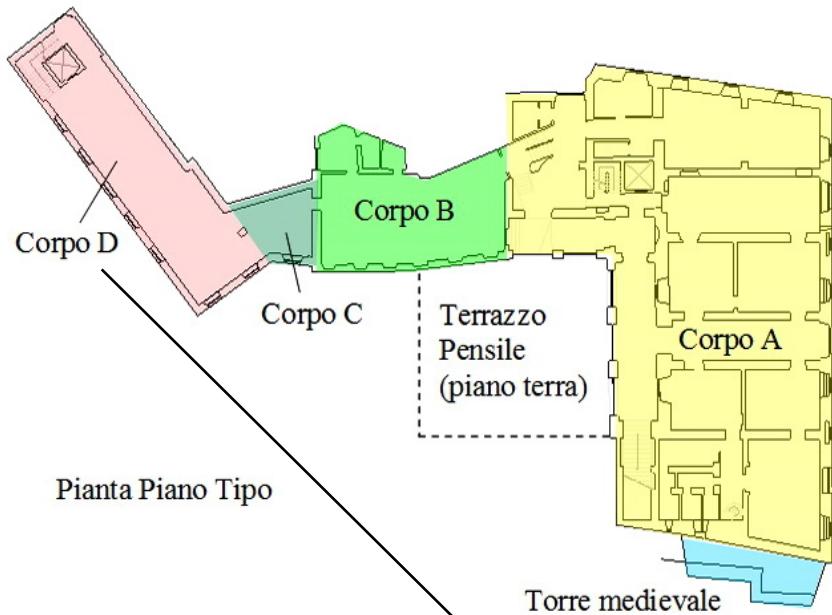
Fase edificatoria 1: impianto originario
di palazzo Ferretti (1540 – 1554).

Fase edificatoria 2: ampliamenti
settecenteschi all'impianto originario
del palazzo (1749 – 1774).



Analisi storico critica

Esempio - Museo Archeologico Nazionale delle Marche



L'unico stralcio del progetto originario a disposizione è la carpenteria di un telaio tipo in c.a. (progettato per carichi verticali e azioni sismiche dell'epoca)

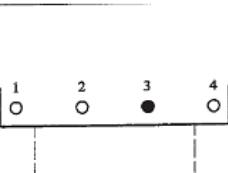
Esempio - Museo Archeologico Nazionale delle Marche

Indagini diagnostiche disponibili

Sono disponibili la descrizione ed i risultati delle indagini diagnostiche eseguite in passato su alcuni elementi strutturali del corpo D. In corrispondenza di due travi scelte a campione è stata eseguita una indagine magnetometrica (intradosso nella sezione di mezzeria) per rilevare il numero ed il diametro delle barre di armatura presenti. Sono stati inoltre eseguiti alcuni scassi per poter valutare lo stato di conservazione delle barre longitudinali e delle staffe.

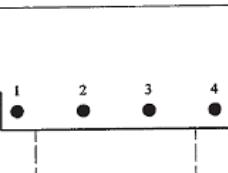
CORPO:		PIANO:				Terra	TRAVE n.		A - B
ZONA:	M	FOTO n.					Dim. b x h x L:		54 x 55 x 631
Ferro n.:	1	2	3	4					Staffe
Diam. Ø:			20						8
Tipo:			L						L
Conservazione:			LC						LC
Intonaco:			40						
CF:			25						

Passo staffe in mezzeria circa 20 cm

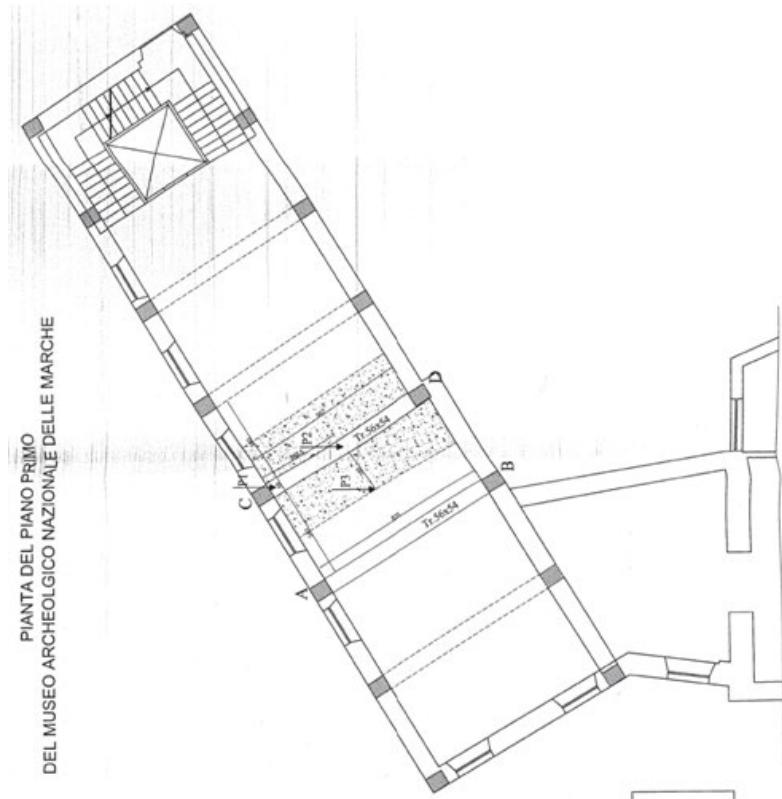


CORPO:		PIANO:				Terra	TRAVE n.		C - D
ZONA:	M	FOTO n.				1	Dim. b x h x L:		56 x 54 x 567
Ferro n.:	1	2	3	4					Staffe
Diam. Ø:	20	20	20	20					8
Tipo:	L	L	L	L					L
Conservazione:	LC	LC	LC	LC					LC
Intonaco:	10	10	10	10					
CF:	20	17	31	26					

Passo staffe in mezzeria circa 20 cm

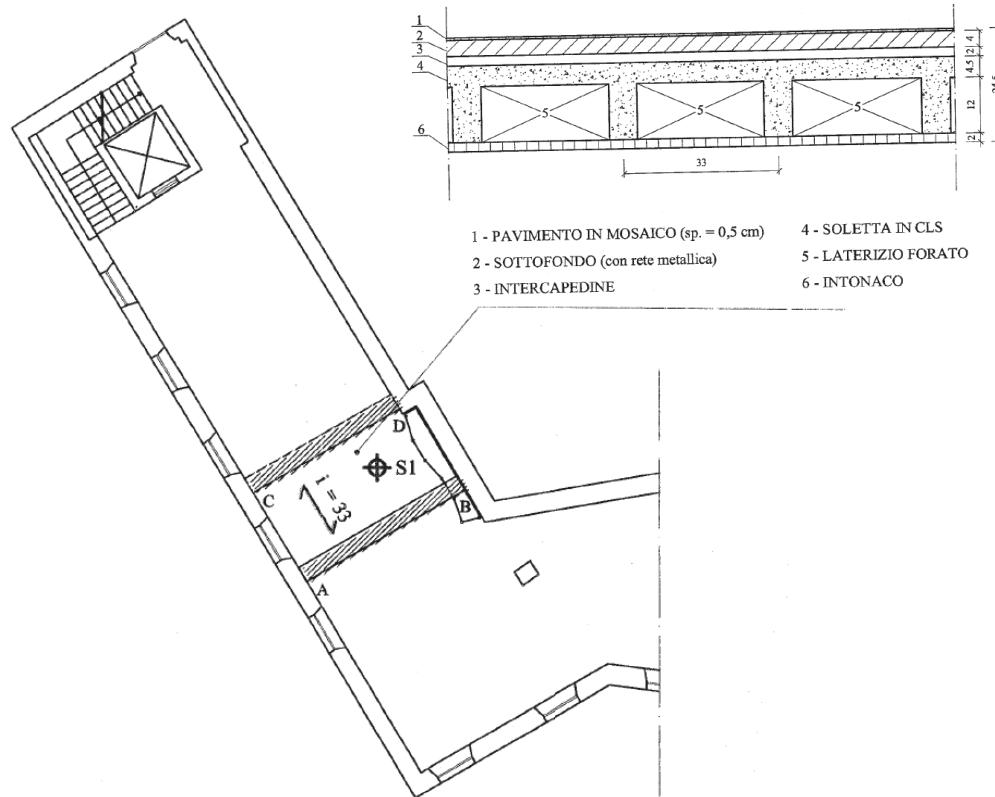


Tipo:	"L" = ferro liscio; "AM" = ferro ad aderenza migliorata.
Conservazione:	stato di conservazione del ferro rilevato mediante esame visivo in corrispondenza degli scassi: "B" = buono; "C" = corrosione sulla superficie; "LC" = punti di corrosione sulla superficie; "SF" = sfogliato.
Intonaco:	spessore dell'intonaco, (mm)
CF:	spessore, (mm), del coprifero rilevato (il coprifero è la distanza tra la superficie esterna della barra di armatura più prossima alla superficie del calcestruzzo e la superficie stessa del calcestruzzo).



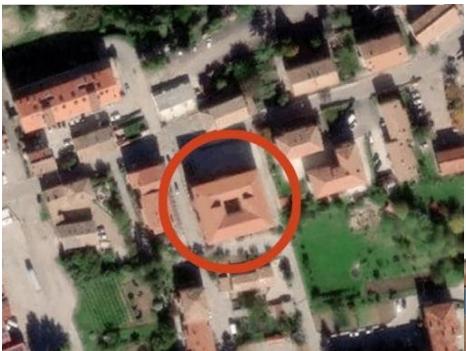
Esempio - Museo Archeologico Nazionale delle Marche

Inoltre per uno dei solai del Corpo D è stata rilevata la tipologia e la geometria degli elementi costituenti. Le indagini sono state eseguite con apparecchiatura endoscopica e magneto-metrica: dalla prima è stato possibile ricostruire il **pacchetto di solaio**, mentre dalla seconda è stato possibile definire l'**interasse dei travetti** e le **armature** degli stessi.



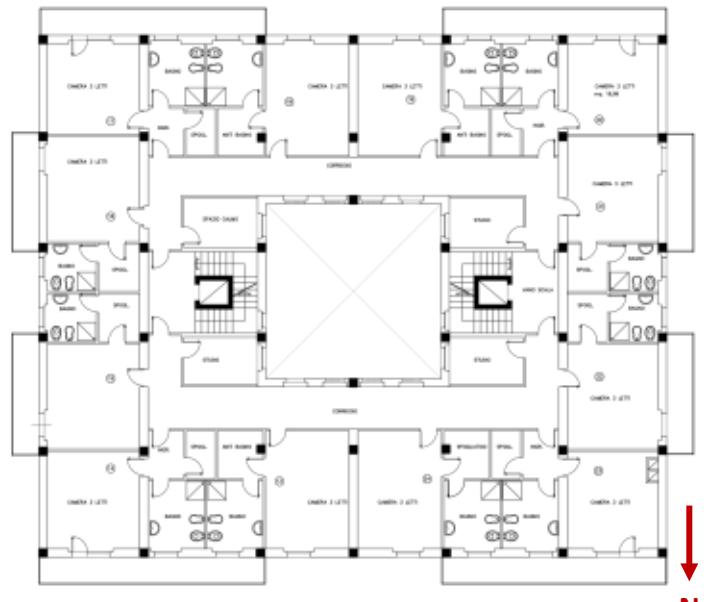
Rilievo geometrico-strutturale e materico

Vista aerea



Prospetto Nord

Esempio – Collegio Fazzini (Camerino)



Architettonico piano tipo (sup. $\approx 622\text{m}^2$)

Epoca di costruzione (1970) e corrispondente **pratica costruttiva**:

- Progetto antecedente alla legge n.1086 del 1971 → no obbligo di deposito
- No azione sismica → Camerino classificato sismico con D.M. n.515 del 1981
- Carichi, sovraccarichi e condizioni di carico da Bollettino Ufficiale (Norme tecniche) C.N.R. del 31 maggio 1967

Analisi storico-critica

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Indagini diagnostiche sui materiali

Monitoraggi e prove di carico

Il rilievo delle costruzioni in cemento armato oggetto di interventi, deve comprendere:

- il rilievo **geometrico-strutturale (fondazioni) e materico**;
- il rilievo del **quadro fessurativo e di degrado**;

Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica.

E' richiesto che il rilievo sia compiuto in maniera quanto più completa e dettagliata possibile, ai fini della definizione del modello strutturale necessario alla valutazione della sicurezza per le azioni prese in esame.

La rappresentazione dei risultati del rilievo dovrà essere effettuata attraverso piante, prospetti e sezioni, oltre che con particolari costruttivi di dettaglio.

Per quanto riguarda il **rilievo geometrico** possono essere utilizzati:

Metodi classici: visivo e manuale, fotogrammetria

Metodi avanzati: laser-scanner, droni

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica.

Deve essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi; deve individuare l'organismo resistente della costruzione comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza.

E' richiesto che il **rilievo sia compiuto in maniera quanto più completa e dettagliata possibile, ai fini della definizione del modello strutturale necessario alla valutazione della sicurezza per le azioni prese in esame.**

La rappresentazione dei risultati del rilievo dovrà essere effettuata attraverso piante, prospetti e sezioni, oltre che con particolari costruttivi di dettaglio.

Nel dettaglio, il rilievo geometrico-strutturale deve comprendere:

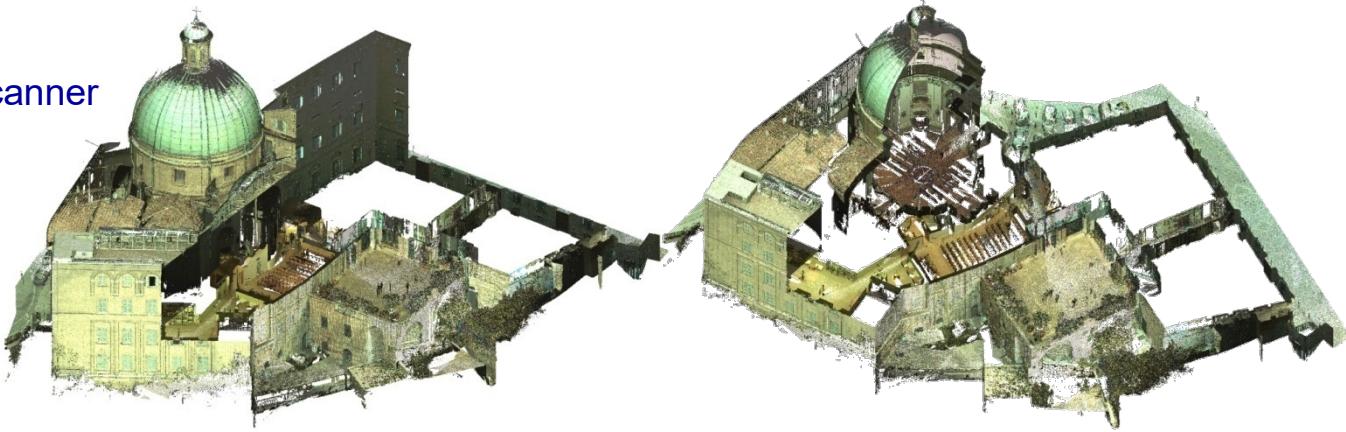
- rilevo delle **strutture** e della loro organizzazione (singoli corpi e giunti fra corpi);
- rilievo dell'orditura e della geometria dei **solai**, estesa al massetto ed alla pavimentazione;
- rilievo della geometria degli elementi strutturali (**pilastri, travi, setti, solette**, etc..) con individuazione di elementi critici, quali pilastri tozzi, travi corte, forature e/o tracce per alloggiamento canalizzazioni e condutture impiantistiche, etc..;
- rilievo degli elementi scatolari: **corpi scala, ascensori**;
- rilievo delle **fondazioni**;
- rilievo della posizione e della dimensione delle **armature**;
- rilievo degli elementi "**non strutturali**" dotati di apprezzabile rigidezza: tamponamenti, etc..;

Rilievo geometrico-strutturale e materico

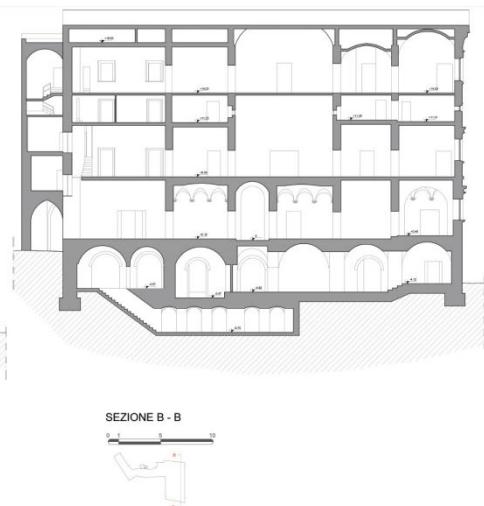
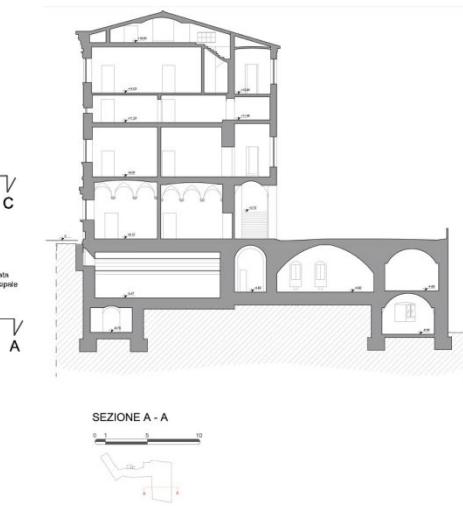
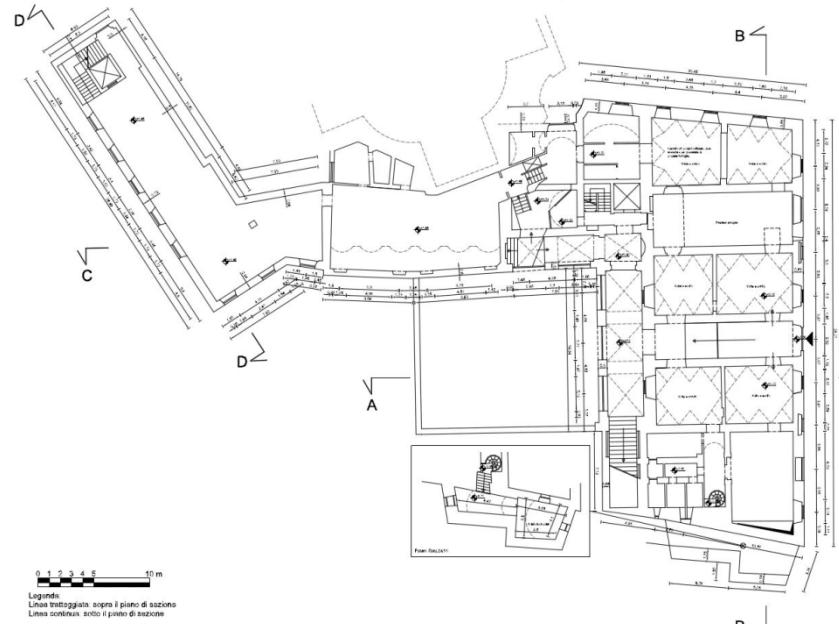
Rilievo geometrico

Esempio: Museo Archeologico Nazionale delle Marche

Rilievo con tecnologia laser-scanner



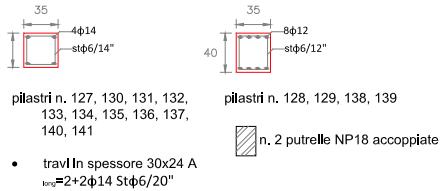
Rielaborazione grafica e restituzione in piante e prospetti



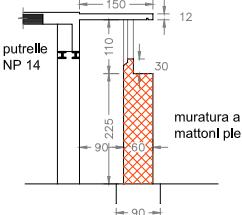
Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo delle strutture

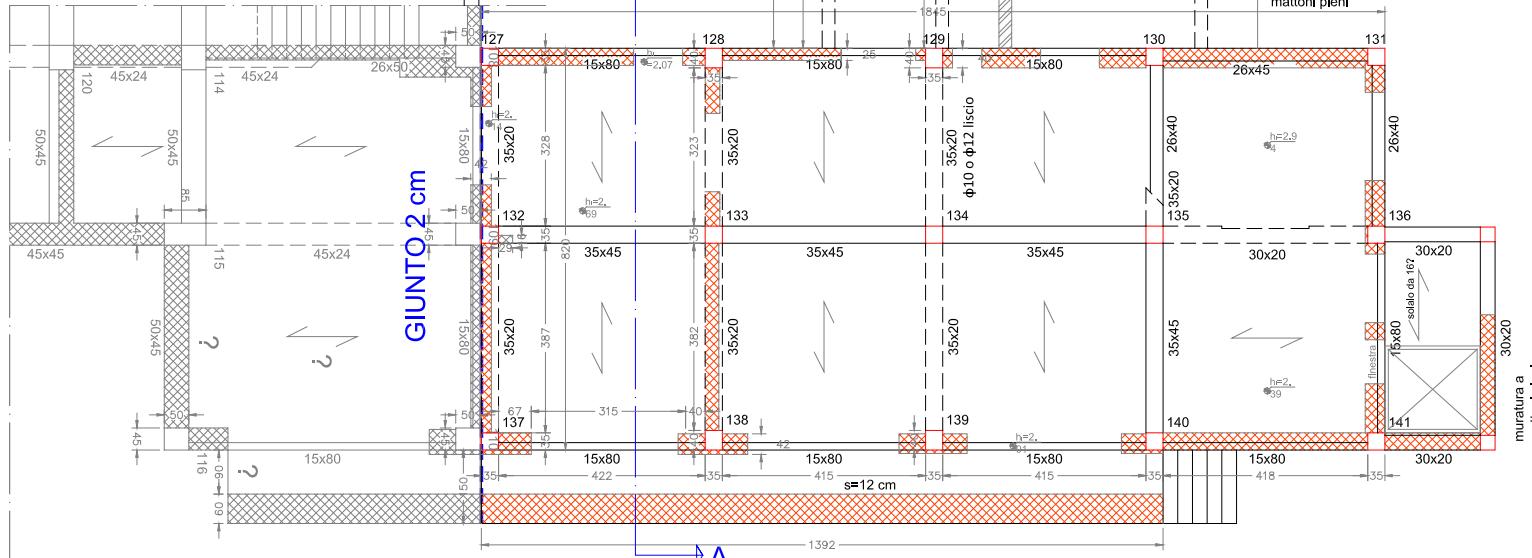
LEGENDA: da quota -10.62 a -7.62
 Sup = 162 mq (corpo principale)
 hi = 3,00 m



pilastri e travi dal n. 137 al n. 141 sono stati rinforzati con la costruzione di tamponamenti in muratura di mattoni pieni a 3 e 2 teste e l'inserimento, sotto le travature di travi in ferro a doppio T



CORPO D - quota -7.62



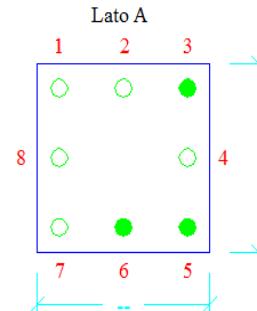
CORPO E - solaio quota -7.62
 (primo impalcato)

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo dei dettagli di armatura

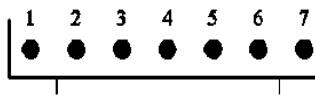
Esempio rilievo – dettaglio pilastro

CORPO:	D	PIANO:		3° Seminterrato			PILASTRO n.	118	
H =	--	FOTO n.							
Ferro n.:	1	2	3	4	5	6	7	8	Staffe
Diam. Ø:			18		18	16			8
Liscio / A.M.:			L		L	L			L
Conservazione:			LC		LC	LC			C
Intonaco:			4		25	25			
CF:			35		35	35			
Passo staffe dal piede:	41 - 31 - 24 - 27 - 25 - 25								



Esempio rilievo – dettaglio trave

CORPO:	D	PIANO:		3° Seminterrato			TRAVE n.	111 - 112	
ZONA:	M	FOTO n.		3			Dim. b x h x L:	--	
Ferro n.:	1	2	3	4	5	6	7		Staffe
Diam. Ø:	16	16	16	16	16	16	16		10
L	L	L	L	L	L	L			L
Conservazione:	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC		C
Intonaco:	5	5	5	5	5	5	5		
CF:	25	25	25	25	25	25	25		
Passo staffe da Pil. n. 112	11 - 14 - 17 - 17 - 15 - 20 - 21 - 23 - 21								



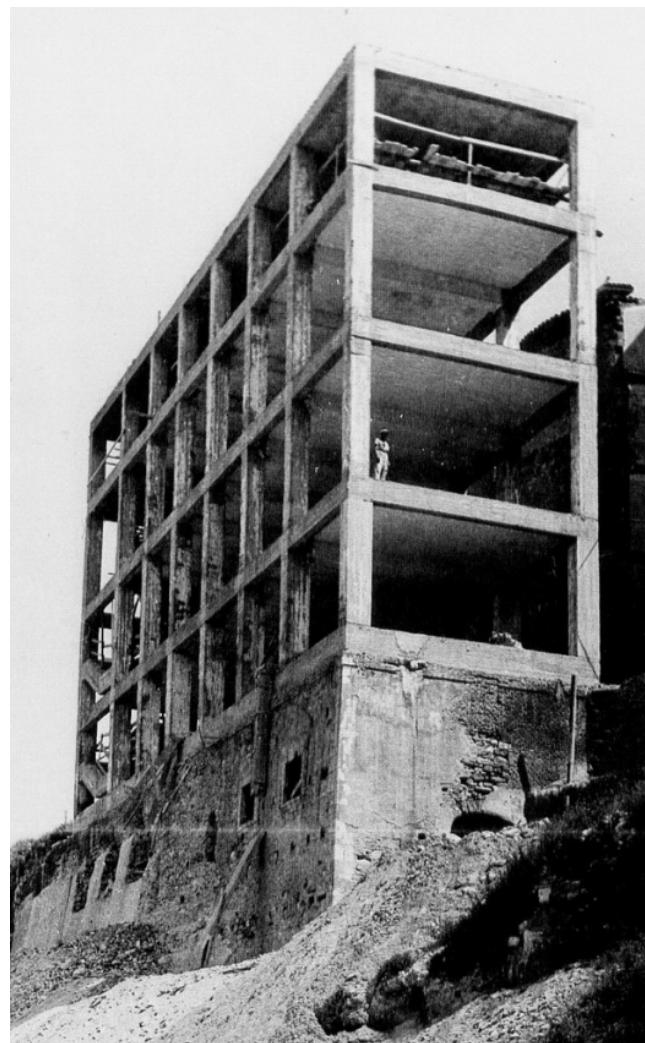
Rilievo delle fondazioni

Fondazioni corpo D, con telaio in c.a.

Il graticcio di travi di fondazione del telaio in c.a. poggia sul piano seminterrato dell'ex convento degli Scalzi in muratura, quest'ultimo con allargamenti alla base dei maschi.

Analisi dissesti

Nella fase di conoscenza dell'edificio non si sono individuati danni alla struttura riconducibili a dissesti delle fondazioni.



Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo geometrico

Esempio: Collegio Fazzini (Camerino)

Laser scanner e prese aeree

Acquisizione di nuvole di punti tramite laser scanner e volo del drone per colmare eventuali zone d'ombra



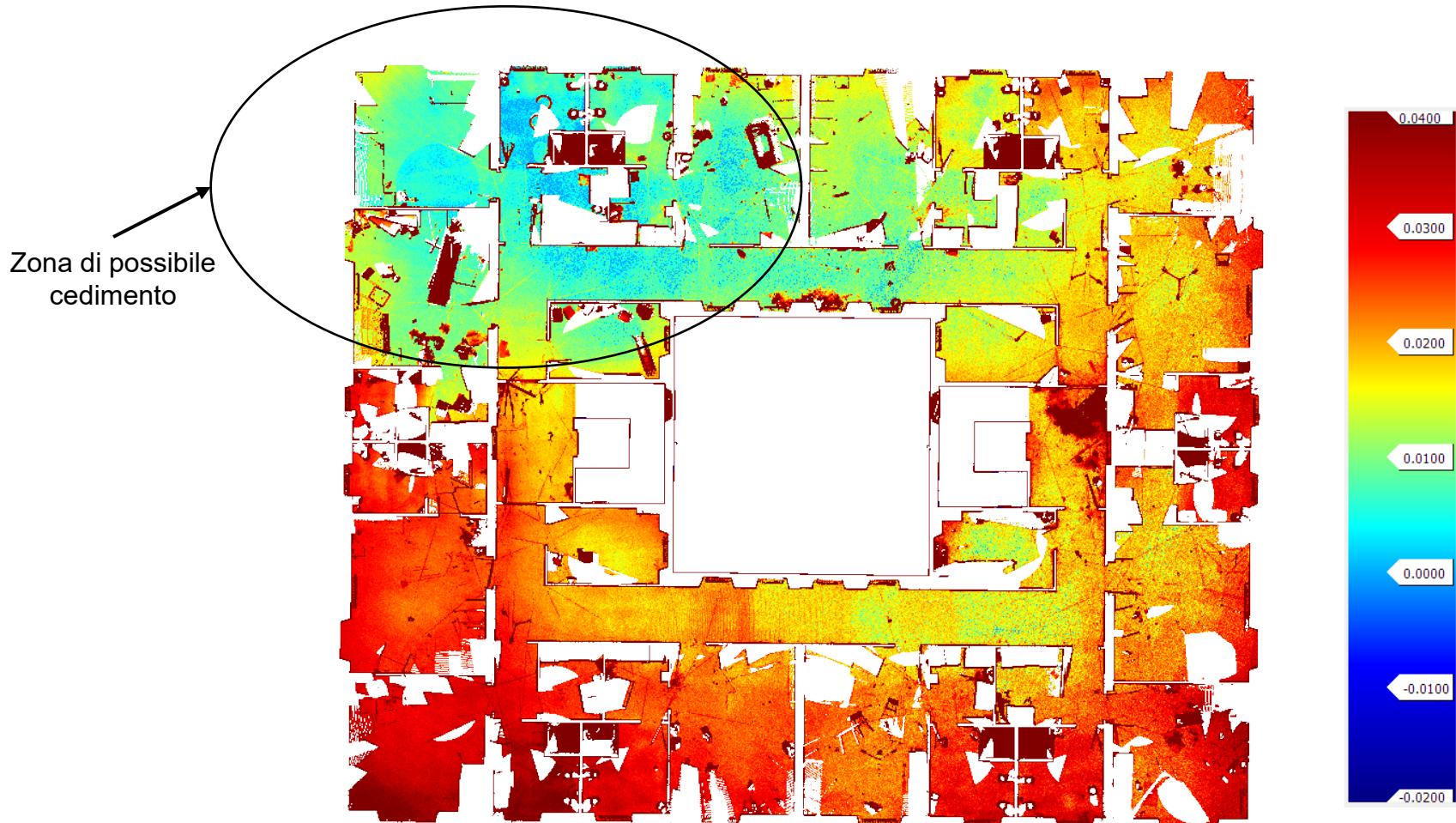
VISTA SEZIONATA DELL'EDIFICIO

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo geometrico

Planarità di piano

Dal rilievo laser-scanner è possibile verificare la planarità dei solai e identificare possibili cedimenti fondali



Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo delle strutture

Travi REP (ferri ad aderenza migliorata)



Dispositivo di appoggio



Corrente superiore e traliccio



Spezzoni per M-



Spezzoni per M+

Pilastri (ferri lisci)



Indagini con pacometro

Nuclei (ferri lisci)



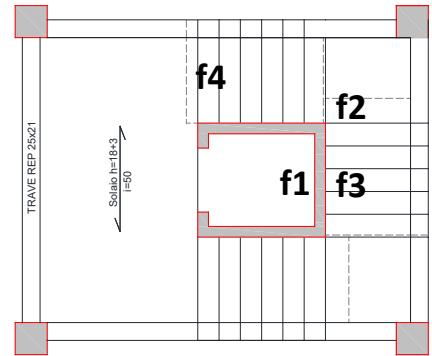
Indagini con pacometro

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo delle strutture

Le scale

- solette a sbalzo in c.a. larghezza 120cm e spessore pari a circa 15cm
- solette in semplice appoggio sulla tamponatura perimetrale del vano scala
- no collegamento con nuclei in c.a. (180x160x15cm)
- no collegamento con pilastri perimetrali del vano ascensore

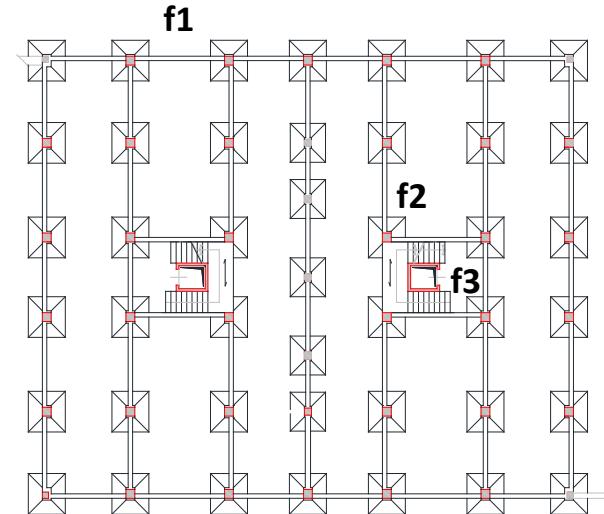


Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo delle fondazioni

La fondazione

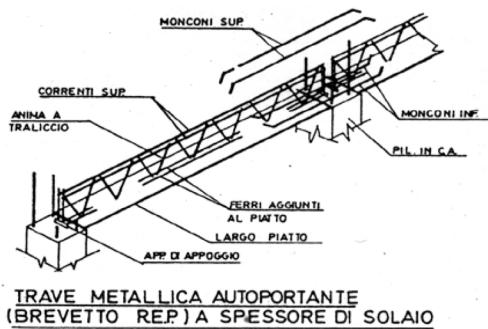
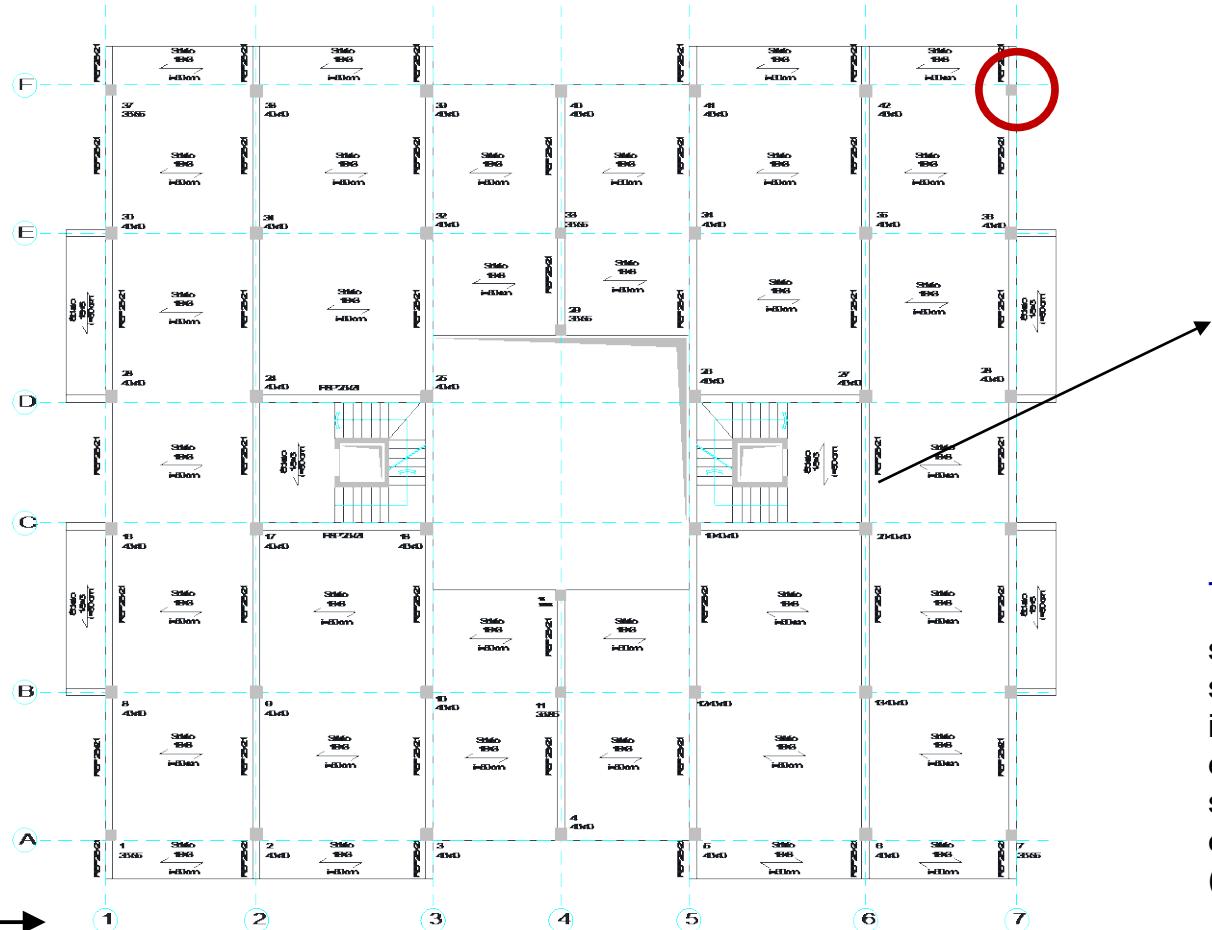
- plinti ($2.3 \times 2.1 \text{m}$ $h=0.7\text{m}$) al di sotto dei pilastri
- cordoli di collegamento dei plinti ($b=0.3\text{m}$ $h=0.4\text{m}$) allineati all'estradosso
- zattera superficiale ($h=0.4\text{m}$) sotto i nuclei approfondita di 1.5m rispetto al calpestio del P -1



Carpenteria fondazione

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo delle strutture



Trave autoportante brevetto REP ing.
Salvatore Leone. Tratta da Prontuario
REP 4° edizione – Maqqioli Editore

Travi Reticolati autoPortanti (REP*)

struttura mista acciaio-calcestruzzo in spessore di solaio ($h=21\text{cm}$). Corrente inferiore: piatto in acciaio da $25 \times 0.6\text{cm}$ e eventuali ferri aggiuntivi saldati. Corrente superiore: almeno una coppia di ferri più eventuali spezzoni ad aderenza migliorata ($>\phi 30$). Anima di collegamento a traliccio

- struttura a telai monodirezionali in c.a. con fondazione a plinti (collegati da cordoli monodirezionali)
 - pilastri gettati in opera a sezione prevalentemente quadrata
 - travi parzialmente prefabbricate tipo REP nella sola direzione N-S
 - Solai in latero-cementizio con soletta non armata ($H=18+3\text{cm}$)
 - n.2 nuclei ascensore in c.a. ($s=15\text{cm}$) collegati a livello di solaio

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Indagine magnetometrica

È una tecnica di indagine sub-superficiale utilizzata per la ricerca di elementi metallici (barre di armatura) posti ad una certa profondità (fino a 10 cm dalla superficie). Il metodo è basato sul principio dell'induzione magnetica, cioè sulla perturbazione di un campo magnetico generato da una sonda che viene fatta scorrere sulla superficie in modo continuo.

Apparecchiatura: pacometro

Lo strumento è composto da una unità di emissione e lettura del campo elettro-magnetico e da sonde emittenti/riceventi il campo magnetico.

Nel dettaglio esistono:

- sonda di superficie (da 0 a 6 cm di coprifero)
- sonda di profondità (oltre i 6 cm di coprifero)



La sonda contiene due bobine; quando ricevono un impulso di corrente creano un campo magnetico che magnetizza le barre di armatura inducendovi correnti parassite (correnti di Foucault). Le correnti parassite si dissolvono creando un campo magnetico.

Le bobine contenute all'interno della sonda misurano la forza del campo indotto man mano che questo si dissolve, elaborando il segnale per fornire la **posizione**, il **diametro** e la **profondità della barra di armatura** indagata.

Nella parte inferiore del monitor dello strumento appare una striscia indicante l'**intensità del segnale** che aiuta ad individuare i punti di picco per la ricerca delle barre.

Per lo stesso scopo, lo strumento è anche dotato di un **segnalatore acustico** che emette un suono via via più acuto tanto più ci si avvicina ad una barra.

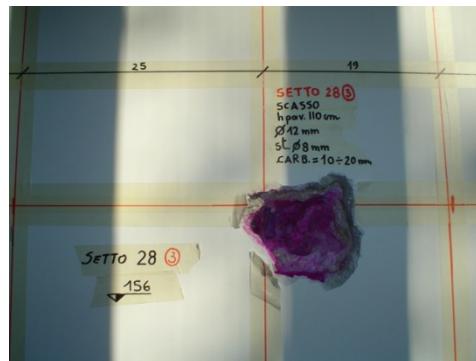
Rilievo geometrico-strutturale e materico

Indagine magnetometrica

Tecnica pratica per la ricerca delle barre

In fase di ricerca bisogna porre la sonda con la direzione principale parallela alle barre da individuare e spostarla lateralmente. Se l'armatura metallica è costituita da due orditure di barre, una verticale e l'altra orizzontale, la ricerca va eseguita due volte, una per ciascuna direzione.

Esempio: prima si individua la posizione delle staffe e poi, facendo scorrere la sonda nello spazio intermedio tra due staffe, si individua la posizione delle barre.

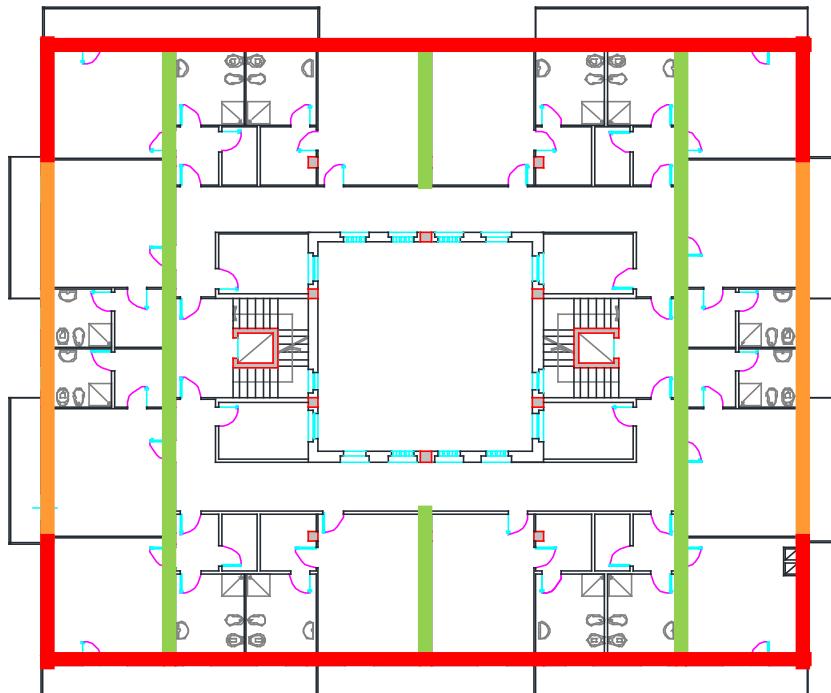


Rilievo geometrico-strutturale e materico

Esempio – Collegio Fazzini (Camerino)

Le tamponature

- tamponature esterne in parte intonacate ed in parte faccia vista a doppia fodera non collegata
- pilastri perimetrali a filo con la tamponatura sia internamente che esternamente → spessore intercapedine d'aria variabile
- irregolarità in pianta (tramezzatura esterna PT ingresso principale non contenuta all'interno di travi e pilastri) e tamponatura in mattoni pieni al PT lato giardino.
- irregolarità in elevazione (alternanza di specchiature con tamponature in laterizio forato e semipieno),



Planimetria piano tipo

Tamponatura interna

doppia fodera in laterizio forato tipo tavella ($s=6\text{cm}$) e intercapedine (s var.)

Tamponatura intonacata

laterizi interni ($s=8\text{cm}$) ed esterni ($s=12.5\text{cm}$) forati con intercapedine (s var.)

Tamponatura faccia vista

laterizi interni forati ($s=8\text{cm}$) ed esterni semipieni ($s=12\text{cm}$) con intercapedine (s var.)

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Indagini endoscopiche

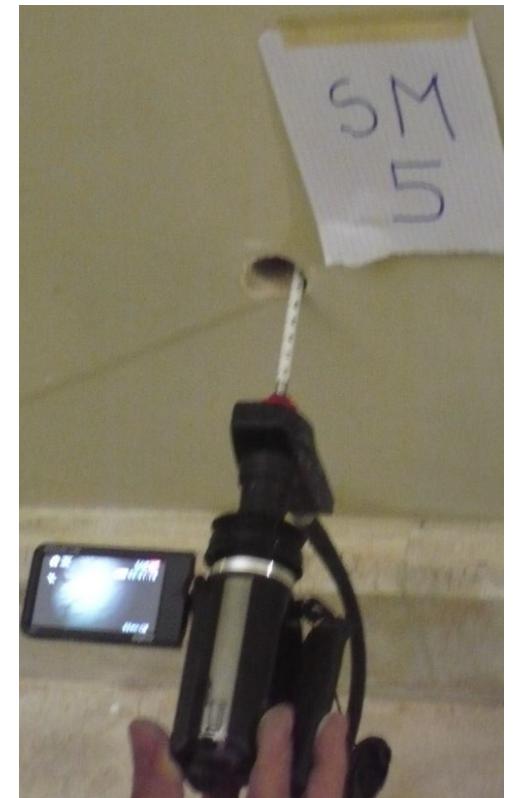
Negli edifici in c.a. le prove endoscopiche sono utilizzate soprattutto per verificare **spessori e tipologia di solai in laterocemento e di pareti di tamponamento**, al fine principale di determinarne con esattezza i pesi e di stimarne la rigidezza nel piano e fuori piano. È una tecnica di indagine puntuale che restituisce la stratigrafia di quanto attraversato.

Le fasi esecutive delle tomografie endoscopiche sono le seguenti:

- perforazione con trapano munito di punta al widia;
- se necessario, ripulitura del foro allo scopo di eliminare i residui di polvere ed i frammenti di materiali causati dalla perforazione;
- introduzione nel foro del boroscopio rigido;
- Visualizzazione ed eventuale registrazione della stratigrafia del tratto indagato (misura parziale e progressiva)

Contrassegno osservazione endoscopica :	SM5
Elemento indagato :	Muratura interna
Localizzazione in planimetria :	Tavola 3
Altezza del foro rispetto alla quota di calpestio :	33.cm
Profondità del tratto indagato :	52.cm
Foro eseguito con trapano munito di punta al vidia Ø 20 mm :	a perforazione 0°

STRATIGRAFIA				
Tratto	Misura strato (cm)		Descrizione del tratto indagato	
	Parziale	Progressiva		
1	24	24	Muratura in mattoni pieni e malta.	
2	28	52	Muratura costituita da elementi lapidei e mattoni pieni legati da malta.	

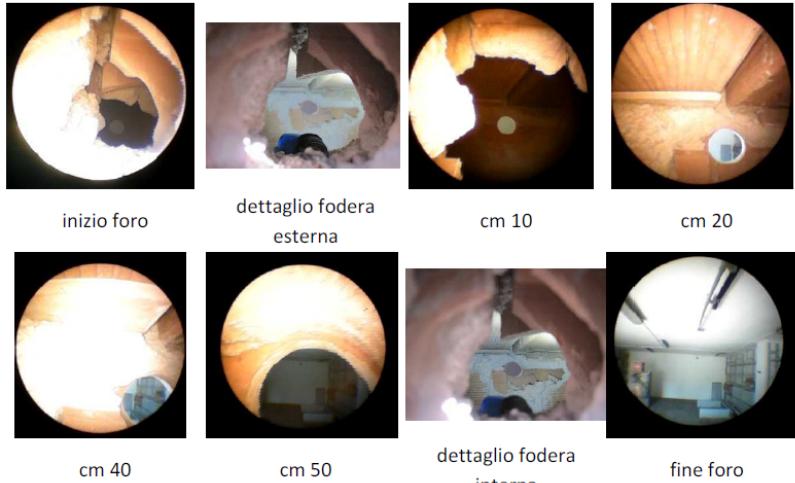


Rilievo geometrico-strutturale e materico

Indagini endoscopiche

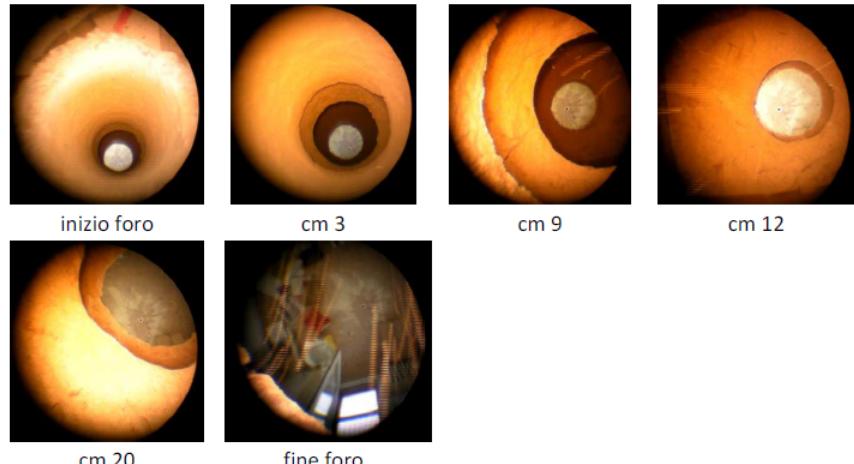
endoscopia E1

Ubicazione: parete perimetrale prospetto Sud, piano seminterrato tra i pilastri n. 38 e 39.
L'endoscopia è fatta dall'esterno verso l'interno.



endoscopia solaio ES2

Ubicazione: solaio di calpestio piano primo, stanza tra i pilastri n. 35, 36, 42 e 43



STRATIGRAFIA

Tratto	Misura strato [cm]		Descrizione tratto indagato
	parziale	progressiva	
1	1	1	Intonaco esterno.
2	12.5	13.5	Laterizio forato.
3	33	46.5	Intercapedine, si fa notare che al di sopra dell'intercapedine sono presenti degli elementi di laterizio inseriti a mo' di architrave.
4	8	54.5	Laterizio forato.
5	0.5	55	Intonaco interno.

STRATIGRAFIA

Tratto	Misura strato [cm]		Descrizione tratto indagato
	parziale	progressiva	
1	1	1	Pavimento.
2	9	10	Soletta di completamento del solaio e massetto, non si riesce a cogliere la discontinuità tra i due elementi.
3	18	28	Pignatta in laterizio con lunettatura superiore di altezza 3 cm visibile nello scatto realizzato a 9 cm dal bordo.
4	0.5	28.5	Intonaco all'intradosso del solaio.

Rilievo geometrico-strutturale e materico

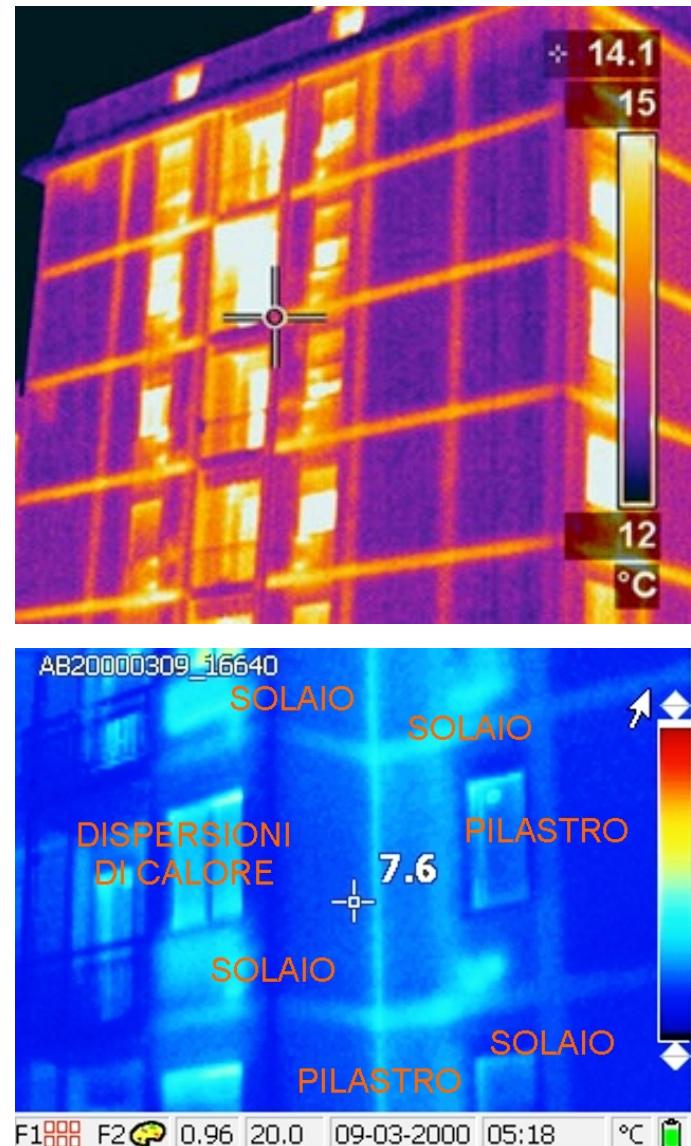
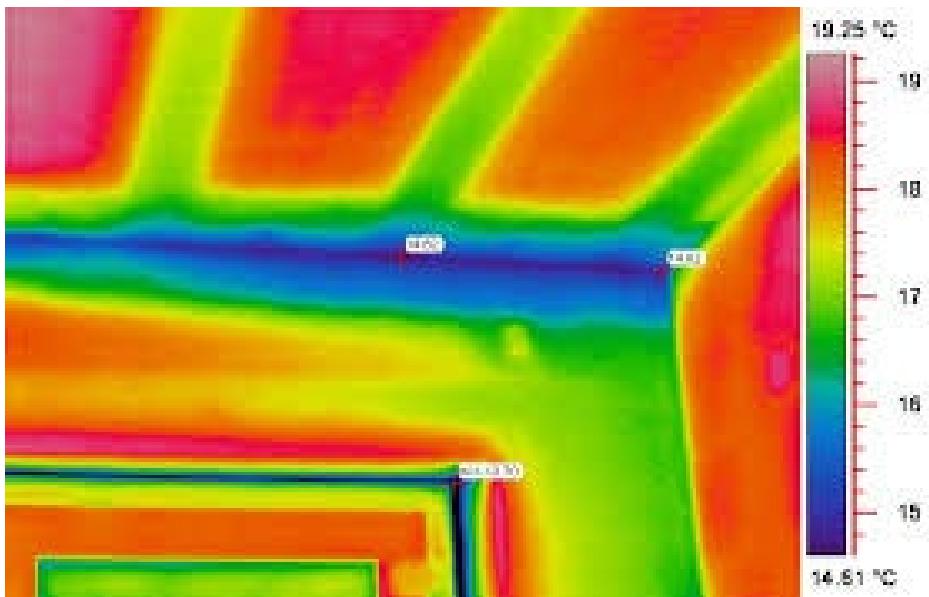
Prova termografica

Strumentazione: camera termografica

È una tecnica di indagine globale utilizzata soprattutto per gli edifici in muratura (cavità, cavedi, vani).

Nelle strutture in c.a. la prova termografica può essere utilizzata per indagare la tipologia dei solai, individuando la presenza dei travetti e quindi la direzione e l'interasse.

Può risultare utile per rilevare ammaloramenti, umidità e muffe, zone di discontinuità e disomogeneità (ponti termici).



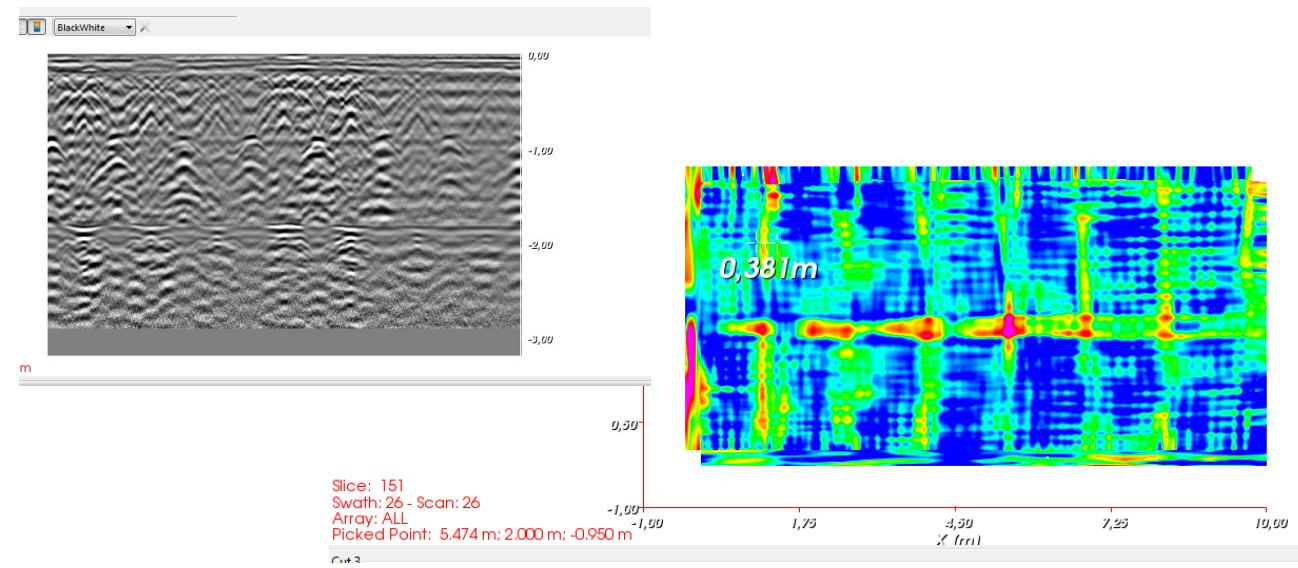
Rilievo geometrico-strutturale e materico

Georadar

Strumentazione: georadar

Il metodo comunemente chiamato Ground Penetrating Radar ed è un sistema di indagine geofisica del sottosuolo, ma molto usato anche per le indagini di tipo non distruttivo nelle murature e in elementi in calcestruzzo armato per l'individuazione delle barre di armatura, per modeste profondità, basato sulla riflessione delle onde elettromagnetiche.

Per la ricerca di **cavità nel sottosuolo** si impiegano frequenze medio-basse (200-600 MHz) o per individuare **strutture metalliche e non metalliche**, quali cavi, tubazioni, e opere in cemento e muratura. La sua applicazione a strutture murarie e/o in calcestruzzo armato in genere avviene utilizzando antenne con frequenze più elevate dai 900 ai 2000 MHZ) che permettono l'individuazione di variazioni centimetriche all'interno del manufatto in esame. **In particolare è possibile identificare interfacce tra livelli dotati di differente resistività e costante dielettrica.** Tali parametri sono correlabili a fattori fisici quali la densità, la posizione e le caratteristiche di eventuali oggetti inglobati, nonché la presenza di zone umide o di zone non cementate.



Analisi storico-critica

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Indagini diagnostiche sui materiali

Monitoraggi e prove di carico

Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Generalità

Rilievo del degrado e del quadro fessurativo

Il rilievo del quadro fessurativo, degli eventuali dissesti e del degrado deve riguardare sia gli **elementi strutturali che quelli non strutturali**. Devono essere individuati **ampiezza, profondità e sviluppo delle fessure** nonché la qualità e lo stato di conservazione dei materiali.

Il rilievo deve essere esteso anche alla parte fondale e ai terreni, qualora necessario e riportare eventuali dissesti.

Un rilievo accurato dello stato fessurativo e di danno deve costituire la base per l'individuazione delle cause del danneggiamento e quindi di progetti finalizzati alla rimozione delle cause o all'attenuazione degli effetti. I risultati del rilievo dovranno essere rappresentati sugli **elaborati grafici (piante, prospetti e sezioni) corredati da fotografie**; gli elaborati dovranno essere accompagnati da una relazione esplicativa.

Analisi e interpretazione del danno

A seguito del rilievo è di fondamentale **importanza l'analisi e l'interpretazione del danno** che si è manifestato al fine di determinarne le cause e, quindi, la possibilità di progettare un intervento che, oltre a riparare il danno, possa evitare che si possa verificare nuovamente con le medesime modalità e tempistiche.

Indagini diagnostiche sui materiali

Degrado materiali

Corrosione delle barre di armatura ed espulsione del copriferro (zone esposte a dilavamento)

Nelle opere in c.a. la presenza di fessure nel cls, se in corrispondenza delle armature, possono essere dovute all'ammaloramento del calcestruzzo superficiale e quindi al rigonfiamento delle barre ossidate o corrosive. In tal caso basta rimuovere il copriferro per ispezionare le barre e il cls sottostante,



Degrado materiali

Reazione alcali aggregato

Il degrado del cls per la cosiddetta reazione alcali-aggregato si innesca in presenza delle seguenti condizioni:

- alcali (Na e/o K) nel cemento (composizione argillosa) o dall'esterno (es: sali disgelanti);
- elevata umidità relativa ambientale;
- aggregati silicei.

Gli alcali si idratano formando idrossidi. Gli aggregati reagiscono con gli ossidi formando gel di silicati alcalini; questi assorbendo acqua si espandono generando prima **rigonfiamenti e fessurazioni e quindi distacchi**. In generale i quadri fessurativi sono diffusi e irregolari e non seguono necessariamente la **disposizione delle armature** (come ad es. le fessure da ritiro o da corrosione delle barre).

Rimedi

Per prevenire il degrado dovuto alla reazione suddetta, si possono utilizzare cementi d'altoforno (miscela di clinker, gesso e loppa granulata d'altoforno) e pozzolanici (pozzolana naturale, o materiali ad attività pozzolanica come fumi di silice o ceneri volanti) che neutralizzano la reazione.

Nel caso di degrado avvenuto e in corso, se gli alcali provengono dall'esterno si possono limitare diminuendo la permeabilità dello strato superficiale del cls: lo si scarnisce quanto possibile, si tratta poi la superficie con **sali di litio**, e si ripristina con **prodotti cementizi tixotropici a ritiro compensato**.



Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Carenze costruttive

Trave con lesione in corrispondenza dell'interruzione delle barre inferiori



Ferri inferiori che a circa 30 cm dal pilastro vengono risvoltati verso la parte superiore della trave, mentre i due reggistaffa disposti agli spigoli proseguono. In corrispondenza di tale discontinuità, si è creata una fessura piuttosto ampia, passante su tutta la sezione della trave.



Importante lesione (da ritiro) dovuta alla forma della pila e la disposizione interna delle barre non sufficientemente ancorate.

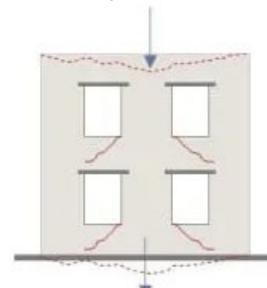
Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Dissesti in fondazione

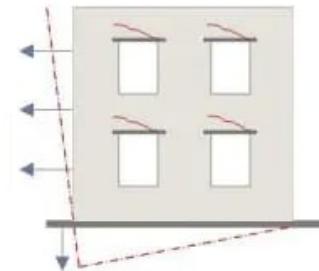
I cedimenti differenziali in fondazione possono produrre crepe sulle murature (tamponature), sotto le armature dei solai e nei pavimenti. Oltre ad analizzare il quadro fessurativo per risalire alle cause **è fondamentale monitorare l'evoluzione nel tempo** (stazionario, progressivo, stagionale) ai fini di stabilire i tempi dell'intervento.

Rilievo visivo delle fessure può essere seguito da un rilievo strumentale per la stima dell'ampiezza e della profondità.

Sistemi di monitoraggio delle lesioni



Fessurazioni simmetriche per cedimento verticale di elemento portante



Fessurazioni inclinate per cedimento spigolo edificio



Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Dissesti sismici



Prospetto Ovest angolo Nord



Prospetto Ovest angolo Sud



Tamponatura interna PT

Esempio – Collegio Fazzini (Camerino)

Danneggiamento concentrato nelle prime due elevazioni su:

elementi non strutturali

- tamponature esterne ed interne confinate e non
- elementi strutturali (limitato)**
- vani scala (rampe)

Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Dissesti sismici



Tamponatura vano scala da PT a P -1



Rampa scala da P -1 a PT



Tamponatura esterna PT

Analisi storico-critica

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Indagini diagnostiche sui materiali

Monitoraggi e prove di carico

Le tecniche di indagine per la caratterizzazione meccanica dei materiali si dividono in :

- **Prove distruttive** (prove dirette eseguite su campioni di materiali portati a rottura in laboratorio);
- **Prove semi-distruttive** (prove dirette eseguite su campioni limitati portati a rottura in situ);
- **Prove non distruttive** (prove indirette che non comportano la rottura di campioni in laboratorio o in situ)

Le **prove distruttive** sono altamente invasive ma permettono la determinazione diretta dei parametri meccanici del materiale in esame, mentre le **prove non distruttive** sono poco o per nulla invasive ma permettono solo una stima dei parametri meccanici.

Queste ultime quindi hanno il vantaggio di essere di veloce esecuzione e di non provocare danni e quindi di poter essere eseguite su vasta scala. Di contro però richiedono una interpretazione dei risultati e leggi di correlazione apposite.

Risulta a tal proposito molto vantaggioso **l'accoppiamento di prove distruttive con prove non distruttive** che permette la taratura delle leggi di correlazione e quindi valutazione della resistenza locale del calcestruzzo.

Calcestruzzo

Prove distruttive:

Prove a compressione su carote

Prove semi-distruttive:

Micro-carotaggi

Prove di estrazione (pull-out)

Prove non distruttive:

Indagine sclerometrica

Indagine ultrasonica

Barre di armatura

Prove distruttive:

Prove a trazione su campioni di armatura

Prove semi-distruttive:

Prove non distruttive:

Prova di durezza

Normative di riferimento

Le prove devono essere eseguite da personale specializzato e nel rispetto delle seguenti normative:

- UNI EN 12504-1:2002 “*Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Carote - Prelievo, esame e prova di compressione*”.
- UNI EN 12504-2:2001 “*Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico*”.
- UNI EN 12504-3:2005 “*Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Determinazione della forza di estrazione*”.
- UNI EN 12504-4:2005 “*Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*”.
- C.S.LL.PP. “*Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale*” – settembre 2017.
- C.S.LL.PP. “*Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera*” – settembre 2017.

Qualificazioni e certificazioni

Osservazioni

Il fattore umano è una componente fondamentale soprattutto nei Controlli Non Distruttivi (CND), pertanto la conduzione delle prove deve essere affidata a personale adeguatamente qualificato, di provata capacità, serietà professionale e che abbia maturato una notevole esperienza nel settore specifico.

Il Consiglio Nazionale delle Ricerche nella CNR-DT 200 R1/2012 “Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante utilizzo di compositi fibrorinforzati” (Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p. e strutture murarie) indica espressamente nel paragrafo 6.3 **“Qualifica degli operatori per l'esecuzione delle prove”** che i profili professionali preposti alle prove devono corrispondere ai **tre livelli di qualifica (livello 1, 2 e 3)** in conformità alla UNI EN 473 (sostituita dalla UNI EN ISO 9712) e UNI 45013.

Inoltre, l'art. 40 “Qualificazione per eseguire lavori pubblici” del Decreto Legislativo 163/2006 e s.m.i. “Codice dei contratti pubblici”, definisce che i soggetti esecutori a qualsiasi titolo di lavori pubblici devono essere **qualificati** e improntare la loro attività ai principi della qualità, della professionalità e della correttezza. Il sistema di qualificazione è attuato da organismi di diritto privato di attestazione, appositamente autorizzati dall'Autorità. L'attività di attestazione è esercitata nel rispetto del principio di indipendenza di giudizio, garantendo l'assenza di qualunque interesse che possa determinare comportamenti non imparziali o discriminatori.

Organismi accreditati da  certificano, attraverso corsi di istruzione preliminari e successivi esami di profitto, la qualificazione del personale di livello 1 e 2 e dell'esperto di livello 3. La classificazione in livelli è legata al graduale perfezionamento nell'uso dell'attrezzatura che dal semplice utilizzo dell'apparecchio cresce e si completa con l'esame critico della norma ed, infine, con l'interpretazione del dato.

Per una campagna di indagini in situ è possibile e consigliabile rivolgersi a personale **“Certificato per l'esecuzione dei controlli non distruttivi nel settore civile”** (livello 1, livello 2 ed esperto di livello 3, secondo la classificazione dettata dalla norma **UNI EN ISO 9712**).

Carotaggio

Prova distruttiva per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo

Strumentazione: carotiere

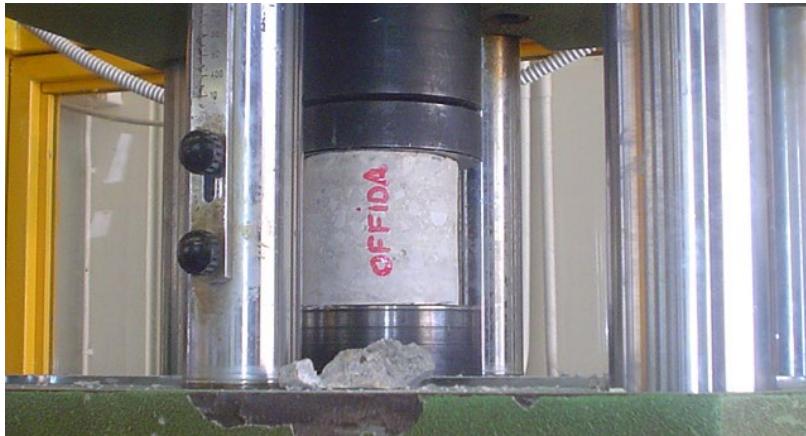


Il carotaggio consiste nell'estrazione di un campione di materiale attraverso una **macchina carotatrice** (carotiere cilindrico munito di corona diamantata che viene fatto ruotare e avanzare da un motore).

L'operazione di estrazione del campione (carota) deve essere eseguita con cautela e da personale esperto al fine di ottenere una **carota regolare** (rettilinea e con diametro costante) e di non perturbare il campione di materiale mantenendolo quindi rappresentativo del materiale in opera.

La carota viene successivamente preparata (rettifica delle superfici) per il test a compressione al fine di determinare la resistenza a compressione del materiale. Il diametro (D) della carota dipende dalla dimensione massima dell'inerte (d_{inerte}). A diminuire del rapporto D/d_{inerte} aumenta la dispersione dei risultati. **Solitamente il diametro delle carote varia da 5cm a 10cm** (sotto 5 cm si parla di microcarorte). Per quanto riguarda la lunghezza (H) la norma UNI EN 12504-1 raccomandano:

- campioni con rapporto altezza/diametro (H/D) pari a 1, nel caso in cui il risultato debba essere confrontato alla resistenza caratteristica cubica (R_{ck}),
- campioni con H/D uguale a 2 qualora si debba far riferimento alla resistenza caratteristica cilindrica (f_{ck}).



Rapporto $H/D = 1$

$$Rc = fc$$



Rapporto $H/D = 2$

$$Rc = fc / 0,83$$

Le NTC e le Linee Guida sul calcestruzzo strutturale riportano la ben nota correlazione $f_{ck} = 0.83 \times R_{ck}$. Occorre fare attenzione: la UNI EN 12504-1:2009 “*Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1 - Carote - Prelievo, esame e prova di compressione*” definisce comunque fc il risultato di prove a compressione, anche nel caso di provini con $H/D = 1,0$. Ovviamente il risultato di prove a compressione su provini con rapporto $H/D = 1,0$ deve essere paragonato alla resistenza cubica a compressione Rc .

Ovviamente le resistenze ottenute dalle prove a compressione delle carote è la resistenza del calcestruzzo in opera (**resistenza strutturale**) che non è paragonabile alla resistenza convenzionale a 28 giorni convenzionale ottenuta su provini prelevati al momento del getto e maturati in ambiente controllato. Di solito la resistenza del calcestruzzo in opera è minore per una serie di fattori: maturazione in condizioni non standard, direzione ed eventuali fenomeni di segregazione del getto, ecc. Vengono pertanto utilizzate fattori correttivi (**coefficienti di conversione**)

Indagini diagnostiche sui materiali

Carotaggio

Per quanto riguarda la posizione in cui realizzare il carotaggio deve essere prima effettuata un'indagine paco metrica al fine di evitare le barre di armatura e vanno privilegiata le zone di minima sollecitazione (es. mezzeria dei piastri)



$f_c = 4,0 \text{ N/mm}^2$ Pilastro in c.a. al Piano Seminterrato di una Scuola Elementare



$f_c = 9,0 \text{ N/mm}^2$ Trave in c.a. posta al Piano 2°

Indagini diagnostiche sui materiali

Carotaggio

Pilastri al seminterrato del corpo in c.a. del Museo Archeologico Nazionale delle Marche



Indagini diagnostiche sui materiali

Carotaggio e misura profondità di carbonatazione

Strumentazione: soluzione incolore a base di fenolftaleina

Un calcestruzzo correttamente proporzionato presenta un **ambiente fortemente alcalino** (pH13) che inibisce le reazioni di ossidazione delle armature. Tuttavia essendo permeabile, l'anidride carbonica può diffondersi al suo interno e reagire con diverse sostanze dando luogo al fenomeno della **carbonatazione** (ambiente pH9). Queste reazioni sono spesso accompagnate da variazioni dimensionali che determinano la fessurazione del calcestruzzo che favorisce la carbonatazione stessa e l'ossidazione delle armature (favorita anche da un ambiente meno alcalino).

Lo spessore dello strato soggetto a carbonatazione viene messo in evidenza da una soluzione incolore a base di **fenolftaleina** che cambia colore in ambiente fortemente alcalino mentre resta incolore nell'eventuale strato carbonatato.



Indagini diagnostiche sui materiali

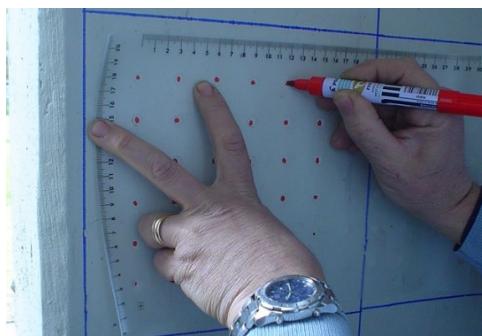
Indagine sclerometrica

Strumentazione: sclerometro (UNI EN 12504-2)

L'indagine sclerometrica (metodo di durezza superficiale) si basa sulla corrispondenza esistente tra la durezza superficiale del calcestruzzo e la sua resistenza a compressione. La prova permette di **valutare l'uniformità del calcestruzzo, delineare le zone o aree di calcestruzzo di scarsa qualità o deteriorato**, nonché di **stimare** la resistenza a compressione del calcestruzzo in opera (**resistenza strutturale**) correlando i risultati con quelli ottenuti da prove a compressione (carotaggi).

Lo sclerometro ha un percussore che colpisce la superficie del calcestruzzo e rimbalza in funzione della durezza superficiale. Il risultato viene espresso in termini di Indice di Rimbalzo (IR).

Attenzione: se la durezza superficiale del cls è influenzata da fattori non correlabili con la resistenza, come ad esempio nel caso di carbonatazione, la misura perde di significato.



Indagine sclerometrica

Apparecchiatura

L'apparecchiatura minima per eseguire tale prova è composta da: sclerometro, incudine di acciaio di taratura per la verifica dello strumento, pietra abrasiva al carburo di silicio con tessitura granulare media o materiale equivalente.

Area di prova

Gli elementi in calcestruzzo da sottoporre a prova devono essere di almeno 100 mm di spessore e approssimativamente 300 x 300 mm di area. Prima di effettuare la prova è necessario rettificare le superfici a tessitura ruvida o tenera o le superfici con resti di malta, fino a renderle lisce, utilizzando la pietra abrasiva. Vanno evitate zone in prossimità di armature o nidi di ghiaia.

Procedimento

1. Verifica di taratura dello sclerometro utilizzando l'incudine in acciaio di riferimento.
2. Tenendo lo sclerometro perpendicolare alla superficie di prova, aumentare gradualmente la pressione sul pistone fino all'impatto del martello e registrare l'indice sclerometrico.
3. Se l'impatto ha frantumato o sforato a causa di un vuoto la superficie, scartare il risultato.
4. Utilizzare un minimo di 9 misure per ottenere una stima affidabile dell'indice sclerometrico dell'area di prova (solitamente rappresentata da una superficie di 30cmx30cm con punti di impatto a distanza non inferiore a 25mm e distati almeno 25mm dal bordo).
5. Registrare la posizione e l'orientamento dello sclerometro per ciascuna serie di misurazioni.
6. Eseguire periodicamente, anche durante la stessa campagna di indagine, la verifica di taratura dello strumento (in quanto dopo un uso prolungato la molla modificano la sua costante elastica).

Il risultato della prova è la media dei valori ottenuti che non è possibile associare ad una resistenza a meno di una **curva di correlazione**. Qualora la superficie da saggiare abbia una giacitura diversa da quella verticale, la lettura deve essere corretta per depurarla dal peso del martello.

Indagini diagnostiche sui materiali

Indagine ultrasonica

Strumentazione: apparecchiatura ad ultrasuoni (UNI EN 12504-4)

L'indagine ultrasonica permette di valutare il **modulo elastico del calcestruzzo**, l'uniformità del calcestruzzo, **delineare le zone o aree di calcestruzzo di scarsa qualità o deteriorato**, nonché di stimare la resistenza a **compressione del calcestruzzo in opera** (resistenza strutturale) tramite una curva di correlazione (che permette di correlare i risultati con quelli ottenuti da prove a compressione su carote).

L'apparecchiatura si compone di due sonde: **una sonda emittente ed una ricevente** e si misura il tempo di percorrenza del segnale, da cui la velocità di propagazione (V) dell'onda. Rispetto all'indagine sclerometria questo metodo presenta il vantaggio di indagare il calcestruzzo in profondità.



Esistono diverse modalità di misura: il metodo di trasmissione diretta (le due sonde sono applicate su facce opposte), il metodo di trasmissione semi-diretta (le due sonda sono applicate su due facce ortogonali) e il metodo di trasmissione indiretta o superficiale (le due sonde sono applicate alla medesima superficie)

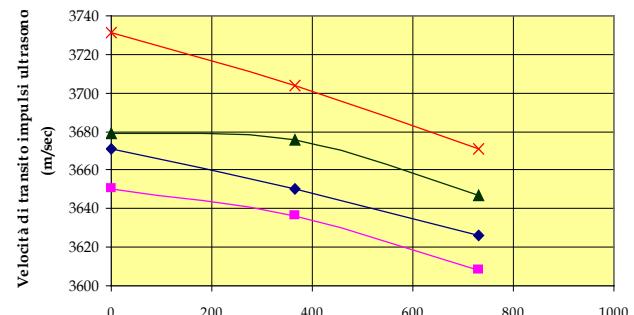
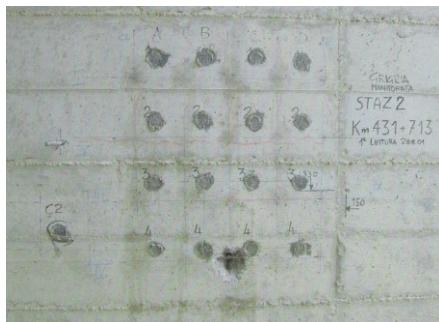
Indagini diagnostiche sui materiali

Indagine ultrasonica

Impieghi principali:

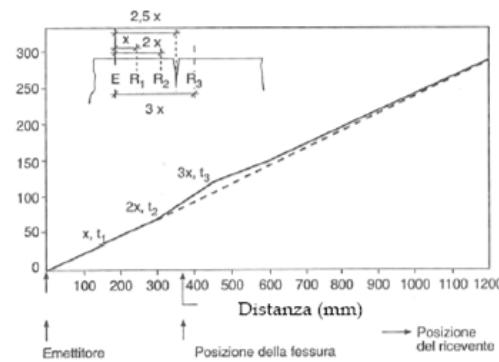
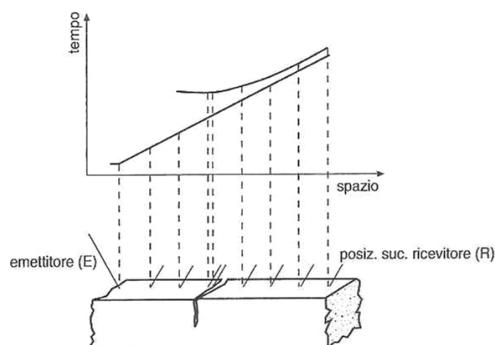
- qualificazione materiali e controllo uniformità, e per monitoraggio degrado

Valutando la velocità degli ultrasuoni si può avere informazioni sulle caratteristiche meccaniche del materiale e sulla uniformità; ripetendo a distanza di tempo si può monitorare il degrado.



- a scopo defectologico (metodo superficiale)

Valutando il tempo di percorrenza degli ultrasuoni con sonde disposte a distanza progressiva ma sempre sulla medesima superficie (si può individuare la presenza di difetti, danni e fessure ed anche stimare la profondità della fessura).



Indagine ultrasonica

- per valutare il modulo elastico dinamico

La prova consiste nel misurare il tempo che un segnale acustico ultrasonoro impiega per percorrere la distanza d tra la sonda emittente e la sonda ricevente; si calcola quindi la velocità V da cui si ricava il modulo elastico dinamico E_d tramite la seguente correlazione, in funzione anche della densità ρ del cls (in kg/m^3) e del coefficiente di Poisson v :

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+v)(1-2v)}{(1-v)}$$

Le linee guida C.S.LL.PP. (2008) fanno osservare che *la velocità così calcolata può differire dall'effettiva velocità di propagazione delle onde nel calcestruzzo in esame*. Per questo motivo *la velocità così calcolata è spesso denominata anche "velocità apparente"*. *La velocità di propagazione delle onde elastiche è influenzata da diversi fattori, tra cui il contenuto d'umidità, la composizione della miscela ed il grado di maturazione. La determinazione della velocità deve tener conto della possibile presenza d'armature metalliche e di eventuali difetti macroscopici, nonché lo stato tensionale (che influenza le microfessure all'interno del cls)*.

Le stesse linee guida C.S.LL.PP. indicano i seguenti range di velocità in funzione della qualità del cls:

- cls di media qualità: $3000 \text{ m/s} \leq V \leq 4000 \text{ m/s}$,
- cls di buona qualità $V > 4000 \text{ m/s}$.

- per stimare la resistenza a compressione

tramite indagine accoppiata prova ultrasonica + prova sclerometrica e carottaggi (Metodo SonReb),

Indagini diagnostiche sui materiali

Indagine accoppiata: Metodo SonReb

Svolgendo nelle stesse zone di indagine sia indagini sclerometriche che ultrasoniche è possibile stimare la resistenza del calcestruzzo in opera mediante una **correlazione sperimentale** tra indice di rimbalzo (IR) dello sclerometro e velocità degli ultrasuoni (V) del tipo: $f_{c, \text{stimata}} = e \times IR^f \times V^g$

Il metodo SonReb è un metodo combinato che supera i limiti dei singoli metodi, l'uno superficiale e l'altro volumetrico. I coefficienti **e**, **f**, **g** dipendono dalle caratteristiche del materiale (composizione, età, umidità), per cui nonostante in letteratura siano proposti diversi valori, è necessario tarare tali coefficienti attraverso un'interpolazione ottimale ottenuta con una **minimizzazione ai minimi quadrati sulla base dei valori fc ottenuti dallo schiacciamento di alcune carote**.

Pilastro n.	IR	Velocità UT	fc
1	30	3700	
2	30	3690	
3	32	3802	21,5
4	30	3690	
5	30	3687	
6	34	3875	23,0
7	29	3680	
8	30	3689	
9	27	3590	14,0
10	27	3600	14,5
11	28	3620	
12	29	3634	
13	30	3678	
14	32	3802	
15	32	3790	
16	30	3712	
17	30	3713	
18	30	3714	
19	30	3685	
20	29	3640	
21	28	3600	14,5
22	27	3610	13,5
23	28	3615	14,0
24	31	3725	
25	30	3689	
26	30	3701	
27	31	3712	
28	30	3710	
29	31	3753	

Si adotta una rappresentazione analitica della correlazione tra l'Indice di Rimbalzo dello sclerometro e la Velocità di Transito degli ultrasuoni del tipo (per esempio):

$$fc (\text{stimata}) = e \times IR^f \times V^g$$

somma dei quadrati delle differenze dei valori (tra fc sperimentale e fc stimata)

3,15

20,45

coeff. determinazione

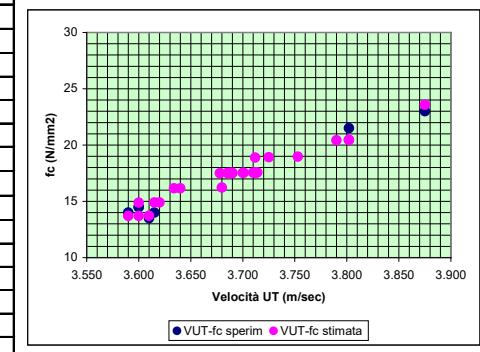
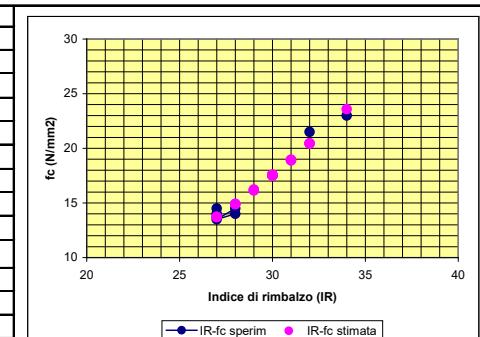
0,97

20,43

coeff. correlazione

0,98

17,55



Una volta tarata la curva di correlazione è possibile utilizzarla per la stima delle resistenze in altre parti della struttura senza la necessità di prelevare ulteriori carote ma facendo solo prove non distruttive.

Indagini diagnostiche sui materiali

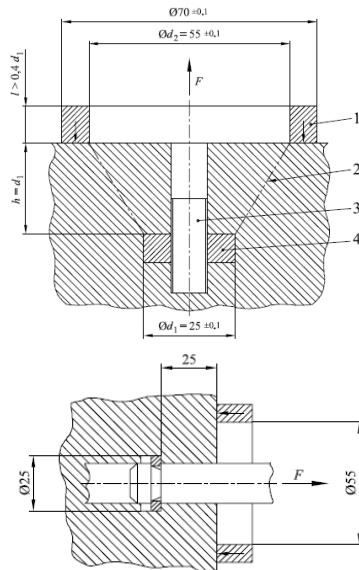
Prova di estrazione (pull-out)

Strumentazione: tassello post-inserito (o pre-inglobato) e martinetto con misuratore di pressione

Si inserisce un piccolo tassello metallico, dotato di uno stelo centrale e di un meccanismo di espansione (se post-inserito), nel calcestruzzo in modo che lo stelo rimanga sporgente dalla superficie del calcestruzzo. Si misura la pressione, da cui si ricava la forza, necessaria per estrarre il disco dal calcestruzzo (che provoca una rottura tronco-conica del materiale)

Vantaggi della prova di estrazione: ha tutti i pregi delle prove non distruttive (bassa invasività, facilità e rapidità di esecuzione; economica) ma il suo risultato, coinvolgendo una rottura a taglio-trazione del cls è più direttamente correlabile alla resistenza a compressione del cls rispetto alle altre prove non distruttive.

Il metodo di prova non è da intendersi come alternativo per la determinazione della resistenza a compressione sebbene, con opportune correlazioni, può fornire una stima piuttosto accurata della resistenza in situ del calcestruzzo. Occorre ricordare che le correlazioni, ancora non ben definite, possono essere anche significativamente differenti al variare del tipo di cls (soprattutto nel caso di cls con inerti fragili) e nel caso di elementi in c.a.p.



Indagini diagnostiche sui materiali

Prova di estrazione (pullout)

Fasi principali per l'esecuzione della prova di pullout



- Fresatura;
- Inserimento del tassello che presenta un meccanismo di espansione della testa di spinta;
- Applicazione del sistema di estrazione (martinetto idraulico e struttura metallica a contrasto);
- Misurazione della forza di estrazione.

Indagine dinamica

Valutazione del modulo elastico dinamico E_d ed il coefficiente di Poisson ν

(UNI 9771 – Calcestruzzo indurito. Determinazione della frequenza fondamentale di risonanza flessionale, estensionale e torsionale)

La prova prevede la misura delle **frequenze proprie di vibrazione flessionale, estensionale e torsionale**, di provini di calcestruzzo che possono essere cilindrici di raggio r [m], o rettangolare di larghezza b [m] e altezza h [m], e di lunghezza l [m] (area A [m^2], inerzia sezione trasversale $J=\pi r^2/4$ o $bh^3/12$ [m^4]) opportunamente vincolati e soggetti ad un impulso meccanico, impartito delicatamente ad esempio tramite un **martelletto**. Le vibrazioni conseguenti del provino vengono rilevate con sensori appositi, ad esempio **accelerometri**; dalle time-histories, tramite una semplice trasformata di Fourier, si ricavano le frequenze di risonanza, in particolare la prima **frequenza flessionale f_f , estensionale f_e , o torsionale f_t** a seconda delle modalità di prova, ovvero a seconda che lo schema di vincolo, il posizionamento dei sensori e l'impatto siano tali da sollecitare il provino flessionalmente, assialmente o torsionalmente. I valori dinamici del modulo elastico E_d , del modulo a taglio G_d , e del coefficiente di Poisson ν si determinano tramite le seguenti relazioni:

$$E_d = 4l^2 f_e^2 \rho C_1$$

$$C_1 = 1 + \left(\pi \nu^2 \frac{J}{Al^2} \right)$$

$$E_d = \frac{0.790123 f_f^2 m l^3 T}{\pi^2 J}$$

T è un fattore correttivo fornito in tabelle o grafici in funzione di ν e $\sqrt{\frac{J}{Al^2}}$

$$G_d = 4l^2 f_t^2 \rho R$$

$R = 1$
provini
cilindrici

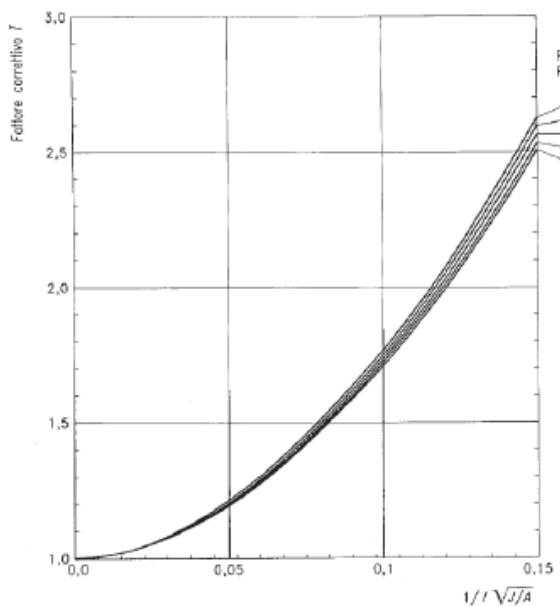
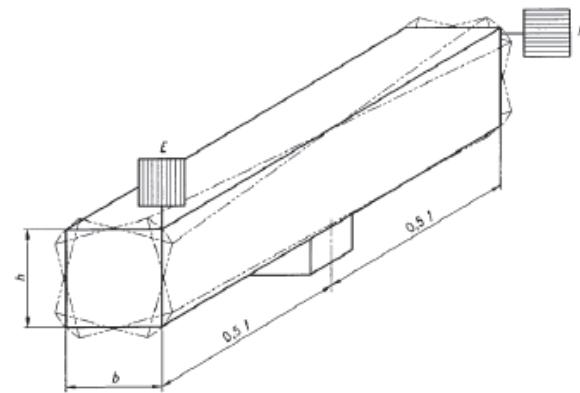
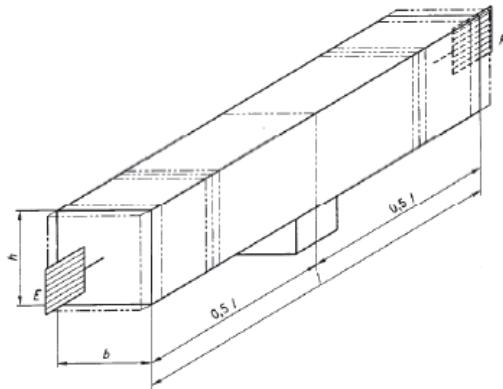
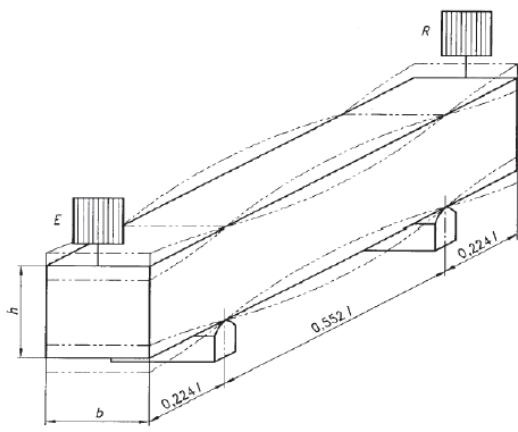
$R = 1.183$
provini a
sez. quadrata

$R = \frac{(b/h) + (h/b)}{4(b/h) - 2.52(b/h)^2 + 0.21(b/h)^6}$
provini a sez. rettangolare

$$\nu_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_d}{G_d} - 1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_1}{R} \cdot \left(\frac{f_e}{f_t} \right)^2 - 1$$

Indagini diagnostiche sui materiali

Indagine dinamica



Valori di T in funzione di $1/l \cdot \sqrt{J/A}$ e del rapporto di Poisson

$1/l \cdot \sqrt{J/A}$	Rapporto di Poisson				
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
0,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,01	1,008	1,008	1,008	1,008	1,009
0,02	1,032	1,032	1,033	1,034	1,034
0,03	1,071	1,072	1,073	1,075	1,077
0,04	1,125	1,127	1,129	1,132	1,135
0,05	1,193	1,196	1,199	1,203	1,208
0,06	1,275	1,278	1,283	1,289	1,295
0,07	1,369	1,373	1,379	1,387	1,396
0,08	1,474	1,480	1,488	1,498	1,510
0,09	1,592	1,599	1,609	1,621	1,636
0,10	1,720	1,729	1,741	1,756	1,774
0,11	1,859	1,870	1,884	1,902	1,923
0,12	2,008	2,021	2,038	2,059	2,084
0,13	2,167	2,182	2,202	2,227	2,256
0,14	2,335	2,353	2,376	2,405	2,439
0,15	2,513	2,533	2,560	2,593	2,632

Indagini diagnostiche sui materiali

Indagini su barre di armatura

Indagine visiva: E' un metodo di controllo non distruttivo che può essere effettuato ad occhio nudo o mediante l'utilizzo di endoscopio o lenti. Questo tipo di indagine consente di individuare zone o punti critici da ispezionare poi mediante altri metodi di controllo. Normativa di riferimento: UNI EN 13018

Prelievo e prova di trazione su barre di armatura: Estrazione di uno spezzone di almeno 45 cm di armatura e prova di trazione in laboratorio atta a determinare i valori di resistenza a snervamento e rottura dell'acciaio. Normativa di riferimento: UNI EN 15630-1, UNI EN 10002-1

Prove di durezza sugli acciai: L'indagine ha lo scopo di ottenere una stima della resistenza meccanica a trazione dell'acciaio eseguendo una stima della durezza superficiale mediante l'utilizzo di un micro-durometro portatile. La vibrazione ad alta frequenza della punta metallica del durometro, fa in modo di deteriorare la superficie del materiale correlando i dati ottenuti con l'effettiva durezza dell'acciaio. Normativa di riferimento: UNI EN ISO 18265, DIN 50.157, ASTM A956, ASTM A1038

Prova di corrosione delle barre di armatura: Verifica dello stato di corrosione delle barre di armatura nel calcestruzzo tramite la mappatura del potenziale. Il metodo consiste nella misura della differenza di potenziale elettrico esistente tra un polo positivo (costituito da un contatto diretto con l'armatura) e un polo negativo (costituito da un elettrodo di misura appoggiato sulla superficie di calcestruzzo). La prova restituisce una mappatura dei livelli di corrosione delle armature dell'elemento indagato. Riferimento normativo: UNI 10174, ASTM C 876-91.



Indagini diagnostiche sui materiali

Indagini su acciai

Prova con liquidi penetranti: Prova che evidenzia eventuali discontinuità superficiali del materiale. In particolar modo viene utilizzata per verificare la qualità delle saldature, evidenziando eventuali cricche e porosità. Normativa di riferimento: UNI EN ISO 3452-1, UNI EN ISO 23277

Indagine magnetoscopica: E' un metodo di controllo non distruttivo, che sfrutta le proprietà ferromagnetiche di alcuni materiali di lasciarsi magnetizzare e quindi di trasmettere il flusso magnetico. La magnetoscopia è in grado di rilevare l'eventuale presenza di discontinuità superficiali e sub-superficiali (cricche o difetti) sui pezzi esaminati, mediante l'addensamento della polvere magnetica in corrispondenza del flusso disperso. Normativa di riferimento: UNI EN ISO 3059, UNI EN ISO 9934, UNI EN 17638, UNI EN 1290, UNI EN 1291

Indagine con ultrasuoni: Questo tipo di controllo si basa sulla propagazione di onde elastiche attraverso l'elemento indagato da esaminare e sul monitoraggio del segnale trasmesso o riflesso da eventuali discontinuità. La prova risulta utile per l'ispezione delle saldature, componenti meccanici e anche per verificare la presenza d'inclusioni in prodotti di laminazione.
Normativa di riferimento: UNI EN 583-1, UNI EN 14127, UNI EN 10160

Indagini diagnostiche sui materiali

Piano di indagine

La **pianificazione delle indagini** (**piano di indagini**) è un'operazione complessa che richiede non solo la scelta corretta del tipo di indagini (in funzione della natura dell'opera e di eventuali dissesti) ma anche la quantità di saggi da effettuare (in funzione dell'estensione dell'opera in esame e del livello di conoscenza che si vuole raggiungere).

La procedura solitamente prevede una fase preliminare finalizzata valutazione dell'opera e di eventuali situazioni critiche e la successiva redazione del piano di indagini strumentali che possono anche essere rivalutate man mano che si acquisiscono informazioni.

In relazione agli edifici in c.a. le NTC 2018 forniscono delle indicazioni generali **a titolo esclusivamente orientativo** in quanto è compito/responsabilità del progettista redigere il piano di indagini più adeguato allo specifico caso in esame.

C8.5.4.2 COSTRUZIONI DI CALCESTRUZZO ARMATO O DI ACCIAIO

....

....

A titolo esclusivamente orientativo, nelle tabelle C8.5.V e C8.5.VI si lega il livello (limitato, esteso, esaustivo) delle indagini alla quantità di rilievi dei dettagli costruttivi e di prove per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali. Rimane inteso che il piano delle indagini deve essere opportunamente calibrato in funzione dell'analisi preliminare (v. § C8.5.2.2 e C8.5.3.2) e quindi, in relazione al livello di conoscenza da raggiungere, orientato agli approfondimenti necessari nelle zone della costruzione ove risulti opportuno, sia in relazione all'impegno statico delle diverse membrature e al loro ruolo riguardo alla sicurezza della struttura, sia in relazione al grado di omogeneità dei risultati delle prove preliminari e al loro accordo con quanto previsto dai documenti originari.

Indagini diagnostiche sui materiali

Piano di indagine

Tabella C8.5.V – Definizione orientativa dei livelli di rilievo e prova per edifici di c.a.

Livello di Indagini e Prove	Rilievo(dei dettagli costruttivi) ^(a)	Prove (sui materiali) ^{(b)(c)(d)}
	Per ogni elemento “primario” (trave, pilastro)	
<i>limitato</i>	La quantità e disposizione dell’armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell’edificio, 1 campione di armatura per piano dell’edificio
<i>esteso</i>	La quantità e disposizione dell’armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell’edificio, 2 campioni di armatura per piano dell’edificio
<i>esaustivo</i>	La quantità e disposizione dell’armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell’edificio, 3 campioni di armatura per piano dell’edificio

Tabella C8.5.VI – Definizione orientativa dei livelli di rilievo e prova per edifici di acciaio

Livello di Indagini e Prove	Rilievo (dei collegamenti) ^(a)	Prove (sui materiali) ^{(b)(c)(d)}
	Per ogni elemento “primario” (trave, pilastro...)	
<i>limitato</i>	Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 15% degli elementi	1 provino di acciaio per piano dell’edificio, 1 campione di bullone o chiodo per piano dell’edificio
<i>esteso</i>	Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 35% degli elementi	2 provini di acciaio per piano dell’edificio, 2 campioni di bullone o chiodo per piano dell’edificio
<i>esaustivo</i>	Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 50% degli elementi	3 provini di acciaio per piano dell’edificio, 3 campioni di bullone o chiodo per piano dell’edificio

- (a) Nel controllo del raggiungimento delle percentuali di elementi indagati ai fini del rilievo dei dettagli costruttivi si tiene conto delle eventuali situazioni ripetitive, che consentano di estendere ad una più ampia percentuale i controlli effettuati su alcuni elementi strutturali facenti parte di una serie con evidenti caratteristiche di ripetibilità, per geometria e ruolo uguali nello schema strutturale.
- (b) Le prove sugli acciai sono finalizzate all’identificazione della classe dell’acciaio utilizzata con riferimento alla normativa vigente all’epoca di costruzione. Ai fini del raggiungimento del numero di prove sull’acciaio necessario per acquisire il livello di conoscenza desiderato è opportuno tener conto dei diametri (nelle strutture in c.a.) o dei profili (nelle strutture in acciaio) di più diffuso impiego negli elementi principali, con esclusione delle staffe.
- (c) Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con almeno il triplo di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.
- (d) Il numero di provini riportato nelle tabelle C8.5.V e C8.5.VI può esser variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale. Nel caso del calcestruzzo in opera, tali caratteristiche sono spesso legate alle modalità costruttive tipiche dell’epoca di costruzione e del tipo di manufatto, di cui occorrerà tener conto nel pianificare l’indagine. Sarà opportuno, in tal senso, prevedere l’effettuazione di una seconda campagna di prove integrative, nel caso in cui i risultati della prima risultino fortemente disomogenei.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1		Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		<u>Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ</u>	<u>Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ</u>	Tutti	<u>1,00</u>

(*) A meno delle ulteriori precisazioni già fornite nel § C8.5.4.

LC3: si intende raggiunto quando sia stata effettuata l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato (con riferimento al § C8.5.1), la geometria della struttura sia nota in base ai disegni originali (effettuando un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni) o a un rilievo, i dettagli costruttivi siano noti, o dai disegni costruttivi originali integrati da *indagini limitate* in situ sulle armature e sui collegamenti presenti negli elementi più importanti, o (con riferimento al § C8.5.2) a seguito di una *indagine esaustiva* in situ (i dati raccolti devono essere tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare), le caratteristiche meccaniche dei materiali siano note in base ai disegni costruttivi e ai certificati originali di prova, integrati da *prove limitate* in situ (se i valori ottenuti dalle prove in situ sono minori dei corrispondenti valori indicati nei certificati originali di prova, si eseguono *prove esaustive* in situ), o con *prove esaustive* in situ (con riferimento al § C8.5.3); il corrispondente fattore di confidenza è **FC=1**. La valutazione della sicurezza è eseguita mediante metodi di analisi lineare o non lineare, statici o dinamici; le informazioni raccolte sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelle riguardanti i dettagli strutturali, devono consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1		Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	<u>1,20</u>
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

(*) A meno delle ulteriori precisazioni già fornite nel § C8.5.4.

LC2: si intende raggiunto quando sia stata effettuata l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato (con riferimento al § C8.5.1), la geometria della struttura sia nota in base ai disegni originali (effettuando un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni) o a un rilievo, i dettagli costruttivi siano noti, o parzialmente dai disegni costruttivi originali integrati da *indagini limitate* in situ sulle armature e sui collegamenti presenti negli elementi più importanti, o (con riferimento al § C8.5.2) a seguito di una *indagine estesa* in situ (i dati raccolti devono essere tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare), le caratteristiche meccaniche dei materiali siano note in base ai disegni costruttivi, integrati da *prove limitate* in situ (se i valori ottenuti dalle prove in situ sono minori dei corrispondenti valori indicati nei disegni di progetto, si eseguono *prove estese* in situ), o con *prove estese* in situ (con riferimento al § C8.5.3); il corrispondente fattore di confidenza è **FC=1,2**. La valutazione della sicurezza è eseguita mediante metodi di analisi lineare o non lineare, statici o dinamici; le informazioni raccolte sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelle riguardanti i dettagli strutturali, devono consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

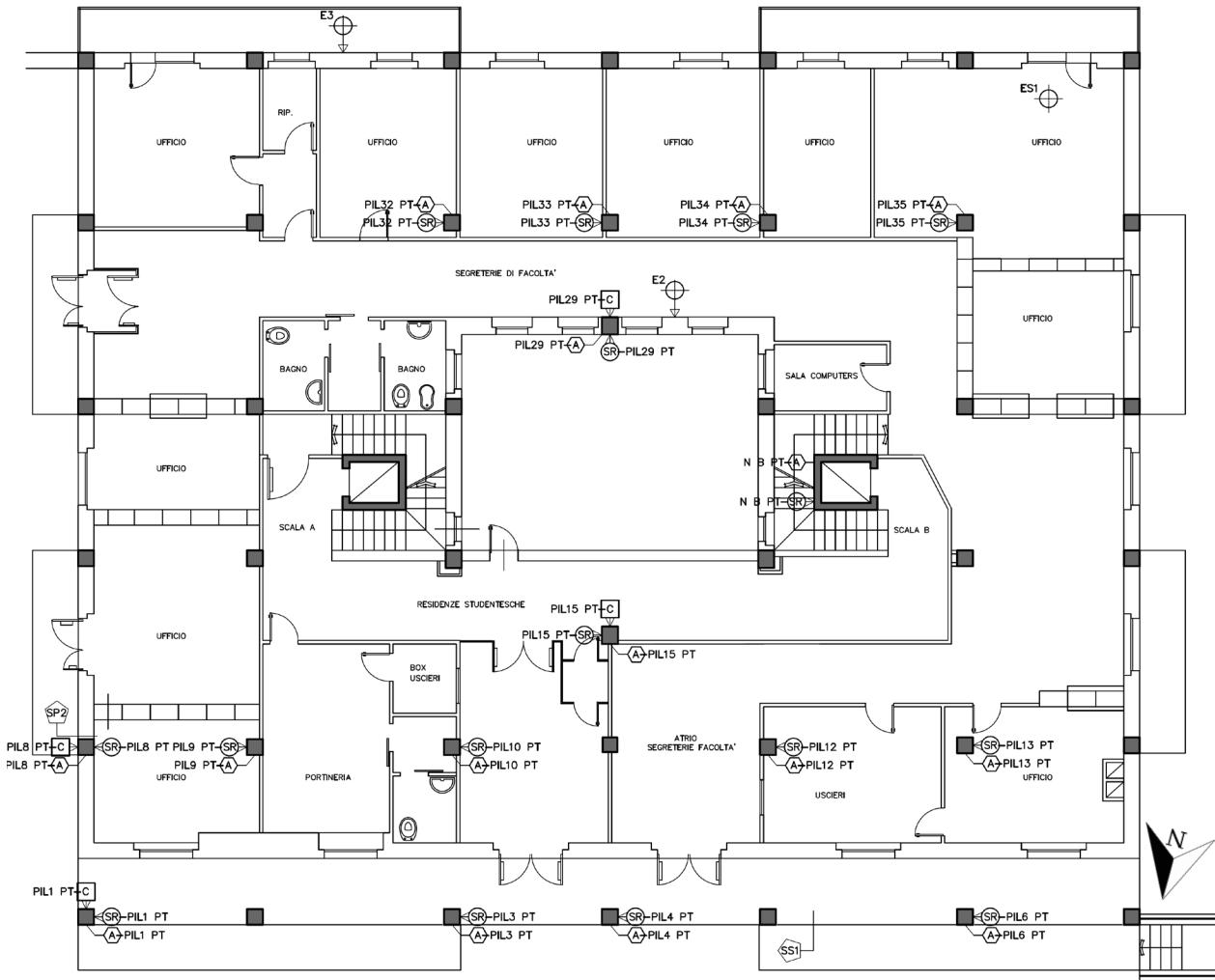
Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1		<u>Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e indagini limitate in situ</u>	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <u>prove limitate in situ</u>	Analisi lineare statica o dinamica	<u>1,35</u>
LC2	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

(*) A meno delle ulteriori precisazioni già fornite nel § C8.5.4.

LC1: si intende raggiunto quando sia stata effettuata l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato (con riferimento al § C8.5.1), la geometria della struttura sia nota in base ai disegni originali (effettuando un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni) o a un rilievo, poiché non si dispone dei disegni costruttivi i dettagli costruttivi siano stati ricavati sulla base di un progetto simulato (con riferimento al § C8.5.2) e con *indagini limitate* in-situ sulle armature e sui collegamenti presenti negli elementi più importanti (i dati raccolti devono essere tali da consentire verifiche locali di resistenza), poiché non si dispone di informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali (provenienti dai disegni costruttivi o dai certificati di prova) si siano adottati i valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca, convalidati da *prove limitate* in-situ sugli elementi più importanti (con riferimento al § C8.5.3); il corrispondente fattore di confidenza è **FC=1,35**. La valutazione della sicurezza è, in genere, eseguita mediante analisi lineare, statica o dinamica; le informazioni raccolte devono consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo.

Indagini diagnostiche sui materiali

Piano di indagine - Fazzini



LEGENDA

- C**: Prelievo di campione cilindrico di calcestruzzo mediante carotaggio
- SR**: Prova non distruttiva calcestruzzo Metodo Sonreb
- A**: Prelievo di campione di armatura
- E**: Indagine magnetoscopica per individuazione armature
- E**: Indagine endoscopica su pareti
- E**: Indagine endoscopica su solaio di calpestio
- SF**: Sondaggio in fondazione
- SP**: Sondaggio su parete
- SS**: Sondaggio su solaio

Indagini diagnostiche sui materiali

Piano di indagine - Fazzini

ELENCO PROVE Piano Seminterrato

- 1 Endoscopia orizzontale
- 7 Indagini magnetoscopiche per individuazione armature
- 7 Prove non distruttive calcestruzzo Metodo SonReb
- 1 Sondaggio su parete perimetrale
- 3 Sondaggi in fondazione
- 2 Carotaggi

ELENCO PROVE Piano Terra

- 2 Endoscopie orizzontali
- 1 Endoscopia verticale per stratificazione solaio inferiore
- 16 Indagini magnetoscopiche per individuazione armature
- 16 Prove non distruttive calcestruzzo Metodo SonReb
- 1 Sondaggio su parete
- 1 Sondaggio su trave per verifica dettagli costruttivi
- 1 Sondaggio su intradosso solaio superiore
- 4 Carotaggi

ELENCO PROVE Piano Primo

- 4 Endoscopie orizzontali
- 2 Endoscopie verticali per stratificazione solaio inferiore
- 7 Indagini magnetoscopiche per individuazione armature
- 7 Prove non distruttive calcestruzzo Metodo SonReb
- 1 Sondaggio su parete
- 3 Sondaggi su trave per verifica dettagli costruttivi
- 1 Sondaggio su solaio per verifica dettagli costruttivi
- 2 Carotaggi
- 3 Prove di carico su solai
- 2 Prove di carico su travi

ELENCO PROVE Piano Secondo

- 7 Indagini magnetoscopiche per individuazione armature
- 7 Prove non distruttive calcestruzzo Metodo SonReb
- 2 Carotaggi

ELENCO PROVE Piano Terzo

- 6 Indagini magnetoscopiche per individuazione armature
- 6 Prove non distruttive calcestruzzo Metodo SonReb
- 2 Carotaggi
- 1 Prelievo di barra d'armatura

ELENCO PROVE Piano Quarto

- 6 Indagini magnetoscopiche per individuazione armature
- 6 Prove non distruttive calcestruzzo Metodo SonReb
- 2 Carotaggi
- 1 Sondaggio su solaio per verifica dettagli costruttivi

ELENCO PROVE Piano Sottotetto

- 1 Endoscopia verticale per stratificazione solaio inferiore
- 1 Indagini magnetoscopiche per individuazione armature
- 1 Prove non distruttive calcestruzzo Metodo SonReb
- 1 Prelievo di campione di armatura
- 1 Sondaggio su trave per verifica dettagli costruttivi
- 1 Sondaggio su solaio per verifica dettagli costruttivi

Indagini diagnostiche sui materiali

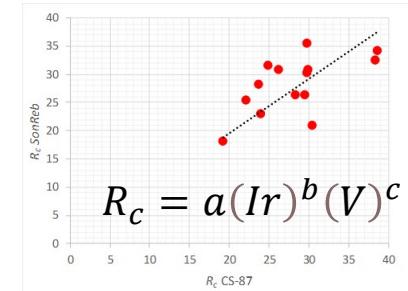
Risultati - Fazzini

Interpretazione dei risultati delle prove

14 carote estratte → **Concrete Society 1987** per correlazione tra resistenza misurata e resistenza cilindrica del calcestruzzo

$$f_c = f_{core} \cdot F_{l/d} \cdot F_a \cdot F_d$$

- f_{core} è la resistenza scaturita dalla prova di compressione del campione;
- $F_{l/d}$ è la correzione per snellezza del provino, pari a $2/(1.5+D/l)$ con D diametro del provino ed l altezza dello stesso;
- F_a è la correzione per la presenza di armature, pari a $1+1.5\cdot(\Phi/D\cdot d/l)$ dove d è la distanza della barra dalla base del provino più vicina e Φ è il diametro della barra;
- F_d è la correzione per il disturbo, pari a 1.3.



Sulle 14 carote misure con metodo SonReb da cui ricavare i valori delle costanti a b c , utilizzate per la stima della resistenza del calcestruzzo su ulteriori 50 misure SonReb

Stima delle caratteristiche meccaniche dei materiali

Calcestruzzo di pilastri e setti si presenta apparentemente omogeneo e caratterizzato (casi limitati) da inerti di diametro non trascurabile. Prove non distruttive (metodo SonReb) e distruttive (schiacciamento carote) hanno fornito valori piuttosto omogenei al variare dei livelli e degli elementi sottoposti a prova. Valore medio di resistenza cubica dedotto da tutte le prove effettuate su pilastri e setti è

	Media R_c [MPa]	dev. st. R_c [MPa]
calcestruzzo	28.20	6.61

Armature di pilastri e setti presentano caratteristiche meccaniche assimilabili alla classe Aq60

Analisi storico-critica

Rilievo geometrico-strutturale e materico

Rilievo quadro fessurativo e del degrado

Indagini diagnostiche sui materiali

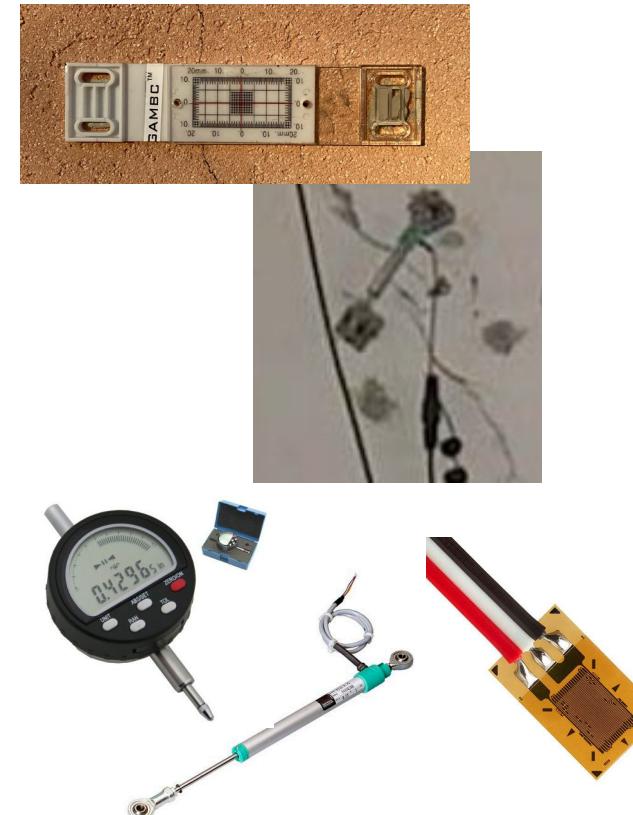
Monitoraggi e prove di carico

Monitoraggio statico

Monitoraggio statico (periodico o continuo)

Con monitoraggio si intende il controllo in tempo reale di un fenomeno attraverso **l'esame visivo periodico** (ispezioni) nonché la **misura di parametri fisico-meccanici** quali:

- gli spostamenti o le rotazioni: per gli spostamenti si possono utilizzare le tecniche di rilievo topografico tradizionali o tecniche più avanzate basate su stazioni robotizzate, per le rotazioni inclinometri o livelle di precisione elettroniche
- Il quadro fessurativo: tramite fotogrammetria (ma senza rilevare l'ampiezza) oppure tramite fessurimetri costituiti da lame in materiale plastico trasparente libere di scorrere l'una sull'altra e disposte a cavallo della fessura. Una delle lame ha un reticolo graduato per la lettura dell'ampiezza. Uno strumento alternativo è il deformometro che misura lo spostamento tra due basette pre-позионate (a cavallo della fessura) con la precisione del millesimo di mm. Possono essere anche di tipo elettronico e quindi acquisiti in automatico. Se la misurazione è ciclica potrebbe essere dovuta alla variazione termica giornaliera o stagionale, è possibile anche correlarla all'altezza di una eventuale falda acquifera tramite l'inserimento nel terreno di un tubo piezometrico;
- lo stato deformativo: tramite deformometri o flessimetri, trasduttori di spostamento, estensimetri



Monitoraggio statico

Esempio di monitoraggio periodico di un viadotto in c.a. (messo in sicurezza) mediante impiego di una stazione totale robotizzata servo-assistita di alta precisione e mire di collimazione (prismi ottici).

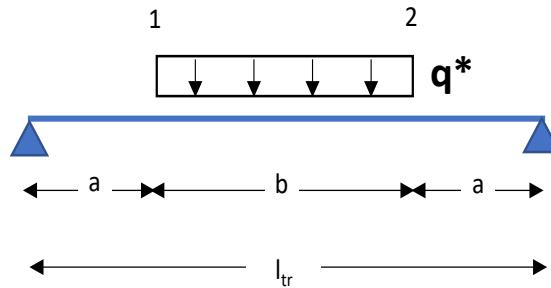
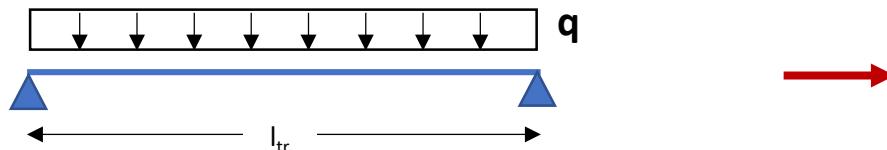


Prova di carico

Le prove di carico sui solai sono generalmente eseguite mediante materassini o vasche (riempiti con acqua) di superficie ridotta rispetto alle campiture di solaio da testare

Questo richiede la determinazione del carico equivalente q^* ovvero il volume di acqua con cui caricare i materassini in modo da ottenere il medesimo momento massimo sollecitante del carico q di progetto

La prova viene eseguita per step successivi di carico (in termini di litri di acqua da immettere nei materassini)
→ solitamente garantiti da una pompa a controllo volumetrico.



Prove di carico sul Collegio Fazzini (Camerino)



Cisterna



Prova di carico solai



Prova di carico travi

Prova di carico - Fazzini

Le prove di carico

Le prove hanno confermato le capacità resistenti di travi e solai nei confronti del carico di progetto

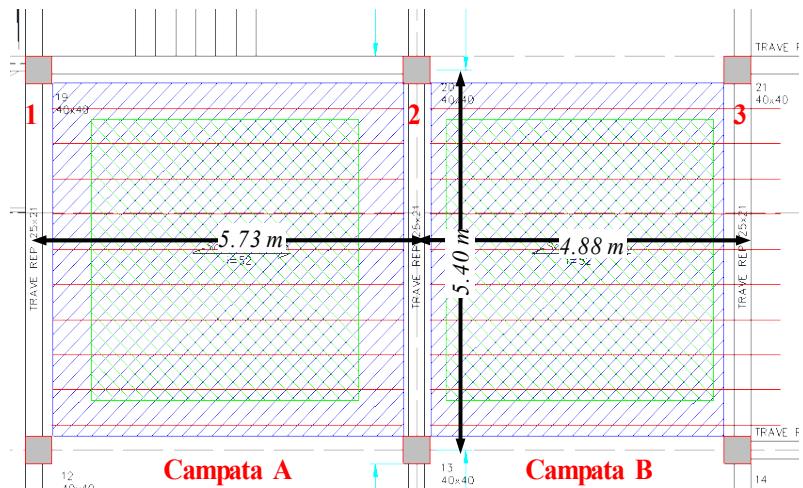
Il carico di progetto equivalente testato è di 3.5 kN/m² è pari alla differenza tra il carico di progetto in combinazione caratteristica (rara) ed il reale carico presente al momento della prova sui solai → la prova effettuata è del tutto equivalente ad una prova di collaudo statico da NTC2018

Sequenza prove

n.5 prove di carico calibrate per ottenere

1. Max sollecitazioni del solaio nella CAMPATA A
2. Max sollecitazioni del solaio nella CAMPATA B
3. Max sollecitazioni del solaio all'appoggio
4. Max sollecitazioni della trave (prima applicazione)
5. Max sollecitazioni della trave (ripetizione del ciclo carico e scarico)

Nelle fasi 1-3 le travi REP sono puntellate per misurare sola deformazione solaio



Ipotetica posizione travetti

Superficie da caricare con 3.5 kN/m²

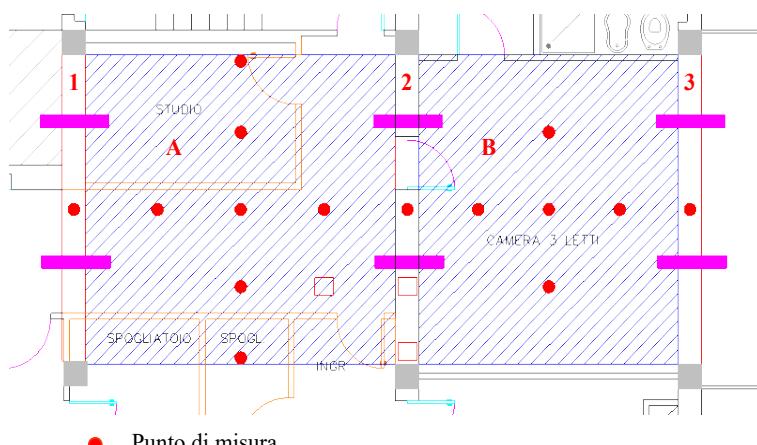
Materassini

Prova di carico - Fazzini

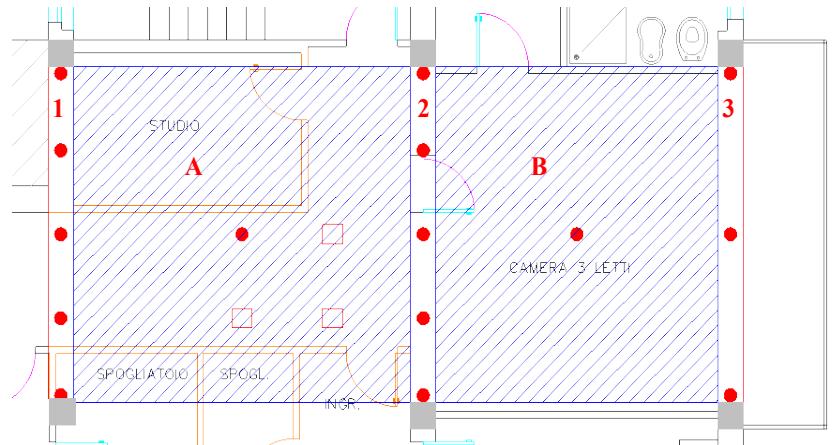
Frecce misurate con 18 flessimetri con specifica distribuzione per ricostruire al meglio il campo di spostamenti degli elementi principali testati (solai e travi)



Configurazioni 1-3



Configurazioni 4-5



Puntellamento trave

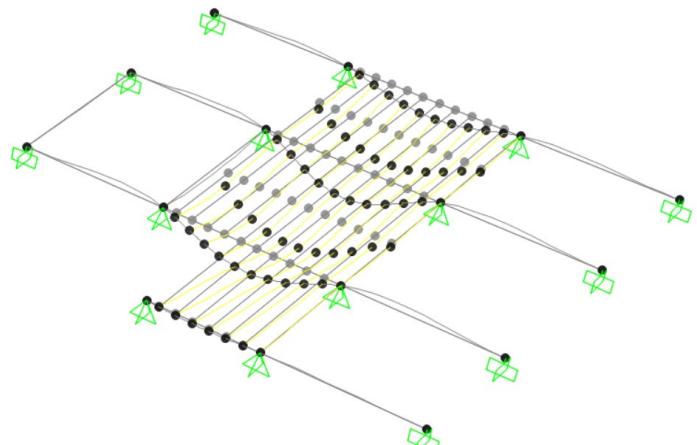
punto di misura aggiuntivo

Prova di carico - Fazzini

Esiti prove di carico

- le frecce misurate sono sostanzialmente lineari nella fase di carico
- le frecce misurate sono coerenti con quelle del modello di calcolo in cui viene considerata anche la rigidezza della non struttura (massetto + graniglia)
- Esito prove favorevole → recupero frecce solai e travi sostanzialmente elastico nella fase di scarico

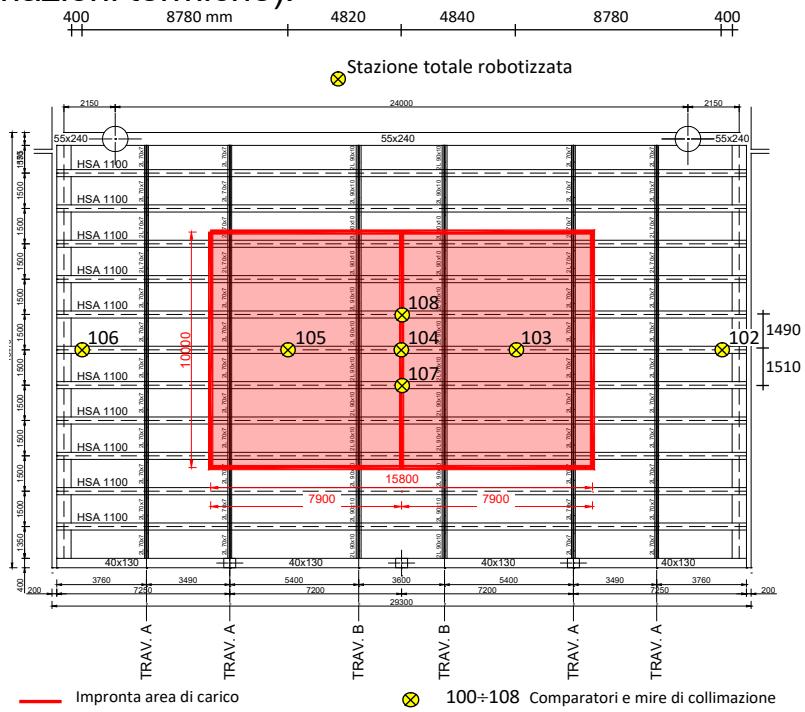
FRECCE	Misurazione flessimetri mezzeria							
	PROVA 1- CAMPATA A		PROVA 2- CAMPATA B		PROVA 4-TRAVE REP		PROVA 5-TRAVE REP	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
Step 1	0.00	(0%)	0.00	(0%)	0.00	(0%)	0.00	(0%)
Step 2	-0.51	(22%)	-0.38	(24%)	-0.43	(23%)	-0.54	(28%)
Step 3	-1.08	(48%)	-0.76	(47%)	-0.97	(52%)	-1.03	(54%)
Step 4	-1.68	(74%)	-1.14	(71%)	-1.37	(73%)	-1.44	(75%)
Residuo	-2.27	(100%)	-1.61	(100%)	-1.88	(100%)	-1.91	(100%)
	-0.37	(16%)	-0.11	(7%)	-0.06	(3%)	-0.15	(8%)



Prova di carico

Prova di carico sul solaio di copertura della palestra dell'ITCG di Camerino (MC)

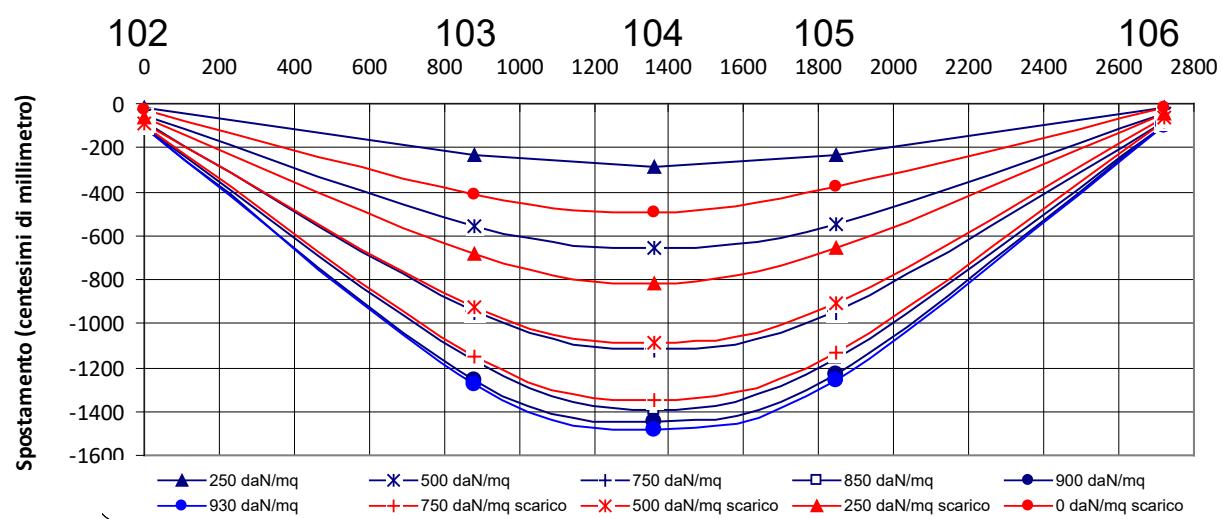
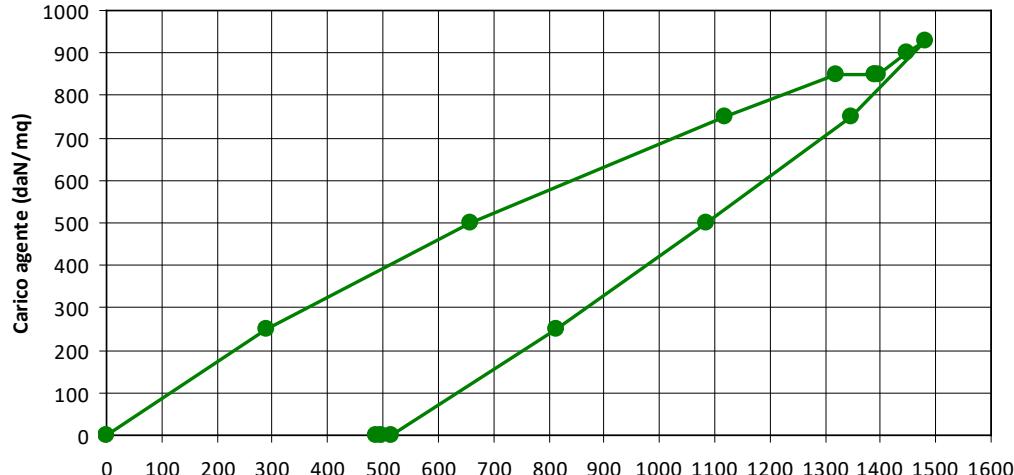
Nel 2012 è stata eseguita una prova di carico impegnativa sulla copertura della palestra dell' Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri e Liceo Linguistico Socio Pedagogico di Camerino. Il solaio è stato caricato gradualmente pompando acqua all'interno di due vasche, di dimensioni 6.90x10.0m ciascuna, allestite in adiacenza al di sopra del solaio. Il massimo carico è stato di 930 kg/m² uniformemente distribuito sull'area coperta dalle vasche (15.8x10.0), pari ad un livello di acqua di 93 cm. Il monitoraggio è stato eseguito al crescere del carico imposto misurando gli spostamenti verticali del solaio con riferimento a punti di misura all'intradosso del solaio stesso, mediante una stazione totale e 7 trasduttori di spostamento. Questi ultimi erano posizionati a terra e collegati ai punti di misura tramite cavi di acciaio armonico (non sensibile a variazioni termiche).



Prova di carico

Prova di carico sul solaio di copertura della palestra dell'ITCG di Camerino (MC)

Spostamento punto di misura 104 (in centesimi di mm)



Prova di carico

Prova di carico statico della tribuna e della copertura dello stadio di AP

Nel 2016 è stata eseguita una prova di carico impegnativa sulla tribuna e sulla copertura dello stadio di Ascoli Piceno. La tribuna è stata caricata in modo «quasi» uniforme disponendo blocchi di laterizio forato su un intero settore della stessa; la copertura è stata caricata appendendovi serbatoi riempiti con acqua. Il carico imposto è stato opportunamente calcolato in modo tale da raggiungere le sollecitazioni massime sotto le quali la risposta della struttura doveva essere valutata. Il monitoraggio è stato eseguito al crescere del carico imposto misurando gli spostamenti verticali della tribuna copertura e della gradinata mediante trasduttori di spostamento posizionati a terra e collegati alla copertura con fili di acciaio armonico (non sensibile a variazioni termiche).



Monitoraggio dinamico

conoscenza struttura identificata
“impronta digitale”



Monitoraggio programmato
e dopo azioni eccezionali



Controllo variazioni dovute a:
- degrado
- danneggiamenti

Monitoraggio continuo



Controllo variazioni dovute a:
- Degrado
- Danneggiamenti
- Influenza di fattori ambientali

Verifica del comportamento dinamico
durante l'azione eccezionale

Monitoraggio dinamico

Oggetto della sperimentazione

Edifici e/o ponti (in c.a, in muratura, misti, ...) in condizioni operative (struttura + non struttura) con

massa e rigidezza elevate



L'eccitazione dinamica della struttura richiede

energia elevata

Prove con input ignoto (non misurabile)

Forzanti ambientali



poco impegnative

Vantaggi Poco impegnativa ed economica: non richiede sistema per input
tempi di esecuzione ridotti

Realizzata in condizioni operative: Non necessita l'interruzione di esercizio
reale comportamento (struttura + non struttura)

Limiti

Comportamento dinamico a bassi livelli di
energia ($10^{-2}g \div 10^{-4}g$), bassissime deformazioni



comportamento elastico a
basse deformazioni

Monitoraggio dinamico

Strumentazione

E' facilmente reperibile, a prezzi contenuti.

Molto economica in confronto al costo dell'opera e ai metodi tradizionali di controllo nel piano di manutenzione.

Gli elementi base di un sistema di misura sono:

- Sensori accelerometri o velocimetri
ad elevata sensibilità e basso rumore di fondo
- Cablaggio (o wireless)
- Condizionatori di segnale
- Schede di acquisizione
- PC con software di acquisizione dati



Monitoraggio dinamico

Prove di identificazione dinamica del Collegio Fazzini (Camerino)

L'identificazione dinamica dello stato di fatto durante e dopo la crisi sismica 2016-2017

- Completamento della conoscenza della struttura in termini di risposta complessiva
- Caratterizzazione dinamica dell'edificio → identificare frequenze e forme modali struttura esistente
- Fornisce informazioni sulla rigidezza effettiva dell'insieme struttura non-struttura

Strumentazione

- accelerometri monoassiali sismici PCB Model 393B31 0.5g Sensitivity 10 V/g
- centralina di acquisizione NI cDAQ -9178
- schede di acquisizione NI 9234



Piano Seminterrato



Piano Secondo

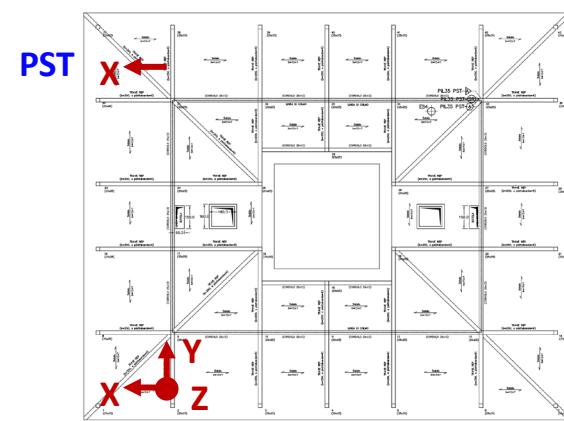
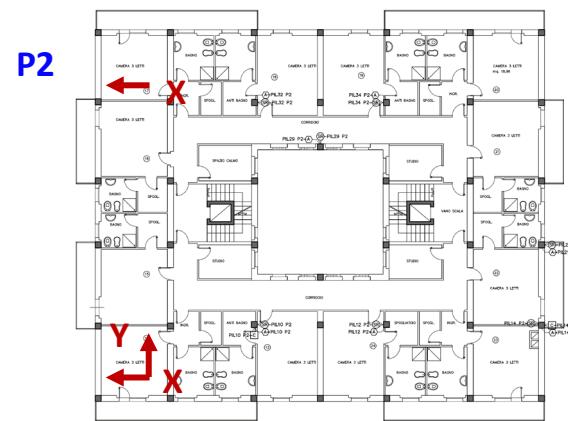
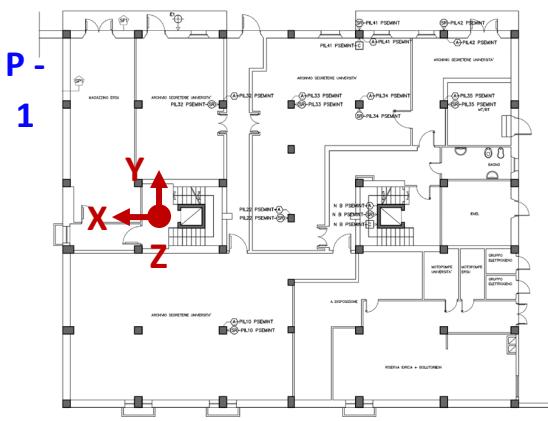


Piano Sottotetto

Monitoraggio dinamico

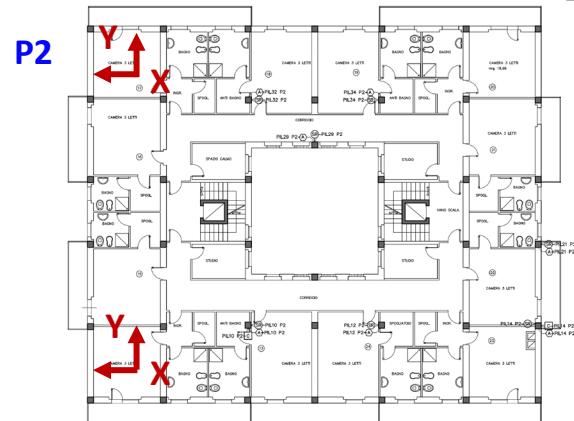
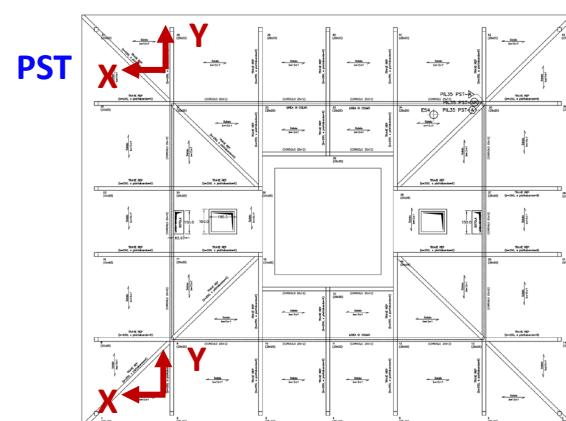
Caratterizzazione 1: 29/08/2016 ore 19:07 → 31/08/2016 ore 11:44 n. 1 acquisizione in continuo

- No danni strutturali sul telaio
 - Lievi filature tamponatura esterna non confinata PT sul fronte principale
 - n.10 accelerometri dir. X, Y, Z (P -1, P2, PST)



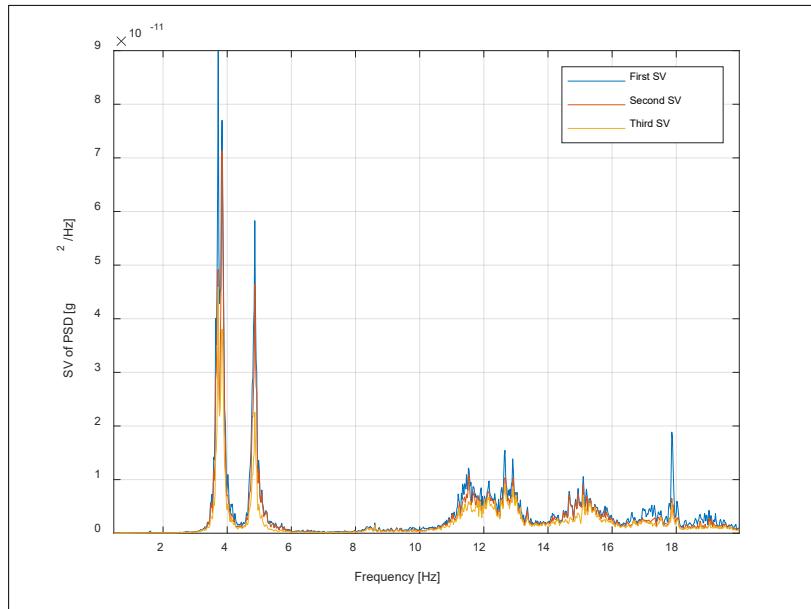
Caratterizzazione 2: 05/06/2018 n.2 acquisizioni da 20 minuti

- Telaio danneggiato (inagibile)
 - n.8 accelerometri solo dir. X e Y
(P2 e PST)

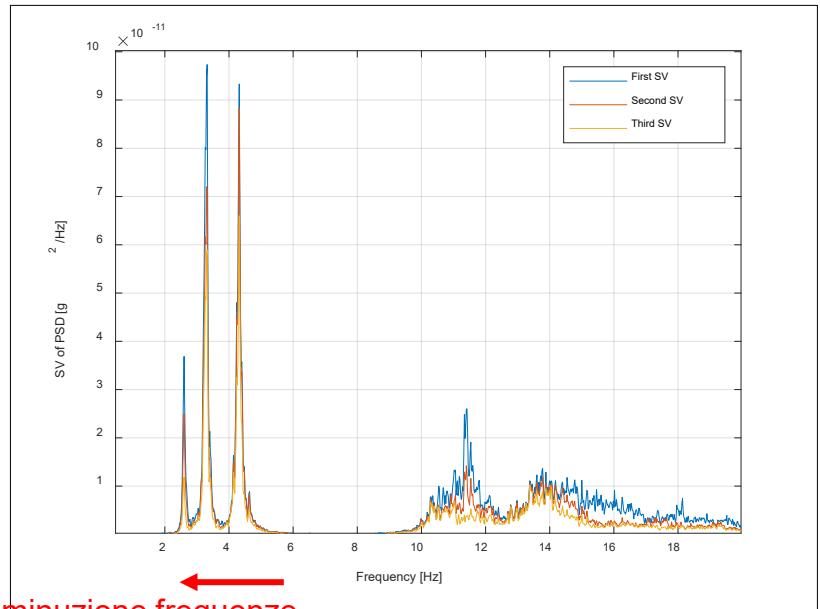


Monitoraggio dinamico

Caratterizzazione 1



Caratterizzazione 2



Diminuzione frequenze

Rielaborazione frequenze
Caratterizzazione 1

Modo	T [s]	f [Hz]
1	0.27	3.72
2	0.26	3.86
3	0.20	4.86

Rielaborazione frequenze
Caratterizzazione 2

Modo	T [s]	f [Hz]
1	0.38	2.60
2	0.30	3.28
3	0.23	4.31

Monitoraggio dinamico - Esempio

Liceo Varano a Camerino

Monitoraggio mediante misure vibrazionali, finalizzato alla:

- calibrazione del modello strutturale, completo di tamponamenti, da utilizzare per il progetto dell'intervento;
- verifica del comportamento dinamico previsto dal progetto rispetto a quello reale (sperimentale) misurato dopo la realizzazione dell'intervento.

Adeguamento mediante “Torri dissipative”

- Struttura reticolare in acciaio, su piastrone in c.a. incernierato alla base, connessa ai solai dell'edificio.
- Dispositivi viscosi alla base della torre che si attivano per spostamenti (velocità) verticali della base rispetto al suolo.
- Sistema di leve per amplificare gli spostamenti dei dispositivi dissipativi.

Principali Vantaggi

- Protezione sismica garantisce l'operatività dell'edificio anche per sismi di elevata intensità.
- Intervento esterno alla struttura; non richiede l'interruzione d'uso.
- Elevata riduzione dei costi.



A.Balducci - Dissipative Towers

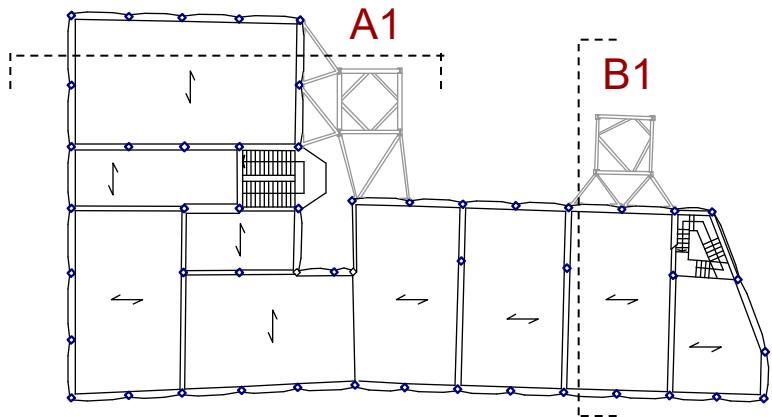
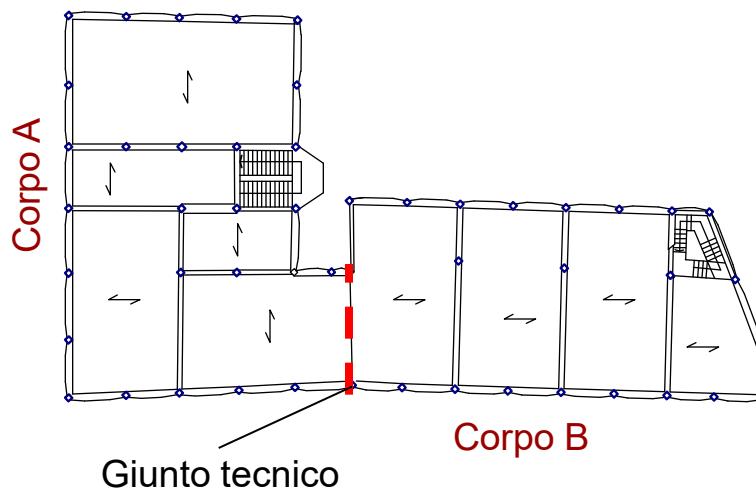
Application n. EP20100747238 20100831, WO2010EP62748 20100831,
Inter. and Europ. Class. E04H9/02 - Italian conc. n° 0001395591,2005. 82

Monitoraggio dinamico - Esempio

Prima adeguamento



Dopo adeguamento

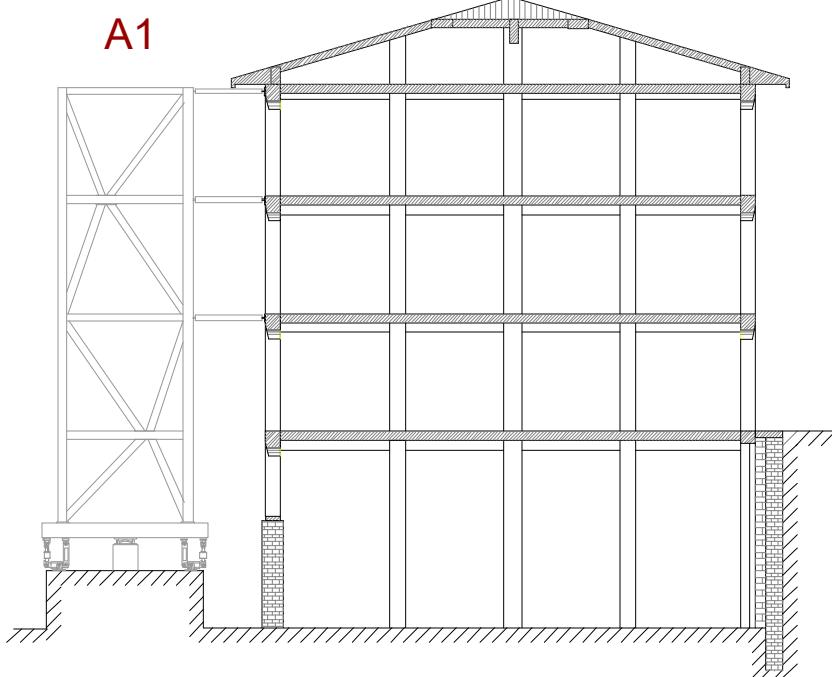


2 torri dissipative,
con 4 dissipatori viscosi ciascuna

Monitoraggio dinamico - Esempio

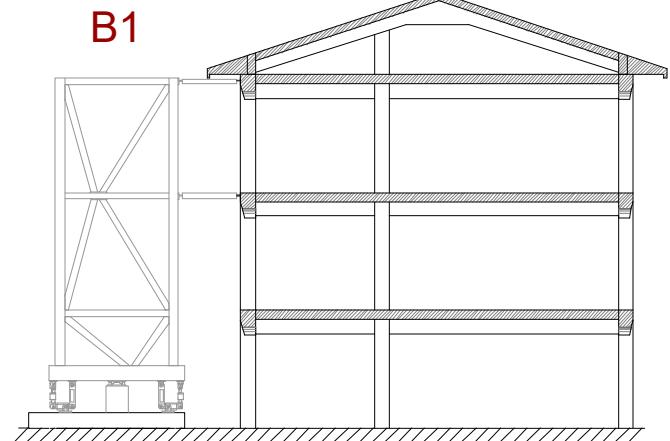
Sezioni

Corpo A



Torre più alta,
collegata agli ultimi 3 solai

Corpo B



Torre più bassa,
collegata agli ultimi 2 solai

Monitoraggio dinamico - Esempio

Prove con vibrazioni ambientali

Strumentazione

12 accelerometri
monoassiali disposti
in unica
configurazione

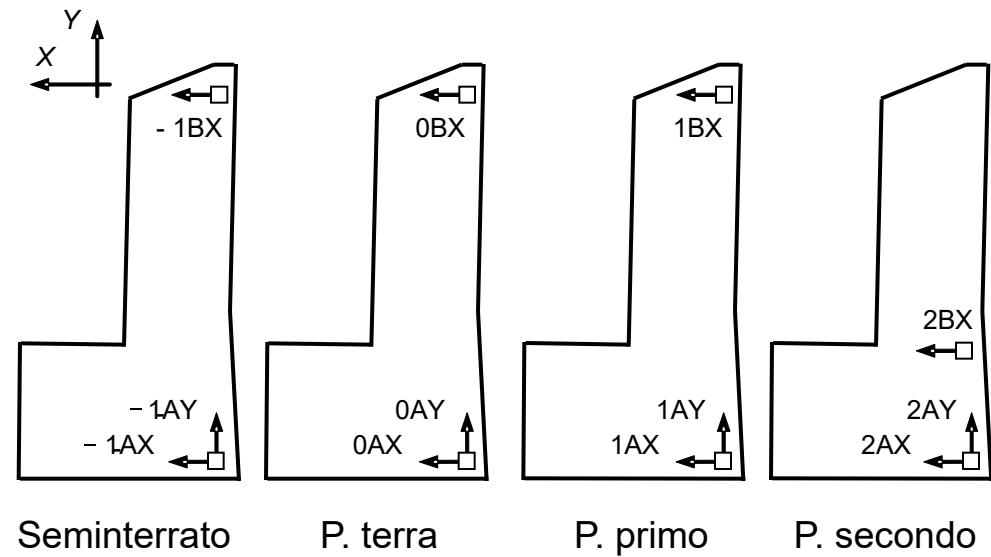


Posizionamento

Ip.: moto rigido del solaio

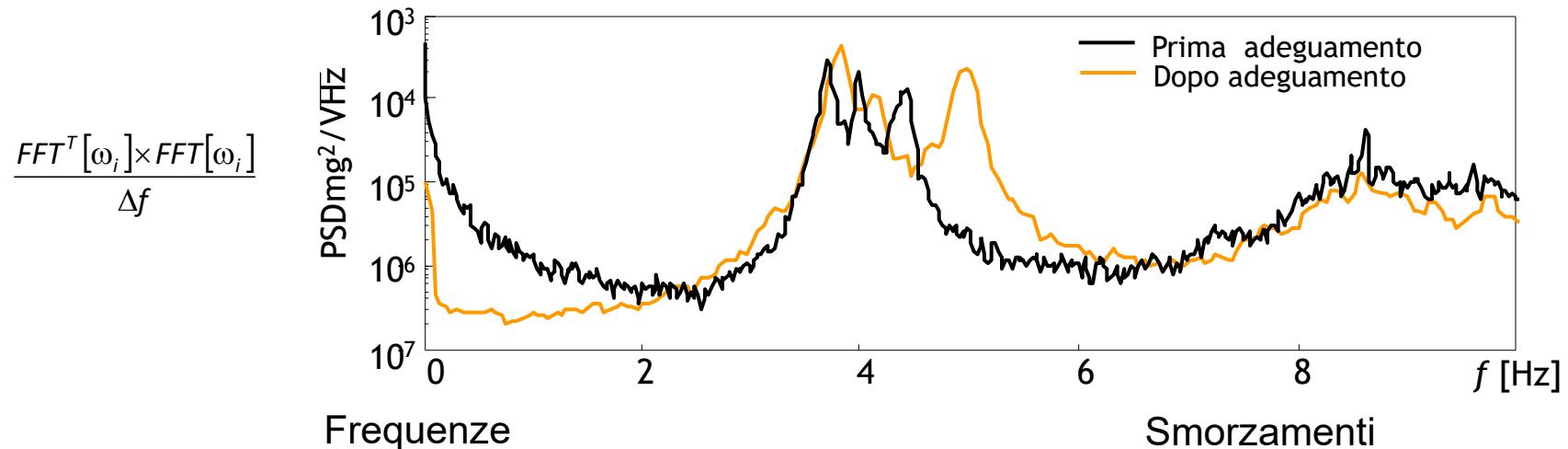
3 gradi di libertà / piano

3 accelerometri per piano
AX, AY e BX → X, Y e ϕ



Monitoraggio dinamico - Esempio

Confronto prima e dopo l'adeguamento



Frequenze

Smorzamenti

Mode	EFDD		
	f_{prima} [Hz]	f_{dopo} [Hz]	Δf [%]
1°	3.61	3.60	-0.3
2°	3.71	3.84	3.5
3°	4.00	4.16	4.0
4°	4.38	5.00	14.0

Generale aumento delle frequenze.
Frequenza del 1° modo è pressoché invariata
Aumento più marcato per i modi superiori

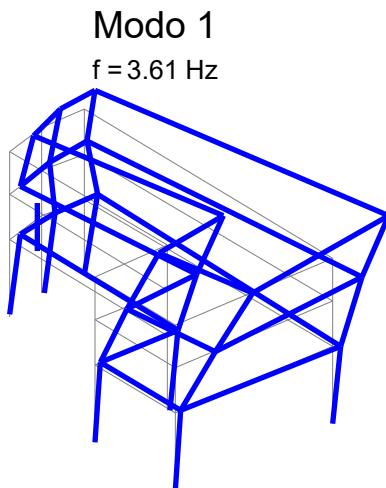
Mode	EFDD		
	ξ_{prima} [%]	ξ_{dopo} [%]	$\Delta \xi$ [%]
1°	0.85	1.40	0.65
2°	0.72	0.27	-0.45
3°	1.22	0.98	-0.24
4°	1.15	0.77	-0.38

Valori plausibili ma molto dispersi
Trend non chiaro tra prima e dopo
Dissipazione torri impossibile da cogliere

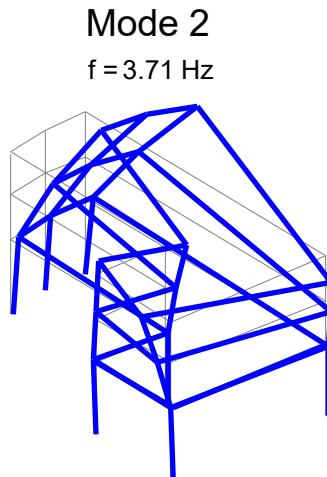
Monitoraggio dinamico - Esempio

Forme modali

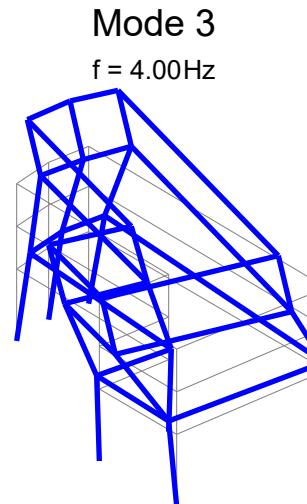
1° trasversale



1° torsionale

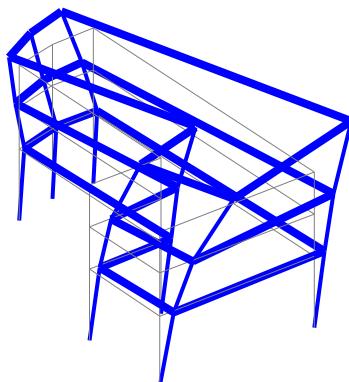


1° longitudinale

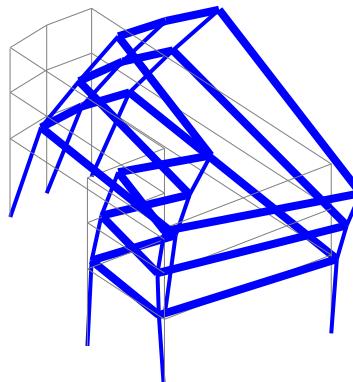


prima

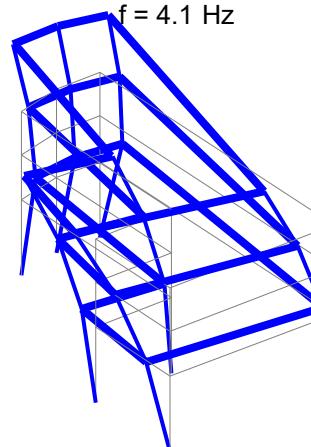
Modo 1
 $f = 3.6 \text{ Hz}$



Modo 2
 $f = 3.8 \text{ Hz}$



Modo 3
 $f = 4.1 \text{ Hz}$



dopo

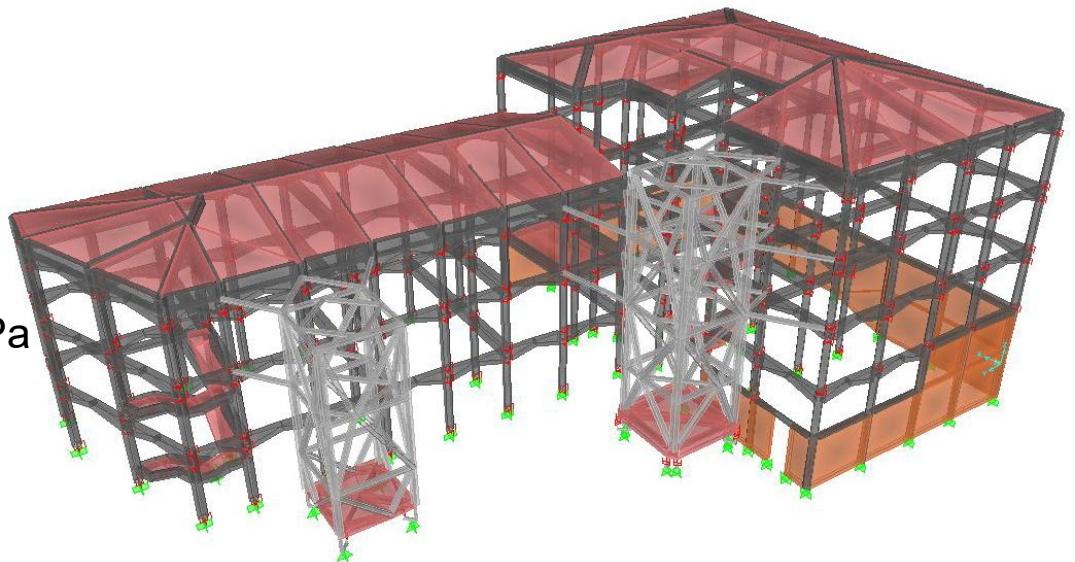
Le forme modali
rimangono molto simili

Monitoraggio dinamico - Esempio

Modellazione

Struttura nuda

$$E_{\text{tangenzaile}} = 1.2 \quad E_{\text{secante}} = 1.2 \cdot 26747 \text{ MPa}$$



Struttura e tamponature

$$E_{\text{muratura}} = 1200 \text{ MPa}$$

